



中国劳动关系学院学术论丛

ZHONGGUO LAODONG GUANXI XUEYUAN XUESHU LUNCONG

虚拟作物 三维建模 与可视化



周淑秋

飞思数码产品研发中心

编著

监制



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

虚拟作物 三维建模 与可视化

周淑秋

飞思数码产品研发中心

编著

监制

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书基于三维建模与可视化技术,主要讲解了虚拟作物的三维建模和可视化的基本知识、作物器官的三维建模和可视化、作物动态三维建模与可视化、作物的内部三维建模方法,以及作物生长三维建模与可视化软件的设计与开发方法,结合玉米和黄瓜这两种主要作物给出了大量的算法实现过程实例。本书的主要研究对象,是如何利用计算机三维显示技术实现作物从外部到内部、从静态到动态生长的整体结构建模方法和实现技术。

全书内容覆盖面广而又具针对性,图示及程序实例丰富,可作为从事虚拟现实技术、计算机图形图像、虚拟作物研究的大中专院校的本科生、研究生,以及科研人员和计算机软件开发人员的参考用书。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

虚拟作物三维建模与可视化 / 周淑秋编著. —北京: 电子工业出版社, 2008.2

ISBN 978-7-121-05676-5

I. 虚… II. 周… III. 虚拟技术—应用—作物—生物模型—建立模型 IV. S126 TP391.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 198080 号

责任编辑: 宋兆武 何 况

印 刷: 北京机工印刷厂

装 订: 涿州市桃园装订有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 720×1000 1/16 印张: 10 字数: 176 千字

印 次: 2008 年 2 月第 1 次印刷

印 数: 2000 册 定价: 23.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010) 88258888。

反侵权盗版声明

电子工业出版社依法对本作品享有专有出版权。任何未经权利人书面许可，复制、销售或通过信息网络传播本作品的行为；歪曲、篡改、剽窃本作品的行为，均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人应承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。

为了维护市场秩序，保护权利人的合法权益，我社将依法查处和打击侵权盗版的单位和个人。欢迎社会各界人士积极举报侵权盗版行为，本社将奖励举报有功人员，并保证举报人的信息不被泄露。

举报电话：(010) 88254396；(010) 88258888

传 真：(010) 88254397

E-mail: dbqq@phei.com.cn

通信地址：北京市万寿路 173 信箱

电子工业出版社总编办公室

邮 编：100036

前 言

随着计算机技术的飞速发展,其应用领域也越来越广,三维建模和可视化技术也在各个方面得到了广泛的应用。虚拟作物,即应用计算机模拟作物在三维空间中的生长发育情况,是近 20 年来随着信息技术的发展而迅速崛起的研究领域,在农学、林学和生态学的应用上有着广阔的前景。其主要特征表现为以作物个体为研究中心,以作物的形态结构为研究重点,建立三维模型,以可视化的方式反映作物的生理生态规律。与传统的模型相比,虚拟作物模型在空间规律研究方面具有很大的优势,其可视化特征使的从事农学研究的学者能够非常直观地对农田、森林等复杂的生态系统进行研究,以发现用传统方法难以观察到的规律。

编写本书的初衷,是使广大读者能快速、全面地掌握作物三维建模和可视化的基本理论和方法,较全面地了解作物的根、茎、叶、花、果实的三维建模和可视化过程,虽然本书中的大部分实例是基于玉米和黄瓜的算法实现,但很多方法均可以推广到其他植物的研究上。

本书的研究内容得到了国家农业信息化工程技术中心郭新宇博士的大力支持,同时感谢邓旭阳、雷蕾、陈闯、陈学峰、袁琪等在程序开发、图片处理、数据采集和验证方面所做的工作。

由于编写时间仓促,以及作者水平有限,书中难免有不足和疏漏之处,恳请广大读者和同人指正,以期共同进步。

编著者

联系方式

咨询电话: (010) 68134545 88254160

电子邮件: support@fecit.com.cn

服务网址: <http://www.fecit.com.cn> <http://www.fecit.net>

通用网址: 计算机图书、飞思、飞思教育、飞思科技、FECIT

目 录

第 1 章 作物三维建模与可视化的基本知识	1
1.1 概述	1
1.1.1 引言	1
1.1.2 虚拟现实技术及虚拟植物	2
1.1.3 国内外虚拟植物的研究概况	3
1.1.4 小结	5
1.2 虚拟作物建模理论	5
1.2.1 植物生长建模的分类	6
1.2.2 主要的植物建模方法	7
1.2.3 各种植物建模方法的比较	10
1.2.4 小结	11
1.3 作物可视化技术	11
1.3.1 可视化技术的基本概念	11
1.3.2 图形显示的基础理论	12
1.3.3 植物特性的可视化处理	14
1.3.4 小结	15
第 2 章 作物器官的三维建模与可视化	16
2.1 作物叶片静态三维建模与可视化	16
2.1.1 Cardinal 样条插值	17
2.1.2 基于 Cardinal 样条插值模型的提出	18
2.1.3 基于三角面片的建模	19
2.1.4 建模实现	20
2.1.5 基于粒子系统的叶片纹理构造算法	21
2.1.6 小结	24
2.2 作物果实的几何构造算法	25
2.2.1 黄瓜果实形态模型的建立	26
2.2.2 玉米果实的构造算法	31
2.2.3 小结	34
2.3 花的几何构造算法	34
2.3.1 黄瓜花的构造	34
2.3.2 玉米雄穗的构造算法	36
2.3.3 小结	39

第3章 作物动态三维建模与可视化	40
3.1 作物叶片的动态三维建模	40
3.1.1 玉米叶片形态建成过程中主要形态变化特征	40
3.1.2 玉米叶片三维形态的数学描述	41
3.1.3 玉米叶片的虚拟生长	46
3.1.4 系统实现	47
3.1.5 小结	47
3.2 作物根系动态三维建模与可视化	48
3.2.1 玉米根系的结构、生长及分布	48
3.2.2 玉米根系动态生长的数学描述	49
3.2.3 基于粒子系统的构建	50
3.2.4 系统实现	52
3.2.5 小结	53
3.3 基于双尺度自动机作物生长建模与可视化	53
3.3.1 双尺度自动机模型的原理	54
3.3.2 基于双尺度自动机的玉米拓扑结构建模	57
3.3.3 基于双尺度自动机的黄瓜拓扑结构的生成	61
3.3.4 小结	64
第4章 作物内部三维建模方法	65
4.1 基于切片技术的作物内部三维重建的研究现状	65
4.1.1 国内外研究现状	65
4.1.2 国内已有的研究实例	66
4.1.3 国外已有的研究实例	67
4.1.4 各种理论算法的研究现状	68
4.1.5 小结	72
4.2 作物茎切片图像获取及图像处理	72
4.2.1 显微图像的获取	73
4.2.2 图像的预处理	73
4.2.3 轮廓提取	80
4.2.4 图像配准	86
4.2.5 小结	90
4.3 基于轮廓线的三维绘制	91
4.3.1 引言	91
4.3.2 轮廓插值方法	92
4.3.3 OpenGL 及特性	93
4.3.4 重建用到的数据结构及算法	95
4.3.5 实验结果	99
4.3.6 小结	100

4.4	基于体素的面绘制	101
4.4.1	引言	101
4.4.2	等值面的抽取	102
4.4.3	MT 算法	106
4.4.4	VTK 简介	107
4.4.5	借助 VTK 实现面绘制	108
4.4.6	小结	111
4.5	基于体素的直接体绘制	111
4.5.1	体绘制技术概述	111
4.5.2	常见的体绘制算法	113
4.5.3	光线投射算法 (图像空间序)	114
4.5.4	物体空间序的体绘制方法 (投影体绘制)	116
4.5.5	Ray Casting 的改进算法	117
4.5.6	借助 VTK 实现体绘制	118
4.5.7	小结	121
第 5 章	作物生长三维建模与可视化软件的设计与开发	123
5.1	面向对象思想作物生长可视化软件的开发技术	123
5.1.1	引言	123
5.1.2	软件的关键技术	124
5.1.3	软件的体系结构	125
5.1.4	小结	135
5.2	“黄瓜模拟可视化系统”软件的设计与实现	136
5.2.1	从软件工程的角度进行分析和设计	136
5.2.2	单个器官的可视化	138
5.2.3	植株的可视化	139
5.2.4	群体漫游与动态生长	143
5.2.5	小结	146
参考文献		147

第1章

作物三维建模与可视化的 基本知识

1.1 概述

1.1.1 引言

随着计算机技术的发展,信息化在农业生产中的应用越来越广泛,虚拟现实与农业科研生产相结合就形成了虚拟农业,其主要目的是解决如何把现实中异常复杂的农业信息以可视化的方式在计算机上实现,从而为农学科研工作者提供一种易操作、易控制,便于交互的平台来研究农学中的各种问题,如形态结构、动态变化等,并产生农学家感兴趣的数据以供科学研究使用。

20 世纪 90 年代初,图形学方向派生出虚拟现实和科学可视化两个新的研究领域,并逐渐成为计算机技术领域研究的热点。虚拟现实技术和可视化技术属于交叉学科,涉及计算机图形学、图像处理、计算机辅助设计、计算机视觉及相关的人工智能等多个领域。它改变了传统农学研究者的研究方法和手段,可以帮助人们更好地认识和理解植物生长过程中的基本规律和量化关系,对植物生长系统的动态行为和最终产量进行预测,为农学研究提供更加方便、高效的研究手段,在植物生长机理研究、栽培指导以及精确农业技术应用等方面产生了重要的影响。科学可视化技术是运用计算机图形学和图像处理技术,将复杂的科学现象和自然景观图形化,从而发现科学规律或直观地掌握复杂的概念。应用科学可视化技术

可以将农业科研中采集到的大量数据,转换为几何图形及图像信息并在计算机上显示,进行交互处理,使我们以直观生动的方式发现隐藏在数据中的科学规律。这两种技术相结合,为农学研究提供了更广阔的前景。

1.1.2 虚拟现实技术及虚拟植物

1. 虚拟现实技术

虚拟现实(Virtual Reality)是1989年由美国的J.Lanier最早提出的,又称为“临境”或“灵境”。在不同的应用领域,它所表示的含义略有不同,就其本质来说,它是一种高度逼真地模拟人在现实世界中视、听、动等行为的人机界面。它用计算机技术生成一个逼真的三维视觉、听觉、触觉或嗅觉一体化的虚拟感觉世界,用户可以从自己的视点出发,借助必要的设备,以自然的方式与虚拟环境中的对象进行交互作用、相互影响,从而产生身临其境的感受和体验。虚拟现实技术融合了计算机图形学、图像处理技术、多媒体技术、传感器技术、网络技术、仿真技术、人工智能技术等多种学科,自20世纪90年代初发展至今已广泛应用于科研、教育培训、工程设计、商业、军事、医学、影视等众多领域,被公认为是21世纪重要的发展学科以及影响人们生活的重要技术之一。

虚拟环境的建立,需要相应的软件和硬件的有效结合。系统主要是由实时计算机图像生成系统、立体图形显示系统、三维交互式跟踪系统、三维数据库系统和相应的应用软件构成。构建虚拟现实系统应具有以下几个特征。

(1) 沉浸性:虚拟现实技术根据人的视觉、听觉等生理特点,利用计算机图像生成的系统产生具有真实感的三维景象世界,参与者通过佩戴头盔显示器和数据手套等三维交互式跟踪系统将自己置身于虚拟环境中,产生视觉、听觉、触觉等真实的感官体验,犹如身临其境。

(2) 交互性:参与者可以利用计算机鼠标、键盘、头盔及数据手套等交互设备与虚拟环境中的对象进行交互操作和交流。参与者进行必要的操作,虚拟环境就会产生相应的响应。

(3) 多感知性:主要体现在参与者在虚拟环境中所具备的能力。参与者通过虚拟环境中的视觉、听觉、触觉、动觉的传感及反应装置获得视觉、听觉、触觉、动觉等多种感知能力。

(4) 自主性：它是指虚拟环境中的物质遵循客观规律的性能，系统中的物体可按照系统参与者的要求根据各自的模型和规则自主运动。可以看出，这些特性是单纯的计算机系统所不具备的。

虚拟现实技术主要涉及到3个研究领域：

- (1) 通过计算机图形方式建立实时的三维视觉效果；
- (2) 建立对虚拟世界的观察界面；
- (3) 使用虚拟现实技术加强在诸如科学计算技术等方面的应用。

2. 虚拟植物

虚拟植物是指利用虚拟现实技术在计算机中模拟生成三维空间中的植物^[4]，它是虚拟现实技术在农业应用中的一个方面。在虚拟植物的研究中，主要以植物的个体为研究中心，以植物的形态结构为研究重点，所建立的模型能以三维可视化的方式反映植物的形态结构规律，生成具有真实感的植株个体或群体。虚拟植物生长是以植物在三维空间中结构发育和生长过程为主要研究目标，进行计算机仿真。虚拟植物生长的模拟主要有两种形式：一种是单纯考虑视觉效果的植物生长模拟；另一种是结合植物的生态生理和结构特征体现植物学理论的植物生长模拟。前者主要应用在计算机动画、游戏软件、商业广告、计算机教学等方面，后者则主要用于农林业中植物的科学研究、生产过程模拟、产量优化模拟与预测等方面。

1.1.3 国内外虚拟植物的研究概况

1. 国外的研究概况

在20世纪60年代计算机发展的初期，植物学家 De Wit 对作物群体光合作用的模拟进行了研究。自此以后，许多国家的研究人员在作物生长的计算机模拟领域做了大量的工作，并得到了广泛的应用。进入80年代以后，随着计算机软硬件技术水平的提高，图形图像技术理论进一步成熟，应用计算机进行植物生长过程的建模与三维可视化研究得到了越来越多研究者的重视，并已成为计算机图形学中的经典问题。在虚拟植物形态结构的研究领域，国外起步早，并且提出了许多经典的理论算法，主要有L系统、分形方法和随机过程算法等。

目前在虚拟植物生长研究方面，国际上比较领先的系统性研究模型有：法国

农业发展国际合作研究中心 (CIRAD) 的 De Reffye 等人利用自动机模型 (又称为“参考轴技术”) 模拟植物生长的典型随机过程方法, 定量地模拟植物构造的动态发展。澳大利亚 CPAI 研究中心在 L 系统的基础上, 结合外部环境模型 (光照、病虫害等) 以及由三维数字化仪获取的三维植物的测量数据得到了虚拟植物模型, 该虚拟植物模型通过分析测量数据获得植物形态的发育规则来描述植物的生长过程, 不仅能模拟植物生长的表象, 还可以与植物的生理生态模型相结合, 模拟植物的一些内部生化过程, 如新陈代谢产物的移动等, 还可以通过不同的颜色来模拟病虫害对植物生长的影响。美国农学家建立的以生态生理模型为基础的 GOSSYM (Gossypium Smulation Model) 模型, 包括了棉花地上部分的生长发育和产量的形成、光合作用的积累和分配等一系列的机理性模拟。ChenSG 根据观测数据建立的杨树生长规则, 利用分形方法建立了杨树的虚拟模型, 并将虚拟的杨树群体投影到平面上, 对所产生的图形采用数值影像分析系统进行处理, 研究了杨树冠层的光传输规律。加拿大 Prusinkiewica 等人以 L 系统为植物形态结构的描述框架, 开发了 Vlab 虚拟植物系统, 该系统能实现不同类型植物的模拟。

从 20 世纪 80 年代起, 以专家系统为内容的人工智能方法在植物生长建模研究中得到了发展并获得了广泛的应用, 其中最著名的是美国农学家发展的 COMAX (Cotton Management Expert System) ——棉花生产管理专家系统, 该专家系统的建模方法是以农业专家的经验为基础, 通过知识库与决策推理系统, 来模拟农业专家进行推理、判断和决策的过程, 该建模方法有一定的局限性, 专家经验不容易获取且模型的有效性依赖于专家的所在地域, 当其与专家的经验冲突时模型不能得到正确的推断。

2. 国内的发展动态

我国的作物模拟直到 20 世纪 80 年代才开始起步, 但发展较快。郭焱等人利用三维数字技术对不同生育期的玉米冠层形态结构进行了精确的测定, 然后建立了玉米可视化模型, 但该模型是静态模型, 不能体现作物的动态生长过程。中科院自动化所中法联合实验室的赵星等人提出了虚拟植物生长的双尺度自动机模型来模拟植物生长过程中的形态变化, 通过模拟植株的生产量生产与基于植物拓扑结构的生物量分配, 以及器官生物量积累与器官形态的关系, 并行模拟植物结构—功能过程, 从而更精确地模拟植物的生长。熊海桥等人提出了基于粒子系统的物理约束植物根生长建模方法, 来模拟小麦根系动态生长过程中的形态变化。中

国农业大学研制开发的植物器官三维造型系统。潘学标等人于 1996 年开发了 COTGROW 棉花生产管理系统,融合气象、土壤等环境条件和栽培管理措施为一体的棉花生长发育动态解释性模型。张娟等人采用神经网络和遗传算法对温室番茄茎的生长进行建模。丁维龙提出的虚拟植物生长模型和农业专家系统中知识模型的集成框架,可以帮助推理及获得推理决策所需的数据,实现模型的预测结果和专家经验知识的有效协同融合,实现定性决策与定量决策推理的有机结合,降低系统决策的风险性。

可以看出,植物生长建模是在经历了从经验走向机理、从理论走向实用的发展过程,随着计算机性能的提高和相应数学模型的改进而不断进步的。但是由于人们对植物的认识有限,植物种类的多样性和复杂性决定了虚拟植物的开发过程将是一项长期而艰巨的任务。如何将虚拟植物更有效地为农业服务仍是未来研究发展的主要方向。

1.1.4 小结

作物三维建模和可视化技术是农业信息化的一个重要组成部分,可以为农业生产、科研、教学等提供具有较强真实感的虚拟作物软件环境。国外已有了一些成熟的研究成果,我国在相关领域的研究相对较晚,许多学者也正在积极开展相应的研究工作。

我们近几年主要集中研究的内容有:根据作物生长过程中的三维实测数据,研究基于实测数据的作物静态三维模型和可视化;根据作物的生长规律,研究作物生长的动态三维模型以及基于此模型的三维显示;根据作物切片图像三维重建作物的内部结构;作物生长过程的行为模拟等。

1.2 虚拟作物建模理论

计算机建模的目的是通过构造一个简单但能反映物理世界中真实对象的数学抽象描述模型,模拟被研究对象的发生、发展过程,为解释现象、揭示机理、发现规律和预测未来提供有用的工具。本节主要介绍植物三维建模的理论和常用的建模方法,以期对作物建模有一定的借鉴作用。

1.2.1 植物生长建模的分类

总结前人的研究成果, 可以从多个角度分析, 按照不同的方式将植物模型进行分类^[12]。

1. 根据植物体规模分类

根据植物体的规模, 可将植物生长模型分为微观模型与宏观模型。微观模型是从组织、细胞或分子的角度对植物机体进行分析研究, 宏观模型则是以植物整体或组成器官(如根、茎、叶、花、果等)为尺度建模。在宏观层次上可进一步分为植株个体模型与植被群体模型两种类型, 前者主要侧重于单株植物组成器官的细节描述, 是后者建模的基础。植株个体模型可进一步分为器官模型、根系模型与地表上植株体模型。本文主要研究宏观层次上的玉米个体生长模型。

2. 根据模型功能分类

按照模型完成的功能和模拟的过程, 可以将植物生长模型分为生长机(Growth Engine)模型和可视化(Visualization)模型。生长机模型是根据已知的植物体初始信息及环境因素计算出植物生长过程的各种参数或数据, 它是由形态发生(Morphogenetic)与生态生理(Eco-physiological)两个模型组成, 形态发生模型根据植物的形态信息可进一步分为拓扑结构(Topological)模型和几何结构(Geometrical)模型。拓扑结构模型是植物建模中最基本的模型, 主要用于描述植物离散结构单元之间的连接关系, 并可以通过抽象的数学语言反映出植物的生长阶段。几何结构模型指对植物整体或部分器官组成结构的三维信息描述。生态生理模型包括许多具体的生长机理模型, 如植物土壤、水肥、光合作用、养分生成与分配、呼吸蒸腾作用等。形态发生模型和生态生理模型的交互作用, 组成生长机模型, 能计算出植物在各个生长阶段的生长发育状况。可视化模型则是利用几何、光照、纹理等计算机图形学技术根据生长机模型计算而得到的数据, 以三维可视化的形式显示植物的生长过程, 主要表现如何实现形态发生模型下的玉米生长过程的可视化。

3. 根据建模方法分类

根据建模中因果信息的应用和植物建模方法, 植物的生长模型分为经验式(Empirical)模型与因果式(Causal)模型两大类。经验式模型是建立在实验数

据的基础上描述植物的统计规律,根据实验数据的分析方法建模,是一种自上而下的分析式模型;因果式模型用于解释植物的内在生长机理,合成已知或假设的机理建模,是自下而上的合成式模型。通常因果式作物生长模型包括了作物光合作用、养料生成与分配、器官生长等多个经验式子模型,它适用于验证假设、合成知识和加深理解复杂系统的内在规律。

4. 根据模型应用背景分类

根据植物建模的应用背景,植物的生长模型可分为以农林业应用为背景的模型和以非农林业应用为背景的模型。前者主要应用于农林业研究,后者旨在单纯绘制形象逼真的植物图形,主要用于娱乐业、商业广告、园林规划等。两者在建模原理与仿真结构的真实性要求方面有很大的差异:以农林业为背景的模型要求基于植物学知识的真实性,在植物的生态生理原理的基础上建模;后者追求视觉效果真实性,主要包括形态发生模型和可视化模型,基本不涉及植物的生态生理原理。

1.2.2 主要的植物建模方法

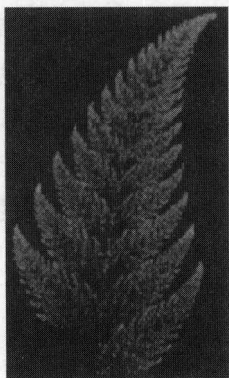
由于植物生长过程的影响因素多,以及随机性、非线性和突变性等多种因素的作用,如果想建立一个完全符合其生物特性的模型并不可行。任何一种植物生长模型都是建立在一定的假设条件下,根据特定的研究内容,对植物生长过程进行的简化数学处理。下面介绍一下植物建模中建立形态发生模型常用的算法。

1. 分形方法

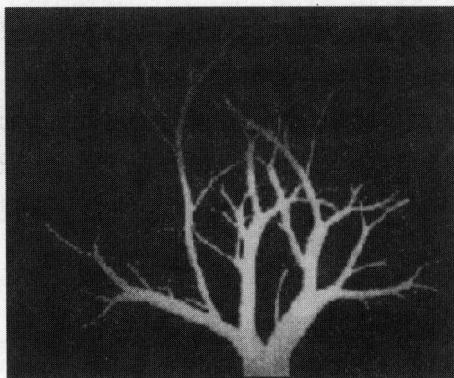
由于植物构造具有分形的自相似性,即同一株植物的各级分枝十分相似,而且同一分枝上不同部位叶片的形态也十分相似,因此分形方法根据植物形态结构的这种自相似性,将能体现自相似性的分形几何引入植物学中,用分形重构的方法来模拟植物的生长过程。具体的分形方法主要有迭代函数系统(IFS)、分枝矩阵、粒子系统、正规文法和A系统等。

IFS 是确定几何对象的全貌和局部,通过若干仿射变换,将整体形态变换到局部,并将这一过程迭代下去,直到生成满意的造型。IFS 可定义为由一组满足一定条件的映射函数及一组变化发生的概率组成,利用 IFS 生成的分形叶如图 1-1(a)所示。分枝矩阵模型是用矩阵来描述植物分枝节点的个数和类型,通过迭代

产生植物的分形结构,利用该方法生成的枝条结构如图 1-1(b)所示。粒子系统是以粒子单元的扩展来构造物体空间与时间上的发生形态,每个粒子在任意时刻都具有随机的形状、大小、颜色、运动方向和运动速度等属性,并随着时间的推移发生位置、形态的变化,属于随机模型。粒子系统法适合描述复杂的自然景物,如树木、森林、草原等模糊、随机的图像,而不适合表现个体植物的形态结构。正规文法是基于形式语言的并行重写算法。A 系统是通过设置植物分枝角度,按照一定的统计规律随机变化,以及植物分枝结构的一些特性来模拟植物的。



(a) 用 IFS 生成的分形叶



(b) 用分枝矩阵法形成的枝条结构

图 1-1 利用 IFS 和分枝矩阵法模拟出的植物

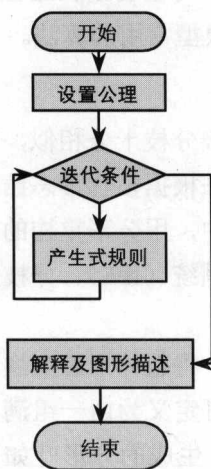


图 1-2 系统实现过程流程图

2. L 系统

1968 年,美国生物学家 Arstid Lindenmayer 根据细胞自动机设计了基于单个细胞的分裂、生长和死亡的 L 系统,其目的是以形式化模拟多细胞生物的生长,由此开创了植物生长建模的新篇章。Smith 等人于 1984 年将 L 系统引入计算机图形学,形成了现在广泛应用的模拟自然景物的 L 系统方法。L 系统也称为“字符串重写系统”,是将植物的生长过程进行经验式概括、抽象,构造成公理和产生式集,经过有限次迭代后生成字符发展序列,来表现植物的拓扑结构,并对产生的字符串进行几何解

释,就能生成非常复杂的分形图形。同时它可以解析、模拟生物体的自组织、自繁殖行为。理论上L系统可生成无限嵌套的结构,它的中心是并行重写系统。它的实现过程流程图如图1-2所示。L系统从一个初始图出发,根据重写规则集P改写初始元的一部分,如此迭代嵌套以生成一个字符发展序列。然后再对所生成的字符发展序列进行图形解释,如龟形算法,最终生成植物图形。

L系统适合描述分形现象,也适合描述植物的形态结构。简单L系统生成的植物图形过程如图1-3所示。之后,随着计算机性能的改善和研究方法的不断改进,又相继提出了上下文相关、随机、参数化、开放式、时变、微分等L系统,每一种L系统都有一定的适用范围,它们通过对相应的算法改进不断地完善植物的建模。



图1-3 简单L系统产生植物图形的步骤

3. 随机过程法

随机过程法主要包括参考轴技术、多尺度自动机及双尺度自动机等植物生长建模方法。基于有限自动机(Finite Automation)的参考轴技术(Reference Axis Technique),是把理论上的植物轴描述成参考轴,它包括植物从种子到开花可能经历的所有不同阶段,每个阶段对应一个给定的生理年龄,该轴是沿着逐步前进的方向变化的,在计算机程序中使用有限自动机的结构表示参考轴,自动机的状态与参考轴的不同阶段相联系,利用马尔代夫链理论和状态转换图方式描述植物的发育、生长、休眠、死亡等过程。在此基础上又产生了多尺度自动机和双尺度自动机模型,多尺度自动机能够以不同的时间尺度描述植物的拓扑结构,该建模方法数据输入简单、过程分析直观、物理意义明确。如图1-4所示的是基于参考轴技术生成的带有根系的植物群。

双尺度自动机是在自动机模型的基础上结合随机建模思想,根据植物的生理年龄来组合植物的生长参数,以更简便、通用的图形方式表示各种植物构造模型,能更有效地模拟真实植物的生长过程。它将植物表示成宏状态和微状态两种状态,