

doi: 10.3969/j.issn.1007-855X.2009.04.017

基于几何构造模型的植物根系生长三维建模

徐会杰^{1,2}, 张云伟¹, 蒋海波¹

(1. 昆明理工大学 现代农业工程学院, 云南 昆明 650224; 2 河南科技大学 经济与管理学院, 河南 洛阳 471003)

摘要: 根据几何构造模型能够准确表达植物根系形态结构的特点, 提出了一种植物根系三维建模方法. 该方法首先建立植物根系的拓扑结构和几何结构, 再通过“渲染”处理植物根系的三维几何结构. 结合这种方法, 在 Visual C++ 环境下开发了相应的植物根系三维建模软件. 给出的具体例子说明了该方法在植物根系三维建模中的可行性和有效性.

关键词: 虚拟植物; 植物根系; 几何模型

中图分类号: TP391.41 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-855X(2009)04-0078-04

Three-Dimensional Modeling for Plant Root Systems Growing Based on Geometrical Modeling

XU Hui-je^{1,2}, ZHANG Yun-wei¹, JIANG Hai-bo¹

(1. Faculty of Modern Agricultural Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650224, China;

2. College of Economics and Management, Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan 471003, China)

Abstract: According to the characteristics of geometrical modeling which can describe exactly the structural features of plant root systems, a method about modeling of plant root systems is proposed. In this method, topological and geometrical structures of plant root systems are firstly built. The 3D geometrical structure of plant root systems are then dealt with by “rendering”. Combined with this technique, corresponding modeling software for plant root systems is developed on the platform of Visual C++. Some examples are presented in this paper to prove the validity and the feasibility of the approach.

Key words: virtual plant; plant root system; geometrical modeling

0 引言

在虚拟植物的研究中, 重点主要集中在虚拟植物模型和植物模型的可视化研究方面^[1,2]. 通过建立植物生长的三维数学模型, 以可视化的方式定量而系统地描述植物生长发育、器官建成和产量形成等生理生态过程与环境之间相互作用的数量关系, 对农业科研和生产等领域具有重要的指导意义.

长期以来, 对植物三维数学模型的研究主要在地上部分. 根系是其薄弱环节^[1,3]. 由于植物根系的 3D 造型具有明显的分形特征, 常用 L 系统^[4,5]、分形^[6,7]、IFS 迭代函数系统^[8,9]和粒子系统^[10,11]的方法描述植物根系形态特征. 这类方法的优点是参数少, 数学形式优美; 缺点是造型呆板, 参数不直观, 造型对参数变化很敏感, 结果难以预测, 不易控制^[12]. 本文针对上述建模方法的不足和植物根系的不可预见性、随机性和复杂性等特点, 提出了一种基于几何构造模型的植物根系三维建模方法. 这种方法能够逼真地模拟出大多数植物根系的外形, 可以对植物根系的图形对象进行动态拾取, 交互式进行植物形态的三维布局设计.

收稿日期: 2008-10-13 基金项目: 云南省自然科学基金项目 (项目编号: 2005D0015M).

第一作者简介: 徐会杰 (1980~), 男, 在读硕士研究生. 主要研究方向: 计算机模拟仿真技术的应用.

E-mail: xhj004@gmail.com

1 植物根系形态建模和图形绘制思想

植物根系图形的绘制过程可大致分为两个阶段:构造和渲染^[13,14]。“构造”是指对植物的拓扑结构以及几何形态结构进行描述。拓扑结构是植物建模中的最基本结构,代表了植物不同器官和组织之间的物理连接,主要用于描述植物离散结构单元之间的连接关系和分布状况;几何形态结构描述了植物整体结构以及各器官的三维几何信息,如各器官的尺寸、形状以及角度等^[15]。“渲染”是指利用计算机图形学技术,如光照、材质、投影、消隐、计算场景色等处理植物三维几何结构,生成形象逼真的植物根系图形。

本文基于几何构造模型的植物根系三维建模的设计思路如图 1 所示。用户首先选择指定的植物根系几何构造模型参数文件(模型中已包含有植物根系的构造信息)。接着根系在用户控制下进行“生长”,当判断某一类型的根(依据植物根系生理学特性划分出的根系中的其中某一类型)达到分枝长度后,分枝出新的根节点,这一过程中可以对根节点的拓扑结构和几何结构属性进行设置;当达到植物整个根系的最大生理年龄时,拓扑过程结束。最后对整个植物根系进行渲染以获得理想的三维植物根系图形。

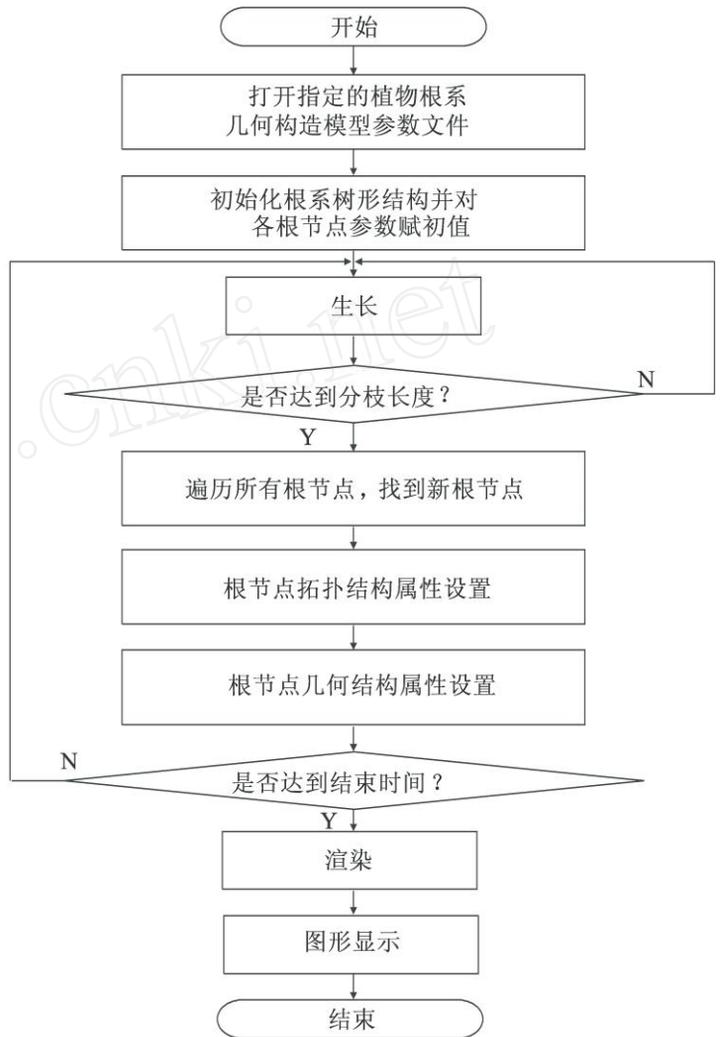


图 1 植物根系三维建模流程图

Fig.1 The flow chart of plant root system for three dimensional modelling

2 基于几何构造模型的植物根系生长三维建模

2.1 植物根系的拓扑结构和几何结构描述

在描述植物根系的拓扑结构时,通常使用图论上一个倒向放置的轴向树(Axial tree)来进行分析^[16]。它由根(Tree root)、主干(Main axis)及旁枝(Lateral segment)组成,各部分带有标号,并且遵循一定的顺序。一棵轴向树从根起始节点出发到每个终止节点均形成路径,在该路径中至少有一条后继边的节点称为内节点(Internode);终止边称为顶端(Apex);主干、旁枝依序分成 0 级、1 级、2 级等^[17]。如图 2 所示。

依照以上的拓扑结构模型,将植物根系设定为一组根轴,根轴由主根和无数个次级根轴组成,并具有一定的分根等级。每一级根的形成又遵循一个同样的方式:由主

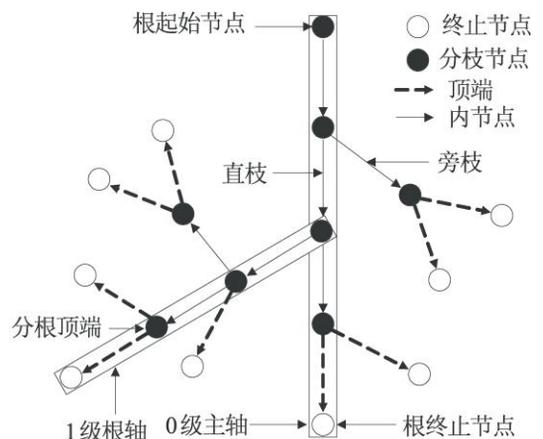


图 2 根系拓扑结构图

Fig.2 Topology of plant root system

根分枝出一级根,再由一级根分枝出二级根,一级级不断分枝衍生;植物根系在其形态的发生与发展过程中就是按照其基本相似的根系生长发育参数进行。

基于上述形态特征和生长特点,用以下参数对拓扑结构和几何结构进行描述:根类型数量、根类型、一次最大分根数目、首次分根长度、分根长度间隔、首次分根时间、分根时间间隔、分根与主根的夹角、是否规则拓扑、长度生长参数、直径生长参数、随机变量。

2.2 算法实现

2.2.1 算法涉及的数据结构

根据植物根系的拓扑结构结合 C++ 允许大量地使用指针来提高编程效率的特点,本文在数据结构上采用了链表描述的方法。

1)为了描述根系的拓扑结构以及根系中主根与分根间的关系,定义了 Root 链表,链表排序自上而下。每一类型的根与根之间通过链表建立关系,每个根具有自己的构型参数:首次分枝时间、首次分枝长度、分枝时间间隔、分枝长度间隔。同时定义了指向每一类型的根的指针,采用递归算法通过指针遍历所有的根节点。如图 3 所示,主根为 RootStart,它的子节点为 Root1, Root2, Root3……遍历过程如下:

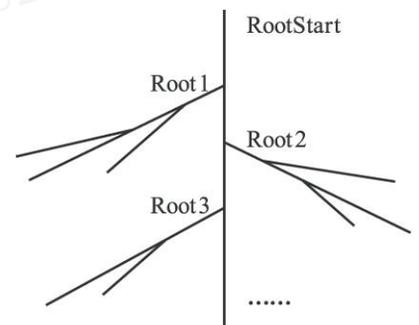


图 3 系统数据结构
Fig.3 Data structure

RootStart

Parent - >NULL, Children是 Root1, Root2, Root3……, LeftSib - >

NULL, RightSib - >NULL

Root1

Parent - >RootStart, Children是下一个, LeftSib - >NULL, RightSib - >Root2

Root2

Parent - >RootStart, Children是下一个, LeftSib - >Root1, RightSib - >Root3

……

2)为了描述每一类型的根的实体特征,定义了 Segment 链表。每一个 Segment 都有对应的参数:空间坐标、方向、长度、创建时间、空间偏移量。同样定义指向 Segment 的指针。

3)每一类型的根定义有指向其对应实体的指针,通过将上述 2 个链表建立联系,实现根与实体的关联。

2.2.2 基于拓扑结构的根轴生成算法

根据根系的图形特征,通常采用递归或者迭代的算法实现各级根轴的生成。本文在描述根系拓扑结构时采用了递归的算法思想。其主要算法如下:

Step 1. 设定植物根系生长发育的初始参数;

Step 2. 根据设定的初始参数值来初始化模型;

Step 3. 判断分枝长度间隔、分枝时间间隔和总的生长时间。如果总的生长时间到,则结束,否则 go to Step4;

Step 4. 绘制出新的分生根,即递归植物根系;

Step 5. go to Step3.

2.2.3 三维植物根系图形的绘制算法

在植物根系的三维图形绘制上,为了实现所绘制的三维图形具有跨平台性和良好的交互性,并将算法和算法涉及的数据结构思想贯穿其中,引入了 VC++ 6.0 环境下的 OpenGL 三维图形绘制。依据 Lynch 等^[18]提出的,由于根轴的根断面近似于圆截面,可以认为根轴是由无数个绕轴线的圆台的组合。绘制圆台采用梯形拼凑的方法,即一个梯形的边同另一个梯形的边相连接,如此重复围成一圈。如图 4 所示。其中,梯形的高度即为圆柱的长度,而当梯形的边很小时,围成多面体就非常接近圆

台了.其主要算法如下^[19]:

Step 1. 在下底圆周上取一点 P_1 , 令 $\theta = 0$;

Step 2. 在下底圆周上另取一点 P_2 , 它们构成的圆心角为 $\theta/20$;

Step 3. 在上底圆周上相应的位置上也取两点, 分别为 P_3, P_4 , 然后根据生长方向旋转得到新的四个点;

Step 4. 根据新的 4 个点为顶点画 1 个梯形, 接着改变 θ 角度, $\theta + \theta/20$, 再把 P_2 点的坐标赋给 P_1 ;

Step 5. 判断 $\theta = 2\pi$? 若是, 则结束; 否则 go to Step2

绘制的时候, 对每个绘制出的圆台加以 OpenGL 的渲染操作, 最后绘制出具有较强真实感的各级根轴.

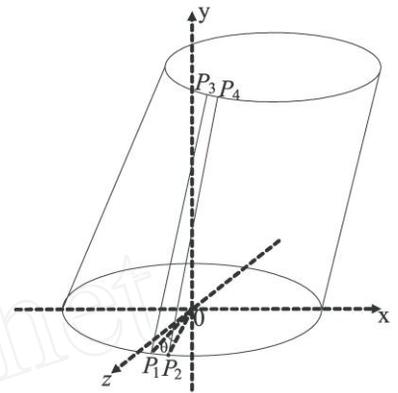


图4 用梯形拼凑成圆台

Fig.4 A truncated cone composed of a series of trapezoids

3 应用实例

依据上述算法思想和功能需求, 在 Visual C++ 6.0 环境下开发了对应的植物根系建模软件. 该软件定义了若干工具条以便于人机交互, 如对根系局部细节进行处理的工具条以及对根系整体形状进行渲染加工的工具条等. 为设置植物根系的基本属性, 设计了各级根系的属性设置对话框. 如图 5 所示为主根属性设置对话框, 在对话框中, 用户可以设置主根的生长参数信息和由主根分枝的一级侧根和二级侧根的构型参数信息. 通过选择不同的分枝方式和属性参数, 可以确定不同类型的植物根系形状.



图 5 根系属性设置对话框

Fig.5 Attribute dialog box of plant root system

作为一个应用实例, 本文以单轴散生类云南毛竹地下根系为研究对象. 如图 6 为模拟仿真出的单轴散生类云南毛竹地下根系的单色线框模型, 图 7 为三维实体模型.

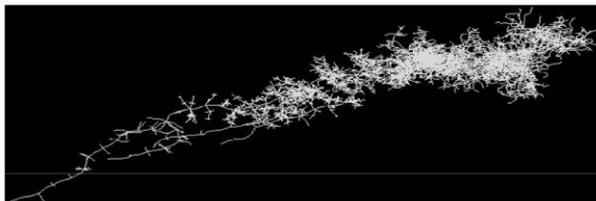


图6 竹子根系的单色线框模型

Fig.6 The self-colored wire frame model of the bamboo root

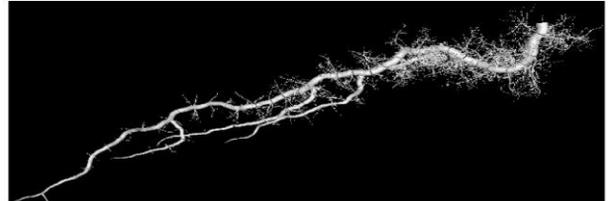


图7 竹子根系的三维实体模型

Fig.7 The three dimensional model of the the bamboo root

4 验证分析

为了验证采用该建模方法以及对应算法的有效性,按照以下两个方面作为参考指标:

1)模拟仿真出的三维实体模型与实际的根系在形态特征上是否相似.在实际试验中通过与实物在外形上的对比可以得出,仿真模型与实际竹子地下根系的形态特征非常相似.

2)模拟仿真出的三维实体模型的构型参数与实际的根系构型参数是否有较大的相关性.根据获取的竹子地下根系的实测数据和仿真数据,利用统计分析软件 SPSS进行相关性分析,结果显示,两者间的相关系数较高,均在 0.8 以上.表明模拟仿真具有一定的精度,同时也验证了所采用算法的有效性.

5 结论

在对植物根系三维数学模型的研究当中,本文依据几何构造模型技术,提出了一种植物根系生长的三维建模方法.实践证明该方法能够准确表达植物根系的形态特征,具有算法简单、效率高和实用性强的特点.在此方面的研究中,用户可以在开发的植物根系建模软件平台上,通过对某一类型植物根系的较少参数输入,获得植物根系不同生长时间的形态分布特征和构型参数,为相关方面的科研和生产提供必要的理论依据和技术支撑.

参考文献:

- [1] 马新明,杨娟.植物虚拟研究现状及展望[J]. Crop Research, 2003, 17(3): 148 - 151.
- [2] 丁伟龙.虚拟植物建模及其软件开发进展[J]. 模式识别与人工智能, 2005, 15(4): 435 - 442.
- [3] 郭炎,李保国.虚拟植物的研究进展[J]. 信息技术, 2001, 46(1): 1 - 5.
- [4] LINDENMAYER A. Mathematical Models for Cellular Interactions in Development[J]. Theoret Biol, 1968, 18: 280 - 315.
- [5] PRUSNIEWICZ PW, REMPHREY W R, Davidson CG, et al. Modelling the Architecture of Expanding Fraxinus Pennsylvanica Shoots Using L - systems[J]. Can J Bot, 1994, 72: 701 - 714.
- [6] MANDELBROT BB. The Fractal Geometry of Nature [M]. San Francisco: Freeman, 1982.
- [7] 常杰,陈刚,葛崔.植物形态结构定量研究的新方法——分形模拟[J]. 植物学通报, 1996, 13(2): 57 - 62.
- [8] BARNSELY M F. Fractals Everywhere[M]. Boston: Academic Press Professional, 1993. 10 - 152.
- [9] BARNSELY M F, Demko S G. Iterated Function Systems and the Global Construction of Fractals[J]. The Proceedings of the Royal Society, London Ser, 1985, A399: 243 - 275.
- [10] 孙霞,吴自勤,黄购.分形原理及其应用[M].北京:中国科学技术大学出版社, 2003.
- [11] 熊海桥,蒋立华,罗轶先,等.基于粒子系统的物理约束植物根生长建模[J]. 计算机应用, 2002, 22(7): 39 - 41.
- [12] 陈洁,刘弘.树木生长中树枝形态的 3D 建模[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(10): 2862 - 2869.
- [13] 陈彦云.高度复杂场景真实感绘制技术研究[D].北京:中国科学院软件研究所, 2000.
- [14] 丁维龙,程志君.基于构造模型的植物形态建模[J]. 工程图学学报, 2005, (3): 29 - 33.
- [15] 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[J]. 自动化学报, 2001, 27(6): 816 - 835.
- [16] 钟南,罗锡文.植物根系生长的三维可视化模拟[J]. 华中农业大学学报, 2005(5): 516 - 518.
- [17] 钟南.植物根系生长的三维可视化模拟[D].广州:华南农业大学, 2006.
- [18] JONATHAN P. Lynch, Kai L. Nielsen, Robert D. Davis. SmRoot: Modelling and visualization of root systems[J]. Plant and Soil, 1997, 19: 139 - 151.
- [19] 丁维龙.虚拟植物生长模型及其与智能系统集成研究[D].合肥:中国科技大学, 2004.