

基于组合型 L-系统的单树建模工具的设计与实现

林郁欣, 唐丽玉, 陈崇成^{*}, 林民铨

(福州大学福建省空间信息工程研究中心, 空间数据挖掘与信息共享教育部重点实验室, 福州 350002)

摘 要: 该文依据植物形态学和树木生长过程的生理生态学原理, 提出由器官尺度上升单树尺度的 L-系统文法规则组合拼接方法, 该方法有利于 L-系统树木形态和生长规则的重用, 实现对树木形态拓扑结构的本真还原和科学模拟。该文设计了基于 L-系统的单树建模工具软件的功能体系结构, 并在 VC++ 开发环境下采用 OpenGL 图形标准、VRML 虚拟现实建模语言开发完成了单树建模工具软件-LSTree。LSTree 具有模型输入输出、树木三维可视化、生长过程模拟等业务功能, 以及良好的人机交互性能和灵活、科学的单树模型组织管理方式。该软件可用于精准农业, 以及植物学和生态学方面的教研、宣教等专业研究与应用。

关键词: 仿真, 单树建模, 形态拓扑, 组合型 L-系统, LSTree

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2011.03.035

中图分类号: TP391.9

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2011)-03-0185-06

林郁欣, 唐丽玉, 陈崇成, 等. 基于组合型 L-系统的单树建模工具的设计与实现[J]. 农业工程学报, 2011, 27(3): 185—190.

Lin Yuxin, Tang Liyu, Chen Chongcheng, et al. Design and Implementation of tree individual modeling tool based on compounded L-system[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(3): 185—190. (in Chinese with English abstract)

0 引 言

近年来, 随着生命科学与信息科学的进一步交叉融合, 将植物结构和功能数字化, 实现植物形态结构的精确描述、可视化表达、定量分析, 以及对植物系统内部各要素的状态、发展演变过程进行定量计算、评价、模拟和预测已经成为可能, 并成为现代农业科学的一个重要发展方向^[1]。虚拟植物已经被作为一种有用的工具来理解基因功能、植物生理、植物生长及植物形态间复杂的关系^[2]。理论研究方面, 按建模方法和目的不同可将虚拟植物模型分为静态和动态两类^[2-3], 采用 L-系统^[4]、参考轴、双尺度自动机、参数化^[5-6]和分形等方法构建的植物模型属于动态模型, 静态模型包括采用三维数字化仪(如激光扫描仪等)或基于二维图像三维重建等方法构建的植物模型; 系统实现方面, 目前比较成熟的虚拟植物软件有 AMAP、SpeedTree、Vlab/L-Studio、ParaTree 等。法国国际农业研究发展中心(CIRAD)开发的 AMAP 系列软件基于“参考轴”技术开发, 具有描述植物生长、

死亡、枝条分布情况和三维可视化模拟植物生长过程的功能^[7]。SpeedTree CAD 是一个高度交互式构建三维树木模型的软件产品。在该建模系统中, 设计者可通过调整分枝长度、分枝角度、树皮与叶片纹理映射方式等途径, 来提高树木模型的逼真度, 该软件拥有参数输入方法结构合理、便于操作等优点, 但其建模过程不符合植物的实际生长特点^[8]。加拿大 Calgary 大学开发的基于 L-系统的虚拟植物模拟软件 Vlab/L-Studio, 理论成熟, 使用广泛。用户可以根据其预定义解释符号编写系统产生式规则生成三维植物。该软件功能较强, 不仅能生成各种植物图形, 也能模拟植物与环境之间的交互行为(如树枝空间竞争、向光性), 但使用复杂、理解困难、交互性差, 不易于快速生成用户期望的植物模型^[9-10]。

近年来, 中国在该领域也取得较大的进展。以中国科学院自动化研究所中法实验室(LIAMA)为代表, 他们与中国农业大学等单位合作, 建立了 GreenLab(青园)数学模型^[11], 对玉米和棉花地上部分和根系的三维数字化和可视化进行了详尽研究。在此基础上, 郭焱等开发了基于三维数字化技术的作物冠层信息采集系统原型, 实现了各类作物的三维重建^[12-13]。福州大学以陈崇成为核心的地学可视化与虚拟森林环境研究小组也开发了参数化单树建模工具 ParaTree^[5-6]。

目前对虚拟农作物的研究较多, 虚拟树木的研究相对较少, 能很好地结合树木功能-结构模型的研究则更为少见。这是由于森林生态系统相对农业生态系统更为复杂多样, 且树木在生长发育方面与农作物有着显著的不同。针对树木建模的复杂性, 本文提出组合型 L-系统方法, 该方法有利于 L-系统规则的重用, 使建模过程更简单高效。在此基础上, 本文设计并实现了单树建模工具

收稿日期: 2010-10-27 修订日期: 2011-03-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(30972299, 41001203); 国家 973 计划前期研究专项课题(2009CB426310); 欧盟第七框架项目(FP7-2009-People-IRSES); 中匈政府间国际科技合作项目; 福建省自然科学基金项目(2010J01203)

作者简介: 林郁欣(1985—), 男, 福建福州人, 主要研究方向: 虚拟地理环境与数字区域模型。福州 福州大学福建省空间信息工程研究中心, 350002。Email: interlyx@foxmail.com.

^{*}通信作者: 陈崇成(1968—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事地学可视化与虚拟森林环境、空间数据挖掘与知识网格等方面的研究与教学。福州 福州大学福建省空间信息工程研究中心, 350002。

Email: chencc@fzu.edu.cn

软件-LSTree, 该软件不仅继承了 L-系统能较好地描述植物生理生态发育过程的优点, 还克服了 L-系统固有的建模复杂、交互性差的缺点, 构建的模型具有较强的真实感。

1 系统的定位与功能

1.1 系统定位

基于 L-系统的单树建模工具 (LSTree) 是在经典 L-系统理论指导下, 基于植物形态结构特征、植物生长发育的生理生态过程开发而成的单株植物建模软件。系统通过可视化交互界面编写植物形态结构与生长发育的文

法规则或选择亲缘关系邻近的模型样本进行规则修改, 以生成不同树种、不同年龄、不同物候期形态各异的真实感植物三维模型。生成的模型忠实于植物学原理, 即符合植物的生长规律, 亦体现植物物候和多年动态变化。

1.2 系统功能

系统以模拟植物的形态结构和生理生态过程、形象直观地解析植物生长发育过程为应用导向, 目标是形成具有单树三维建模、生长过程模拟、树木与环境交互模拟、基于形态结构知识本体约束的树木建模、三维可视化交互等功能的实用化系统。系统拥有的业务功能见图 1。

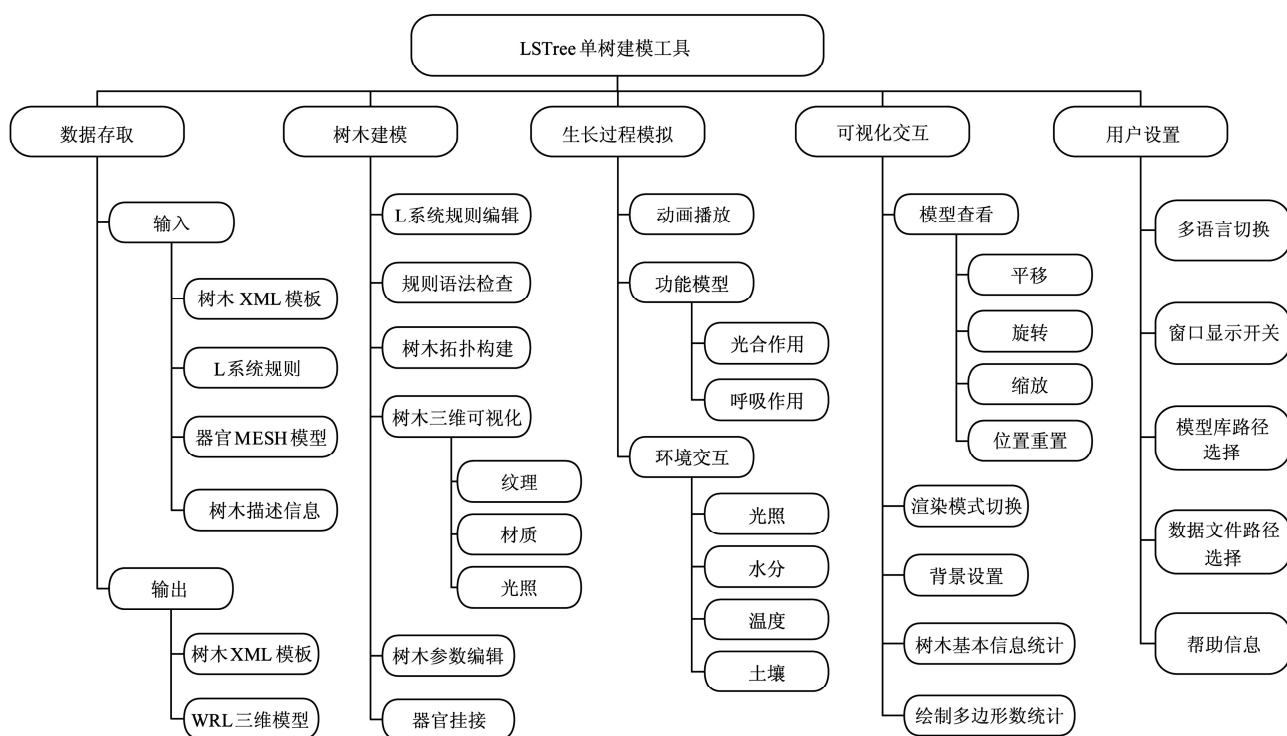


图 1 LSTree 系统功能结构

Fig.1 Functional structure of LSTree system

1) 数据存取

数据存取包括输入和输出两部分。输入采用 4 种方式, 分别为: 打开树木 XML 模板文件、输入 L-系统规则、导入 MESH 器官模型和添加树木参数描述性信息。输出方面采用 XML 语言的方式导出树木规则为模板, 也可以导出 VRML 的 WRL 三维模型格式, 进行网络发布。

2) 单树建模

树木建模部分需要提供的功能包括 L-系统规则编辑、规则语法检查、树木拓扑构建、树木三维可视化、树木参数编辑、器官挂接等, 其中树木三维可视化部分提供树木的纹理、材质、光照设置功能。规则语法检查由规则解析器实现, 提供错误信息反馈。

3) 生长过程模拟

根据一些植物 (龙眼) 的生理生态过程数学模型 (光合作用模型、呼吸作用模型、植物开花模型、水分吸收与运输模型、果实发育与产量模型), 现只考虑光照、水分、温度和土壤等环境因子, 模拟植物生理生态的发生、

发展过程。

根据植物形态结构知识本体和不同物候、不同季节、不同年龄的知识规则本体的描述和推理, 自动组合 L-系统规则, 继而生成植物的三维结构模型。生长过程的模拟可以通过动画的方式展示给用户。

4) 可视化交互

可视化交互部分提供的功能包括模型查看、渲染模式切换、背景设置、树木基本信息统计、绘制采用的多边形数统计等。用户可以通过鼠标和键盘实现模型的平移、旋转、缩放等浏览方式; 可以采用不同的天空地面纹理渲染三维可视区域背景; 以及查看树木的拓扑形态和几何形态统计数据。

2 系统体系结构与模块

3.1 系统体系结构

基于系统的实现机制和数据流, 可以将 LSTree 单树建模系统的总体结构划分为 4 个层次, 分别为: 用户接

口层、建模内核层、文件处理层、数据层。

1) 用户接口层包括图形绘制引擎、树形态参数控制器、树生长规则控制器等模块。它提供了系统与用户交互的可视化界面, 以及用户对树形态参数及生长规则的控制接口。

2) 建模内核层包括语法检查器、规则解析迭代器、树拓扑构建器等模块, 它负责对 L-系统规则的检查、解析、迭代和图形化解释。

3) 文件处理层主要负责对 XML 树模版文件的解析及创建、以及 VRML 三维模型的格式转换。

4) 数据层存储了树模板文件, 并依据国际克朗奎斯特植物分类系统, 利用树状结构进行模型组织与存储, 便于用户按照植物间亲缘关系快速定位与选择所需模型。

下节主要对几个核心模块进行介绍。

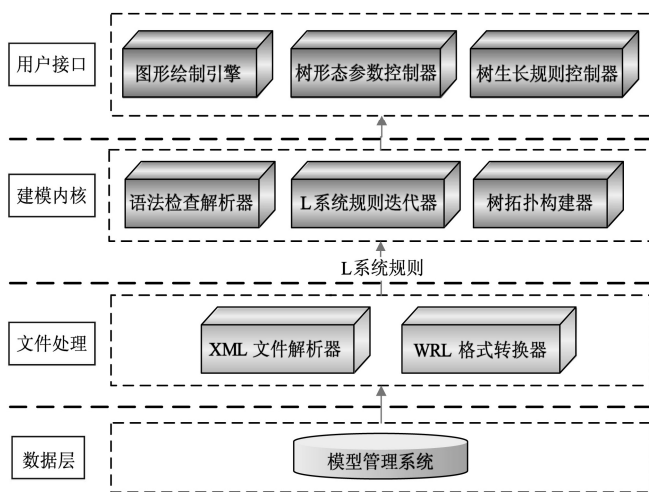


图2 LSTree 系统结构
Fig.2 System structure of LSTree

3.2 系统核心模块

1) 语法检查解析模块

该模块应该实现的功能在于: 读取模型的 L-系统规则信息, 解析其公理和产生式规则部分, 在解析的过程中对二者分别进行语法和符号判断, 提示如变量没有定义, 左右括弧不匹配等等语法错误, 如果检测通过, 则修改当前模型的检测标识变量为真, 否则为假。解析完成后, 形成规则公理链表、规则产生式数组等数据结构, 以供规则迭代模块使用。

2) 规则迭代模块

该模块的功能是读取由规则语法检查和解析模块处理后的公理字符串, 通过字符替换迭代来形成一个最终的链表。假定树木生长的生理周期(称之为迭代次数)个数为 N , 规则演化模块将自动地对原始公理字符串执行 N 次迭代替换操作, 每次操作中, 链表里的每个字符都将在产生式数组中查找匹配的生成式表达式, 并进行替换。最终形成字符串链表的自动演替。

3) 树木拓扑构建模块

该模块的功能在于: 遍历规则演化模块传递来的各个模型的最终字符串链表, 根据遍历到的节点中所存储的字符来判断当前所应该执行何种操作, 计算树模型的三

维点位信息, 进行存储和三维点构网。最终构建出一棵完整的树拓扑结构提供给绘制模块。

4) 绘制模块

该模块的功能在于处理 LSTree 系统中与绘制相关的操作, 包括天空地形、尺度标识、统计信息、树木的绘制、纹理、材质、光照、法线等。本模块基于树木拓扑构建模块生成的树木拓扑存储数据结构进行绘制, 并采用显示列表技术来加快浏览显示的速度。

3 面向单树建模的组合型 L-系统设计

3.1 组合型 L-系统的原理

L-系统本质上是基于字符串重写的并行系统。其核心概念是重写, 重写的基本思想是根据预先定义的重写规则不断地生成复合形状并用它来替代初始简单物体的某些部分以定义复杂物体。目前的 L-系统发展经历了包括上下文相关的 L-系统、随机 L-系统、参数 L-系统、环境敏感型 L-系统、开放式 L-系统等^[1,8]。本文提出由器官尺度上升单树尺度的 L-系统文法规则组合拼接方式, 利于树木形态结构和生长规则的重用。

组合型 L-系统可以实现从小尺度器官到大尺度整树的拼接过程, 这种拼接可以分为 2 种, 其一是规则的拼接, 即在规则中嵌套规则, 比如, 现已建好整树的规则 ‘Whole Tree’ 和叶簇的规则 ‘Cluster’, 即可在整树的规则中采用 % (Cluster) 符号将叶簇的规则挂接在相应的位置; 其二是植物器官的三维格网 (mesh) 的拼接。本系统采用 .msh 作为外部导入格网的文件格式, 在规则中可以采用 * (Mesh name) 的形式将该三维模型挂接在相应的位置。图 3 表现了龙眼单树从花絮、嫩叶到叶簇再到整树的拼接过程。

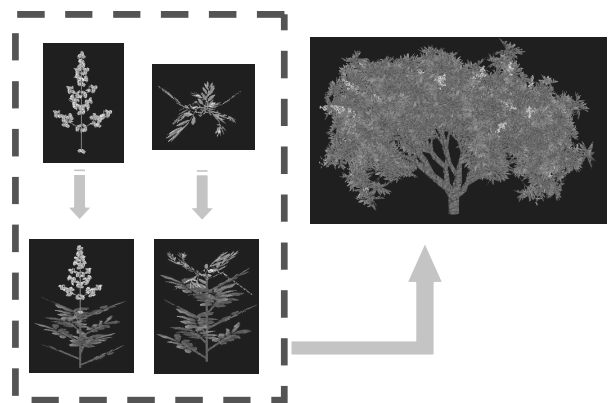


图3 器官拼接(以龙眼单树为例)
Fig.3 Organ splice (take single longan tree for example)

上文提到的挂接存在 2 种方式, 一种是规则的挂接, 另一种是 Mesh 的挂接, 因此分别设计两个类来存储这 2 种类型挂接的对象, 分别是 CGeometryRule 和 CGeometryMesh。其中 CGeometryRule 存储了该规则包含的枝条 (CBranch), 枝条又是由枝段 (CSegment) 组成。

3.2 单树数据结构设计

LSTree 系统中的一棵树是由许许多多的几何体组成的, 几何体可以是一片叶子, 也可以是一簇枝条, 甚至

也可以是整棵树的主干部分；它可以是由某种规则生成，也可以是由某个导入的 Mesh 生成。

上文提到的几何体有 2 种，一种是规则几何体 CGeometryRule，另一种是 Mesh 几何体 CGeometryMesh，二者都继承于几何体 CGeometry 类型，CGeometry 中存储了用于绘制所需要的点坐标、坐标索引、法线坐标、

纹理坐标、纹理坐标索引、纹理路径、纹理 ID、几何体名称类型等信息。规则几何体 (CGeometryRule) 中附加存储了其包含的枝条指针数组和其子几何体指针数组，它既有可能是树结构中的叶子节点也有可能是某个父亲节点；Mesh 几何体 (CGeometryMesh) 必然为叶子节点。图 4 为单树在计算机内存储的数据结构示意图。

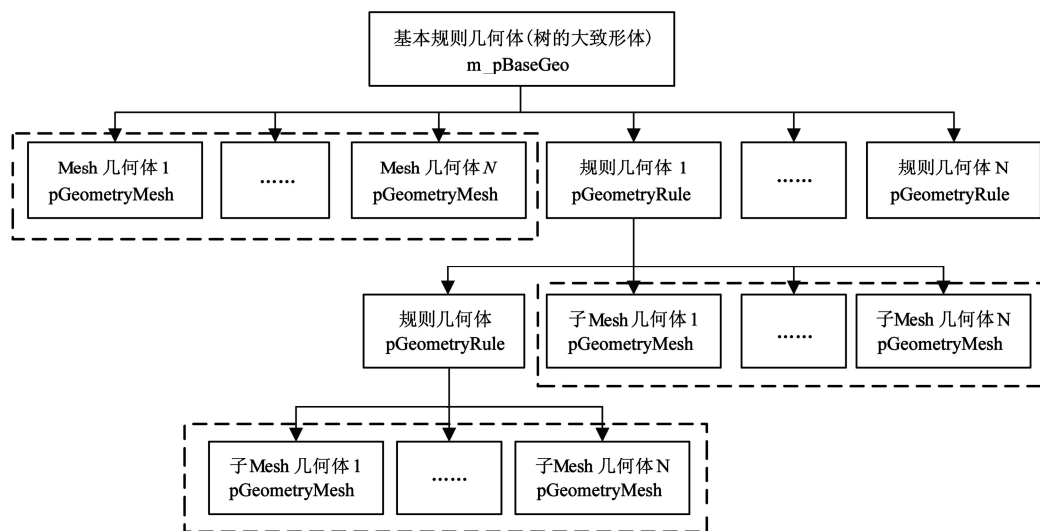


图 4 单树数据结构

Fig.4 The data structure of a tree individual

3.3 规则几何体数据结构设计

1) 图 5 为规则几何体 (CGeometryRule) 示例简化 L-系统规则，规则几何体常常用来表示单树的枝干，为了方便阐述问题，规则中简化了方向控制符号、半径控制符号等，仅列出枝段控制符号 'F' 及枝条起止符号 '[' 和 ']'。

[F [F [F] F] F F [F F F] [F] [F]]
① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩ ⑪

图 5 规则几何体示例规则

Fig.5 Rule geometry example

2) 规则中一层的中括号嵌套代表级别 1 的枝条，两层的嵌套则代表级别 2 的枝条，依次类推，每根枝条都由数个枝段 (Segment) 组成，父级枝条与子枝条之间采用指针相互链接索引，根据图 5 规则建立的规则几何体内部数据结构示意如图 6 所示。图 7 为该数据结构与最终模拟效果的对比。

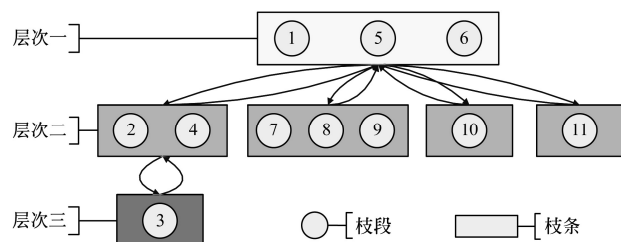


图 6 规则几何体树形数据结构

Fig.6 Tree structure of rule geometry

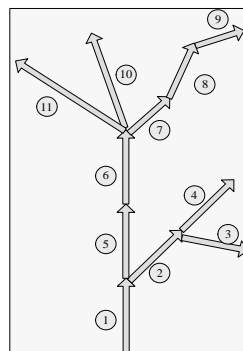


图 7 规则几何体数据结构与最终模拟效果对比

Fig.7 Compare the data structure with the final simulation result

4 系统实现

在 Visual Studio 2005 编译环境下，采用 OpenGL 图形标准、VRML 虚拟现实建模语言，开发形成了基于 L-系统的单树建模工具软件-LSTree。软件主界面如图 8。

1) 参数调整实时效果

界面右侧为参数编辑面板，可以通过拖动参数滚动条来控制树体特定的形态参数，这些参数包括枝条分枝角度、枝干增粗度、增长度、枝条水平角、枝干纹理及纹理坐标等。参数修改后的效果将实时地显示在视图区域上。图 9 为不同的分枝角度参数下单轴树干的形态。

2) 动态生长模拟

动态生长模拟采用生长周期步长作为植物生长的依据，每个模型有其总的生命周期和当前所处的生命周期两个参数，读取某一模型后，可选择切换至动画模式

(Animation Mode), 在动画模式下, 可点击播放 (Play) 按钮, 自动查看树种的动态生长过程, 当前生命周期等于总的生命周期时, 播放停止。点击暂停 (Pause) 按钮

时, 当前的生长暂停, 再次点击播放将从暂停位置开始继续生长。点击停止 (Stop) 按钮将停止播放。以竹柏为例, 动态生长过程模拟结果如图 10 所示。

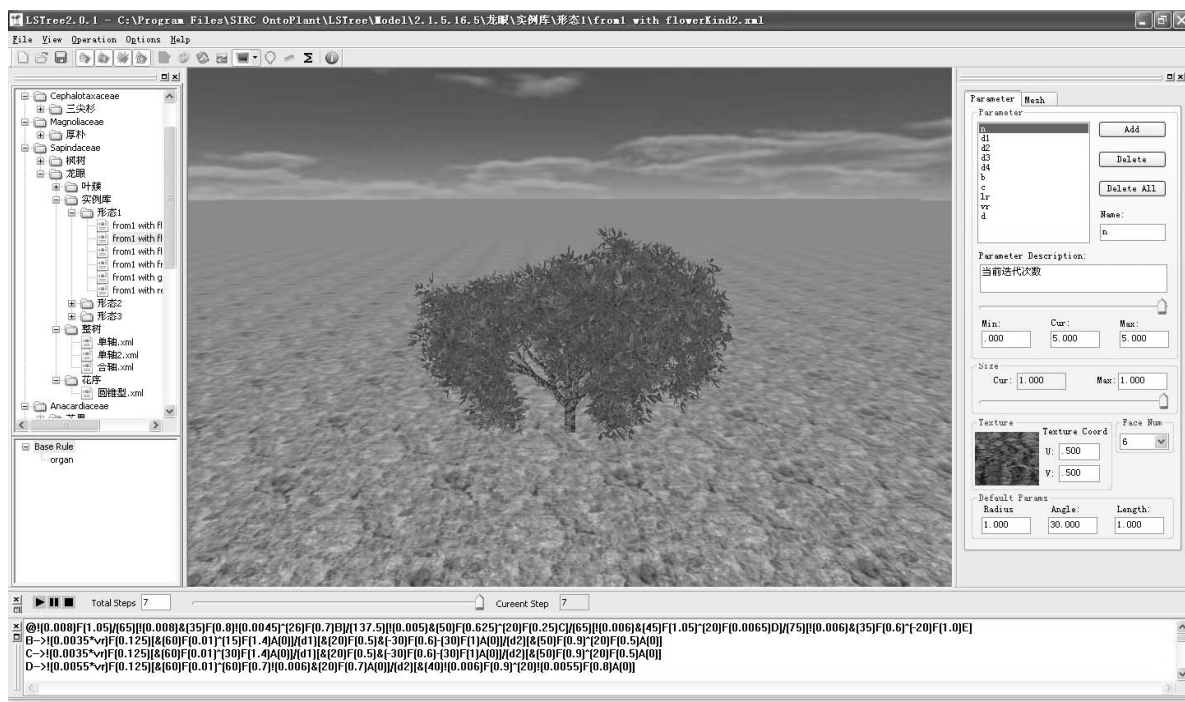
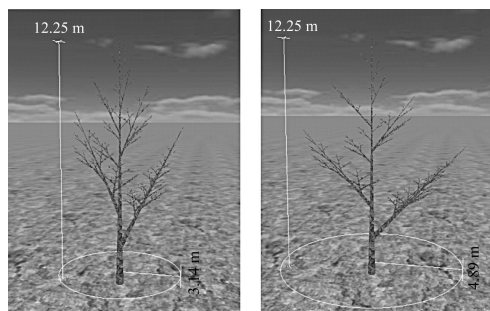


图 8 LSTree 单树建模工具软件 (V2.0) 的运行主界面

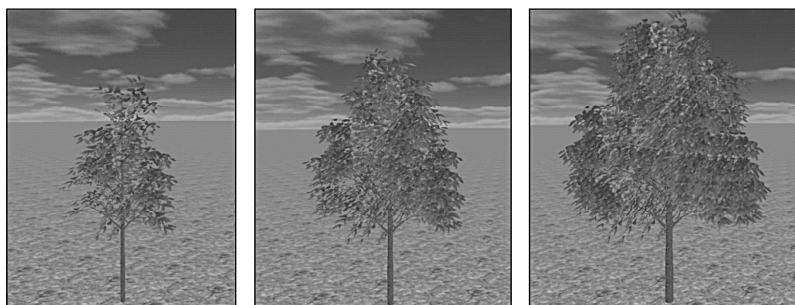
Fig.8 Main interface of tree individual modeling tool-LSTree (version2.0)



a. 分枝角度 30° b. 分枝角度 45°

图 9 不同分枝角度下的单轴树干形态

Fig.9 Stem pattern of monopodium trees with different branching angle



a. 4 次迭代结果

b. 6 次迭代结果

c. 8 次迭代结果

图 10 树木动态生长过程模拟 (以竹柏为例)

Fig.10 Animation of tree's growth process (take podocarpus nagi for example)

5 结 论

1) 本文以经典 L-系统理论为基础, 基于植物形态结构特征、生长发育的生理生态过程, 设计了单株植物建模工具软件的功能和体系结构, 在此基础上, 采用 OpenGL 图形标准, 开发形成基于 L-系统单树建模工具软件-LSTree。

2) 系统除了支持常用 L-系统文法规则外, 还支持带括号的随机的参数 L-系统, 有效地解决了传统 L-系统的缺陷, 使复杂树木的规则编写更加灵活, 视觉效果更真实。

3) 此外, 本文还提出了由器官尺度上升单树尺度的 L-系统文法规则组合拼接方式, 利于规则的重用, 降低了

提取 L-系统规则的难度。系统具有单树三维建模、生长过程模拟、树木与环境交互模拟、三维可视化交互等功能, 支持通用的三维模型格式, 可用于精细农业生产、以及植物学和生态学方面的教研、宣教等专业研究与应用。

[参 考 文 献]

- [1] 赵春江, 陆声链, 郭新宇, 等. 数字植物及其技术体系探讨[J]. 中国农业科学, 2010, 43(10): 2023—2030.
Zhao Chunjiang, Lu Shenglian, Guo Xinyu, et al. Exploration of Digital Plant and Its Technology System[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43(10): 2023—2030. (in Chinese with English abstract)
- [2] Prusinkiewicz P. Art and science for life: designing and

- growing virtual plants with L-Systems[J]. *Acta Horticulturae*, 2004, 630: 15—28.
- [3] 郭焱, 李保国. 虚拟植物的研究进展[J]. *科学通报*, 2001, 46(4): 273—280.
- [4] 李保国, 郭焱. 作物生长的模拟研究[J]. *科技导报*, 1997, 7: 11—12.
- [5] 孙静静, 唐丽玉, 姚林强, 等. 基于形态结构特征的马尾松几何建模研究[J]. *林业科学*, 2007, 43(4): 71—76.
Sun Jingjing, Tang Liyu, Yao Linqiang, et al. Research on pinus massoniana geometry modeling based on morphological characters[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2007, 43(4): 71—76. (in Chinese with English abstract)
- [6] 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(S1): 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(S1): 315—318. (in Chinese with English abstract)
- [7] UMR AMAP 2007. Botany and computational plant architecture[EB/OL]. <http://amap.cirad.fr>, 2010.
- [8] Hubert Nguyen. GPU Gems 3[M]. America: Addison-Wesley Professional, 2008.
- [9] Calgary 大学计算机科学系植物建模及可视化研究小组 [EB/OL]. <http://algorithmicbotany.org>, 2010.
- [10] Prusinkiewicz P, Anne-Gaëlle Rolland-Lagan. Modeling plant morphogenesis[J]. *Current Opinion in Plant Biology*, 2006, 9: 83—88.
- [11] Hu Baogang, De Reffye P, Zhao Xing, et al. GreenLab: towards a new methodology of plant structural-functional model-structural aspect[C]//Hu Baogang, Jaeger M. Plant growth modeling and applications, 2003 international symposium on plant growth modeling, simulation, visualization and their applications. Beijing: Tsinghua University Press, 2003: 21—35.
- [12] 郭焱, 李保国. 玉米冠层的数学描述与三维重建研究[J]. *应用生态学报*, 1999, 10(1): 39—41.
Guo Yan, Li Baoguo. Mathematical description and three-dimensional reconstruction of maize canopy[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1999, 10(1): 39—41. (in Chinese with English abstract)
- [13] Guo Yan, Ma Yuntao, Zhan Zhigang, et al. Parameter optimization and field validation of the functional-structural model GreenLab for Maize[J]. *Annals of botany*, 2006, 97(2): 217—230.
- [14] 吴瑞娇. 基于 L 系统的三维树木建模及生长过程仿真研究 [D]. 福州: 福州大学, 2009.
Wu Ruijiao. Research on Three-dimensional Tree Modeling and Growth Simulation Based on L-systems[D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2009. (in Chinese with English abstract)

Design and implementation of tree individual modeling tool based on compounded L-system

Lin Yuxin, Tang Liyu, Chen Chongcheng^{*}, Lin Minquan

(Key Lab Of Spatial Data Mining and Information Sharing of MOE, Spatial Information Research Center of Fujian, Fuzhou University, Fuzhou 350002, China)

Abstract: A tree geometric modeling method based on the theory of L-systems was proposed in this paper, which was faithful to the plant morphology and the physiological ecology of tree growth process. Under its guidance and restraints, the dual purposes of “to restore status truly” and “to simulate processes scientifically” were reached. A method to compound L-system rule from organ scale to the whole tree scale was proposed, which could make the plant morphological and growth rule be reused easily. The function and architecture of LSTree software was designed. It was developed with VC++, OpenGL Graphics standard, VRML (virtual reality modeling language) and Microsoft’s MSXML application programming interface. The system has many functions such as input and output of tree model, three-dimensional display of trees, simulation of the tree growth process, etc. It provides a better human-computer interaction and a flexible, scientific way to manage and organize the model. The system is useful in many fields such as education, propaganda and scientific research on botany and ecology, precision agriculture.

Key words: computer simulation, tree individual modeling, morphological topology, compounded L-system, LSTree