

北京林业大学研究生教学用书

“211工程”创新人才培养建设项目资助

植物可视化技术

原理与实现

黄心渊 杨刚·著

ZHIWU KESHIHUA JISHU
YUANLI YU SHIXIAN

中国环境科学出版社



图书在版编目 (CIP) 数据

植物可视化技术原理与实现/黄心渊, 杨刚著. —北京:
中国环境科学出版社, 2011.12
北京林业大学研究生教学用书
ISBN 978-7-5111-0738-1

I. ①植… II. ①黄… III. ①植物—可视化仿真—研
究生—教材 IV. ①TP391.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 207504 号

责任编辑 周 煜

责任校对 扣志红

封面设计 彭 杉

出版发行 中国环境科学出版社
(100062 北京东城区广渠门内大街 16 号)
网 址: <http://www.cesp.com.cn>
联系电话: 010-67112765 (总编室)
发行热线: 010-67125803, 010-67113405 (传真)

印 刷 北京中科印刷有限公司
经 销 各地新华书店
版 次 2012 年 3 月第 1 版
印 次 2012 年 3 月第 1 次印刷
开 本 787×1092 1/16
印 张 13 彩插 2
字 数 310 千字
定 价 38.00 元

【版权所有。未经许可请勿翻印、转载, 侵权必究】

如有缺页、破损、倒装等印装质量问题, 请寄回本社更换

摘要

植物可视化技术是指利用计算机图形学方法将植物的外观形态、生长过程或植被的景观效果真实感表现出来的技术。植物可视化技术不仅可以用于影视动画、虚拟现实等应用中对自然植物场景的真实感表现,而且可为林业研究和生产提供一个直观、可视的平台,使林业科学家能够更直观、更细致、更准确地掌握林业信息,从中发现规律并作出决策。随着数字林业建设的迫切要求以及图形技术的迅猛发展,植物可视化技术受到了越来越多的关注,获得了长足发展,但仍面临着许多关键问题有待解决。本书结合课题组近几年的研究成果,从各个模拟层次、多种研究角度,对植物可视化技术进行了系统而深入的探讨,并对一系列重要问题提出了有效的解决方案。

本书从空间尺度上将植物可视化模拟分为三个层次进行讨论:关注单株植物形态结构及生长过程模拟的单株层次;对一片林地进行快速可视化表现的林分层次;对包含多种植物群落的大规模植被场景进行景观效果表现的景观层次。每个层次都有自己特有的表现要求和技术难点,需要采用不同的技术策略。

在单株层次,本书以杨树为例重点探讨了植物 GreenLab 功能-结构模型的构建方法,完成了基于实测数据的、能够反映杨树外观形态与内部生理功能之间密切关系的杨树生长模型。此外,书中还讨论了基于 Xfrog 软件的树木建模与生长模拟技术,并提出一种忠于植物学的树木几何拓扑结构表示与简化技术。在林分层次,本书重点讨论了基于 OSG 图形引擎的林分场景的建模与快速绘制技术,其中涉及地形数据的载入与转换技术,以及模型优化、可见性剔除、层次细节模型等一系列加速绘制技术。在景观层次,书中在分析大规模植被景观模拟技术特点的基础上,重点探讨了基于 VUE 的大规模林地景观的可视化技术,给出了切实可行的技术方案。

植物可视化研究中面临的一个重要问题是如何更有效地将植物科学的研究成

果与可视化模拟进行有机耦合,使得可视化模拟结果不仅在一般视觉意义上是逼真的,而且还具有生物学真实性,即所模拟的植物符合实际的自然规律,由此能够切实地对林业科学的研究和生产起到支撑作用。针对这个问题,本书在单株层次模拟时以杨树为例,重点探讨了植物 GreenLab 功能-结构模型的构建,实现了符合杨树生长发育规律的虚拟杨树的构建,力图为虚拟植物在林业研究与林业生产中的实际应用开辟道路。

植物可视化技术具有重要应用价值和广阔的发展前景,但目前还没有一本系统介绍植物可视化技术的专业书籍。本书对国内外植物可视化的相关技术进行了系统总结,并重点对课题组近年来的研究工作进行了详细介绍,以期能对我国植物可视化方面的研究有所启发,为我国数字林业的建设与发展贡献力量。

前言

作为组成自然环境以及人类生产要素的最重要成分之一，植物历来是人类科学的重要研究对象，植物学及其相关学科都具有悠久的历史 and 系统的研究体系。而植物可视化研究——三维可视化技术与植物科学的有机结合——则是一个新兴的研究课题。人们认识到，植物的外观结构与其内部生理功能间有密切关系，为更好地研究植物的生长发育规律以及生物量、光合作用等植物学参数，离不开对植物三维空间结构的准确表达。同时，如果能用三维可视的方式将植物的外观结构真实感表达出来，将使人们能够更加直观、方便、准确地观察并分析植物信息，发现其中的规律并作出准确的判断。这必将对传统植物学、林学的研究产生巨大的影响，正是植物可视化研究的重要意义所在。另一方面，植物场景的真实感表现在影视动画、虚拟现实中也具有重要应用价值；而且，由于植物场景的高度复杂性，使得其真实感建模和绘制一直是计算机图形学中一项具有挑战性的问题。

自 20 世纪 80 年代以来，计算机图形学、植物学乃至生态学研究者们从植物的建模、绘制、生长模拟等不同的角度对植物可视化技术进行了大量研究，取得了许多成果。本书在对前人成果进行系统总结和分析的基础上，重点介绍了课题组近年来在植物可视化领域的研究成果。在介绍中，我们将植物可视化模拟从空间尺度上划分为单株、林分和景观三个层次。这三个层次由小到大、层层递进，基本包含了植物可视化技术所要研究解决的主要问题。每个层次都有着不同的模拟目标和技术特点，需要研究者采用不同的技术策略。

本书首先在第 1 章综述目前植物可视化方面的研究成果，从建模、绘制、生长模拟和器官等多个角度系统介绍了前人的技术方法，并讨论了各种方法的特点和优缺点。接下来，本书从单株、林分、景观三个层次进行工作介绍。其中第 2~4 章为单株层次，第 5 章、第 6 章分别为林分层次和景观层次。

在单株层次，人们关注于植物的形态结构甚至树皮等表面细节的逼真模拟，

并力图在计算机上真实模拟植物在三维空间的生长过程,实现植物生长的可视化仿真。生长仿真的研究促进了人们对植物生长发育过程的深入探索,有助于发现植物的生长发育规律,对实现虚拟栽培、生长预测都具有重要意义。

本书第2章介绍基于GreenLab模型的树木生长仿真技术。本章以杨树为例,详细介绍了树木生长数据的采集、加工方法;树木生理年龄的划分方法;模型参数的拟合与模型构建方法以及GreenLab树木模型的可视化技术等内容,完整实现了杨树的生长模型构建,对树木生长仿真研究以及GreenLab模型的应用和发展都具有重要意义。

本书第3章提出一种有效表达树木几何拓扑信息的三叉树结构方法。树木枝干间具有复杂的连接关系,如何能够有效而条理地表达树木的拓扑几何一直是树木建模中的重要问题。我们提出的三叉树结构与树木的拓扑结构形成自然的映射关系,能清晰地表达生长轴的生物学属性以及各级轴之间的相对关系。利用该表达方法,树木轴结构的简化具有可解析的植物学内涵,能够在简化过程中尽量保持原林冠包络形状、体积和内部生物量的空间分布,非常有利于建模及生物计算。本章将此三叉树数据结构应用于树木层次化细节(levels of detail, LOD)模型的构建,并基于图形硬件实现了模型的快速构造与显示,取得了良好的实验效果。三叉树结构方法在模型简化、显示、网络传输和生物计算方面都具有潜在的应用价值。

本书第4章介绍基于Xfrog的树木建模与生长模拟技术。目前出现了多种植物模拟软件或工具,而Xfrog是其中最为出色的一款。与GreenLab模型不同,Xfrog采用的树木建模与生长模拟技术更偏重于图形可视的表现,非常便于实现影视动画及虚拟现实中对植物的可视化表现。本章首先提出了植物模拟软件的评价标准,指出在评价标准下,Xfrog是目前诸多植物模拟软件中综合能力最强的模拟工具;之后介绍了Xfrog中树木建模及生长仿真的技术方法;并在实验结果中给出了我们实现的4种典型树木的Xfrog生长仿真结果。

单株层次讨论的是针对单株树木的虚拟技术,但在林业生产和研究中,主要面对的是以林分或小班为单位的成片树林。这片树林中的树木组成较为固定,林层、林相、林龄等因子大体相似。一些植物可视化技术着重对林分层次的树林场景进行整体可视化,便于林业研究人员或生产决策人员直接观察到整片林子的生长形势、

生长特征,甚至进行林间漫游。如果能与林分生长模型结合,还可以直观展现林分的生长变化趋势。这种直观可视的形式无疑会为林业生产和研究起到良好的辅助作用。与关注细节表现的单株木虚拟技术不同,林分层次可视化的研究重点在于如何快速而有效地表达大量树木。

本书第 5 章首先分析并比较了目前国际上几种著名的林地可视化系统,然后详细介绍了课题组开发的基于开源图形引擎 OSG 的林分可视化系统。该系统可以根据所提供的地形数据和林木种植数据快速生成林地场景,完成上万棵树木的林地场景的实时显示,并提供了用户在林间交互式漫游的功能。在本章介绍中,我们详细讨论了地形数据的载入与转换技术,以及模型优化、可见性剔除、渲染状态重排、层次细节模型等一系列加速绘制策略;还讨论了林分在四季和雨雪天气等不同环境条件下的效果模拟技术。

相比林分层次,景观层次所包含的自然效果更为丰富和复杂。植物可视化技术在景观层次上重在宏观表现一个较大地域范围内不同林业生态群落的分布状态及其三维景观效果,这对于从宏观上把握一个地区的林业生态资源分布及其发展规划具有非常重要的辅助作用。随着植物景观表现在林业及电影、游戏等娱乐业的广泛应用,一些场景绘制软件提供了专用于大规模植物场景绘制的模块。比较著名的如 VUE。

本书第 6 章在科学分析植被景观可视化的技术特点的基础上,详细讨论了基于 VUE 的大规模林地景观可视化技术。其中包括其景观建模技术,重要绘制参数的设置方法和关键绘制技术的分析。课题组采用 VUE 对八达岭林场大规模林区景观进行模拟,取得了非常逼真的表现效果,可以很好地满足林业以及影视、游戏等行业对植物景观的表现要求。

植物可视化技术发展至今,已能逼真地模拟单株林木的外观形态,实现较大规模林地场景的实时展示,乃至快速绘制出具有一定真实感的大规模林业生态景观。一些技术成果已应用于林业信息的可视化展示并辅助用于林地生产经营的决策;此外还成功应用于动画、电影、游戏中的植物场景表现。然而,植物可视化技术对林业生产乃至人类生活的影响才刚刚开始,随着一系列关键技术问题的解决以及林业生产对数字化、信息化愈来愈强的要求,植物可视化技术必将在未来的林业

发展中产生深远影响。

需要说明的是，本项目研究受国家“948计划”项目“数字林业中树木动态可视化关键技术引进”和国家“863计划”项目“基于植物学原理的虚拟毛白杨模型研究与实现”（编号：2006AA10Z232）资助。在项目的设立和研究过程中，得到了相关领域专家的大力支持。作为本项目承担单位的北京林业大学，在林业研究方面有丰富的技术资源，为本项目的研究提供了很好的智力支持，并为杨树幼苗的栽培实验提供了温室等实验条件。另一方面，在项目研究过程中，中国科学院自动化研究所的 GreenLab 研究小组与本课题组建立了深入的合作关系，为本项目在 GreenLab 模型的研究方面提供了宝贵的指导和交流机会。我们在此一并表示衷心的感谢。

目 录

第 1 章 综 述	1
1.1 植物可视化技术研究的重要意义	1
1.2 植物可视化技术介绍	2
1.3 树木的几何建模技术	3
1.4 树木的绘制	12
1.5 树木的生长模拟技术	20
第 2 章 基于 GreenLab 模型的树木生长可视化模拟技术	26
2.1 GreenLab 模型概述	26
2.2 基于 GreenLab 模型的树木模拟方法流程	36
2.3 田间试验	37
2.4 树木外观形态及生物量参数的测量	42
2.5 模型参数的拟合与模型构建	50
2.6 基于 GreenLab 模型的树木可视化模拟	68
2.7 其他基于 GreenLab 模型的植物模拟实例	78
2.8 总结	82
第 3 章 忠于植物学原理的树木几何拓扑结构表示与简化	83
3.1 树木几何简化的相关研究	83
3.2 忠于植物学的树木轴结构简化	84
3.3 基于 GPU 的树木加速绘制技术	93
3.4 基于三叉树结构 LOD 模型的林分快速绘制	97
3.5 总结	102
第 4 章 植物建模软件评估及基于 Xfrog 的植物建模与生长模拟技术	103
4.1 植物建模软件的评价指标与评价方法	103
4.2 5 种植物建模软件的评价	108
4.3 基于 Xfrog 的植物建模及植物生长模拟的研究与实现	109
4.4 总结	116

第 5 章 林分场景可视化模拟技术	117
5.1 林分可视化模拟需要表现的林业指标	117
5.2 林分可视化技术研究路线	121
5.3 多种林分可视化平台及分析	124
5.4 基于 OpenSceneGraph 的林分可视化系统开发	133
5.5 总结	161
5.6 附录	161
第 6 章 大规模林地景观的可视化模拟技术	170
6.1 概述	170
6.2 大规模林地景观可视化模拟的技术难点	171
6.3 基于 Vue 的大规模林地景观可视化技术	177
参考文献	186
后 记	197

第1章

综 述

1.1 植物可视化技术研究的重要意义

以图形的方式观察和认识客观事物，是人类最便捷的认知方式。近年来，真实感计算机图形显示技术和硬件技术的快速发展推动了可视化技术的不断完善和成熟，为人们描述现实中的三维世界提供了很大的方便和可能性。

植被资源作为地球表面的再生性资源，受到林业专家和学者们的广泛关注，并为了解决森林经营与管理方面的问题对森林景观可视化进行了大量研究工作。这些研究工作一方面追求直观地反映林分的空间格局、林地利用状况，另一方面追求动态模拟林分生长过程的变化。这样，可以更详细、更准确、更直观明了地反映林分信息，以便科学地评价森林经营效果，提高森林集约程度，充分发挥森林的效益，提高林业经济效益。另外，虚拟植物在计算机动画、电影制作、建筑设计、虚拟现实、计算机辅助教学、农林业和植物生态等方面都有重要的应用。例如：在人工生命领域，生物学家希望借助虚拟植物更方便地研究植物的生长规律；在建筑环境的整体规划、园林的景物布局设计、虚拟环境中的自然景物生成以及艺术造型等领域也依赖于有效的虚拟植物的表达。特别是将虚拟植物应用于农林业研究更具有重要意义，如在虚拟环境系统中进行虚拟实验，可部分替代在现实世界中难以进行或费时、费力、昂贵的实验；虚拟土壤养分和水分的时空模拟，可精确指导农业应用技术研究等。

从20世纪70年代末开始，随着计算机软硬件及可视化技术的发展，研究人员提出了多种植物可视化的理论和方法，为植物可视化模拟开辟了广阔的道路。目前，对植物可视化的研究已成为农林业及计算机图形学中的一个研究热点。研究算法主要有两类方向。第一类是对植物外观形态进行模拟，其结果注重形态的逼真性，不考虑大量的植物学知识，不遵循植物学中的理论。该方向研究旨在自然景观的再现，其主要应用领域有：（1）计算机辅助设计：用于园林及城市规划和生活区设计等。（2）教育：用于制作数字图书馆，植物生长模拟教育软件，让用户对人们赖以生存的植物有更加形象的了解和认识。（3）商业：用于网上销售观赏植物等商务方面，广告的创意制作等。（4）娱乐：用于三维动画场景的制作，电子游戏中虚拟场景的生成，影视特效的制作等。第二类是对植物的真实生长过程

的模拟研究，其结果必须严格遵循植物学理论，该方向研究旨在植物生长过程的研究，可应用于作物产量预测、土地生产力评价、资源环境分析、作物栽培指导、作物生长机理的研究以及精确植物技术应用等方面。

本章首先对植物可视化模拟方面的研究工作进行一个系统的总结介绍，然后按照模拟的主要方式分成建模和绘制两大类分别进行详细的介绍，最后对植物生长模拟进行概述。

1.2 植物可视化技术介绍

植物可视化模拟一直是个难点问题，这主要是因为以下几个原因：（1）植物的几何结构非常复杂，使得植物三维数据的获取、几何建模及真实感绘制都有很大困难。（2）植物不但具有复杂的几何结构，而且具有丰富的可视化细节，例如树皮表面的凹凸不平、树叶的半透明、植物体上的绒毛、复杂的阴影效果等，这使得真实感表现树木并非易事。（3）植物的生长模拟非常困难。植物的生长过程非常复杂，它与外界环境和内部生理生态活动都有着复杂的联系。构造一个能够较为真实地反映植物生长过程的模型非常困难。目前人们已经做了很多尝试，但距离真实模拟植物生长还有相当的距离。植物生长的可视化，首先需要模拟植物的生长过程，然后应用计算机图形技术将不同生长阶段的植物形态可视化出来。由此，植物生长模拟的任务可分为两类模型的构建过程：生长机模型和可视化模型（胡包钢，2001）。植物生长模拟过程如图 1-1 所示。

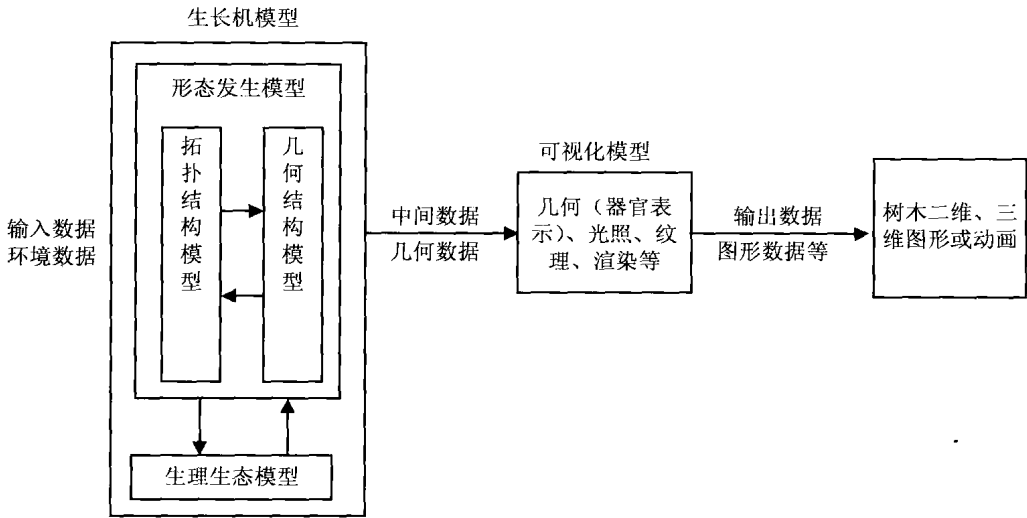


图 1-1 植物生长模拟过程图（胡包钢，2001）

生长机模型是根据已知的树木初始信息及环境因素计算出树木生长发育过程的各种参数或数据，从而模拟出植物在各个阶段的生长发育状况。该模型可以理解为是由形态发生（morphogenetic）与生态生理（ecophysiological）两个模型组成。形态发生模型提供树木的形态信息。它可以进一步分解为拓扑（topological）结构模型和几何（geometrical）结

构模型。拓扑结构模型是树木建模中的最基本模型，主要用于描述树木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树木的生长阶段。几何结构模型指对树木整体或部分器官组成结构的三维信息描述。生理生态模型包括许多具体的生长机模型，如树木土壤、水肥、光合作用、养分生成与分配、呼吸蒸腾作用等。形态发生模型和生理生态模型的交互作用，组成生长机模型，能计算出树木在各个生长阶段的生长发育状况。

可视化模型是利用计算机图形学技术，将树木的外观形态直观地显示出来，目前已成为农林业及计算机图形学中的一个研究热点。但由于树木的几何复杂性，也给研究工作带来了很大困难，人们在植物可视化方面进行了大量的研究，并取得了一定的成果。研究主要集中在建模、绘制和生长模拟三个方面，下面我们将从这三个方面对树木可视化模拟的相关工作进行一个系统介绍。

1.3 树木的几何建模技术

建立具有真实感的树木几何结构模型，是实现树木真实感绘制的前提。人们对树木的建模进行了很多研究工作，按照其建模的思想以及数据获取渠道的不同，我们将其分成 6 类来分别介绍（L-系统、分形、基于图像、参数化建模、过程建模等）。

1.3.1 L-系统

L-系统是 1968 年由理论生物学家 Lindenmayer 提出的用以描述植物的方法，它又称为正规文法系统，它的功能是用形式语言的方法来描述植物形态的发生和生长过程（Lindenmayer, 1968）。L-系统的本质是一个重写系统，通过对植物生长过程的经验式概括和抽象，构造公理（axiom，可以理解为初始状态）与产生式集合（a set of productions，可以理解为描述规则），生成字符发展序列（developmental sequences of words），从而生成非常复杂的图形。

早期的 L-系统简称确定性 L（DOL）系统，所谓确定性是指上下文无关，对任一个起始状态，按照描述规则都有唯一的终止状态相对应。通过加上几何形态信息，诸如线段的长度和线段的转角等，DOL 系统利用“乌龟行走式解释算法”可模拟植物图形。

图 1-2 是一个利用 L-系统模拟单枝灌木的例子，灌木的 L-系统的原表达式为 $L = \langle G, W, P \rangle$ ，其中 G 是字符集，这里 $G = \{F, +, -, [,]\}$ ； W 是起始生成元，用以确定字符串的初始状态，图中 $W = F$ ； P 为该类植物的生成规则集，图（a）中 $P = F \rightarrow F[+F]F[-F][F]$ ，图（b）中 $P = F \rightarrow F[+F]F[-F][F]$ ，图（c）中 $P = F \rightarrow FF[-F+FF+F][+F-F-F]$ 。其中 F 、 $+$ 、 $-$ 等字符代表的命令如下：

- 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。

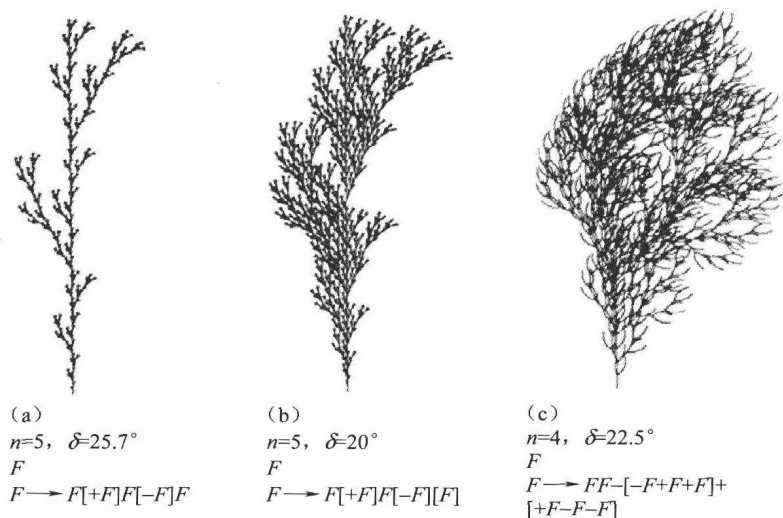


图 1-2 用 L-系统生成的单枝灌木 (Prusinkiewicz, 1990)

由于植物生长受环境、营养等因素的影响, 生长过程存在一定的不确定性, 于是发展了随机 L-系统。在该系统中, 每个起始状态都有多个描述规则, 为每个描述规则设定随机概率, 然后产生一个随机数来选择一个描述规则, 生成不同的终止状态, 从而克服了确定性 L-系统只能生成规则图形的局限, 可构造随机的植物拓扑结构。

Lindenmayer 曾将植物单元间的信息传输分为两种形式: 胞后代 (cellular descent) 信息与交互作用 (interaction) 信息。前者体现了子代单元是继承了父代单元, 或植物内因 (endogenous) 的发展现象。应用上下文无关 L-系统可以实现胞后代信息传输功能。而上下文相关 (context sensitive) L-系统的提出主要是用于表现植物生长过程中的外因 (exogenous) 发展特征: 植物器官单元的发育与发生与其相邻器官状态是相关的。

DIL 系统是包括单边的上下文相关系统。当采用左相关语法时, 该系统可以模拟植物从根向茎、叶的信息传输, 反之则相反。但上下文相关的 L-系统在表现与环境交互方面是有缺陷的, 因为上下文相关功能只能提供局部的敏感性。

Mech 与 Prusinkiewicz 发展了“开放式 (open) L-系统” (Mech, 1996)。该系统在形式化公理与产生式中引入了交流单元 (communication modules), 用于传送、调整“环境-植物”的交互信息, 以实现植物与环境并发过程的模拟研究。他们给出的典型的应用实例之一是植物根系的发展过程模拟。除了给定根系模型之外, 还给出了土壤中水含量的模型。该研究从原理上表现了植物与局部环境的动态耦合过程, 即根系的吸水效应改变了周围的土壤水分含量, 而水分含量分布的变化又影响了根系的发展方向。

为了模拟植物的连续生长过程及能够进一步应用微分方程表示植物的连续变化过程, Prusinkiewicz 等提出了时变 L-系统 (Prusinkiewicz, 1990)。为了能够进一步应用微分方程表示植物的连续变化过程, Prusinkiewicz 等又提出了微分 L-系统 (d L-system) (Prusinkiewicz, 1993), 在原 L-系统中引入连续的时间机制, 制作出植物生长的动画。近年来 Karwowski 等又提出了 L+C 语言 (Karwowski, 2003), 该语言将 L-系统的基本特征

与通用编程语言结合起来。

在国内,也有一些学者对 L-系统进行了探讨。李云峰等提出了 Easy L-系统方法(李云峰, 2006),该方法结合了 L-系统和基于图像建模方法的优点。其基本思想是对植物主干的分枝仍采用传统 L-系统建模,细节部分则采用植物器官网格面进行建模。系统利用 L-系统对植物主干建模表达能力强的优点,改进了单一采用 L-系统进行植物建模时,时间复杂度比较高以及对生成的植物外观可控性差的缺点。

确定性 L-系统和各种功能扩展的 L-系统应用广泛,功能强大,描述具有严格分形结构的物体非常精练,已经较广泛地在植物组织结构层次上用于植物建模定义。但在模拟植物生长方面仍有一定的局限性,主要是因为其高度抽象性,在形式语言描述与植物的生理生态参数之间没有建立直观的联系,应用起来存在很多的不便。

1.3.2 分形方法

1973 年,法国数学家 Benoit B. Mandelbrot 创立了分形几何学,分形是一门以非规则几何形态为研究对象的几何学,用来描述那些不规则且欧氏几何又无法描述的几何现象和物体(齐东旭, 1994)。它最大的特征是生成的图形具有结构自相似性,即任选一局部将它放大,这时原来看上去光滑的局部又会呈现与原图一样的复杂形状。植物虽然结构复杂,但同一植株的所有分枝都具有相似的形态结构,因此许多研究人员考虑采用具有“自相似描述特征”的分形函数来描述树木的结构,分形在植物模拟方面得到非常广泛的应用。实现分形几何建模的方法主要包括迭代函数系统(Iterated Function System, IFS)(Hutchinson, 1981)、粒子系统(particle system)(Reeves, 1983)、分枝矩阵(Oppenheimer, 1986)、A-系统(A-system)(Aono, 1984)等。

1) 迭代函数系统(Iterated Function System, IFS)

IFS 是 1981 年由 Hutchinson 提出,1985 年由美国科学家、佐治亚理工学院的 M.F.Barnsley 发展的一个分形构成系统,是分形几何学的经典算法。以仿射变换为框架,根据几何对象的整体与局部具有自相似的结构,将总体形状以一定的概率按不同的仿射变换进行迭代,可以产生具有无穷细节的、精致纹理的图形。尤其在树木形态模拟方面,IFS 方法可以表现出树木整体形态的不规则性以及整体与局部细节的自相似性,比以规则形状构图的传统方法更具优势(齐东旭, 1994)。但是利用 IFS 进行植物模拟时,仍存在一些不足,IFS 缺乏对植物拓扑结构的理解和控制,模拟的植物形态差异性小,具有千篇一律的现象,这与实际自然界中千姿百态的树木形态不相符。为了获得植物千姿百态的模拟效果,研究人员研究了随机因素和迭代概率对植物形态的影响。用随机迭代算法绘制分形图,原理清楚,程序简单,计算时间短,并可在分形集上着色而绘制出极其丰富的分形图。早期 Barnsley 与 Demko 应用 IFS 方法生成了自相似极强的蕨类植物叶片,如图 1-3 所示(Barnsley, Demko, 1985),其后 Barnsley 又发展提出了再现迭代函数系统(recurrent IFS)方法。该方法在自相似性生成方面更为灵活,可以体现植物体局部之间的不同自相似性。1991 年 Prusinkiewicz 与 Hammel 发展了一种称为语言约束式迭代函数系统(language restricted IFS)的方法。该方法通过加入变换顺序的约束条件,可以通用地概括各类不同的 IFS 方法。由于树木具有自相似的特点,在树木可视化系统中有大量应用 IFS 算法的研究的成功实例。郭维红

等(1995)提出了利用 IFS 方法构建树木数学模型,采用随机二叉递归模型方法较真实地实现了树、竹类自然植物的计算机仿真。李光辉等(2001)研究了基于 IFS 的植物模拟方法,2002 年又研究了基于 ActiveX 的 IFS 植物模拟控件的实现。李庆忠等(2004)基于 IFS 方法,提出用有限个压缩放射变换子图对树木各部分进行贴图的方法,并讨论了对该树木模型进行着色的方法和树影运算的方法,实现树木不同姿态的模拟。仲兰芬等(2005)研究了基于 IFS 的三维树木模拟方法,经过计算机实验得出了单轴分枝和合轴分枝两类树木的 IFS 码,并进行了正确性证明和真实感加工。迭代函数系统是纯数学方法,只适合对植物形态的模拟,不适合模拟植物的生长过程。



图 1-3 IFS 算法生成的蕨类叶片 (Barnsley, Demko, 1985)

2) 粒子系统

粒子系统方法是由 W.T.Reeves 在 1983 年提出的,其基本思想是采用许多形状简单的微小粒子(如点、立方体、球等)作为基本元素来表示自然界不规则的景物,粒子的产生、运动与死亡形成景物的动态变化。最早用于模拟火焰、烟雾等,后来逐渐被用于生成真实感的自然景物(如森林)。该方法采用基本粒子的集合来描述物体的形态及其变化,这些基本粒子可以是一个像素,也可以是一些简单的绘图图元,它们的集合确定了物体的形态。对于每一个新产生的粒子,粒子系统必须为它们指定各自的属性值。粒子的属性集合一般由粒子位置、速度大小及方向、粒子大小、颜色、透明性、形状及生命周期等组成。粒子的属性值取自所定义的有效值,并在此基础上可增加一定的随机扰动。此外,粒子系统还应定义一个产生形状,使得可以在此确定区域内随机选择粒子的初始位置,如一个半径为 R 的球,也可以按一定的自然模型来生成更复杂的产生形状。粒子系统不是一个静态的整体,而是处在随时间的推进不断运动着的粒子集合中,其结构可以改变,位置可以移动,新的粒子可以不断产生,同时旧的粒子可以“湮灭”。用粒子系统表示的物体是不确定的,它的外形和结构复杂多样,形态各异,并且在一定程度上还具有一定的随机性。

树木的形态用不同的粒子排列组合来模拟,粒子在生命周期中的变化反映了树木生长发育甚至死亡的过程。国内许多研究者将粒子系统的思想用于树木形态的模拟,并有一定的改进。王小铭等(2003)以树木的静态造型为背景,提出基于骨架定制和粒子系统模型的树木模拟方法,基于粒子系统方法生成了枝干及树叶模型、枝干生长模型,实现树木的模拟。雷蕾等(2004)基于粒子系统思想提出了一种基于能量模型的叶片纹理构造算法,避免了传统的纹理贴图方法中纹理坐标计算带来的复杂性和对贴图高要求的局限性,充分

发挥了粒子系统在模拟自然界中的复杂且有规律的事物时的优势,模拟出的叶片具有较高的真实性。

粒子系统的主要优点是以基本几何图元来构造物体空间和时间上的形态变化,易于变换和反走样,因此更适合于森林景观生长系统的可视化模拟的整体研究,而不适合表现个体植物的拓扑及形态。

3) 分枝矩阵

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。分枝矩阵通过定义各级枝条的偏转角度、锥度、螺旋状扭曲以及与其母枝条的尺寸比例等实现了分形树木造型。

4) A-系统

Aono 等提出了构造植物形态的 A-系统。该模型针对早期 L-系统不能生成复杂三维枝条结构的缺点,提出了 GMT1~GMT4 4 种几何结构模型。通过设置分枝角度按照一定统计规律随机变化,以及植物分枝结构的一些特征(如单轴分枝结构、合轴分枝结构等),能形象地模拟多种植物。并通过应用吸引子(attractor)算法,模拟光照、重力及风等对植物形态的影响。A-系统能够迅速直观地生成植物形态结构,但依赖于设计者对植物几何外观的认知程度,并且不能模拟植物的生长,不能反映植物的潜在形态。

1.3.3 随机过程方法

随机过程方法主要包括法国农业国际合作研究发展中心(CIRAD)的 Philippe de Reffye 等提出的基于有限自动机(finite automation)的植物形态发生建模方法,该方法将植物的拓扑结构及其生长发育过程表达为一个有限自动机的模式(Philippe de Reffye, 1988)。植物各个器官的发育及不同生理年龄间的转换可以看成是几种不同状态的转换。通过马尔可夫链及状态转换图(state transition graph)方式描述植物生长、发育、休眠、死亡等过程。以参考轴技术为理论依据,Philippe de Reffye 等人建立的虚拟植物模型(AMAP),是一个针对植物结构特征的专用方法。AMAP 方法综合了植物学家 Halle 等人提出的植物构筑学方面的定性知识,对植物芽的功能作用进行定量的数学描述,适用于模拟各种科目的植物。

Godin 等在随机过程方法的基础上提出了多尺度意义下的植物拓扑结构模型(MTG)(Godin, 1998),这种模型能够以不同时间尺度描述植物的拓扑结构。这种建模方法植物学意义明确、数据输入简单、过程分析直观。赵星等进一步发展了双尺度自动机模型(dual-scale automaton)(赵星, 2001),该方法根据植物的生理年龄和生长年龄来组合植物的生长参数,以更为简便、通用的图形方式表示各种植物构造模型,避免了有限自动机模型中不容易描述与生长周期有关的一些植物生长特点(如生长节律、生长延迟等)等缺陷。双尺度自动机模型用微状态表示这些具有相似参数的叶元,用宏状态组合生长单元中各种叶元,用宏状态的自我循环表示生长单元的连续生长。

根据双尺度自动机理论发展起来的 GreenLab 模型是植物功能-结构模型的重要代表,它通过在几个数学公式之间建立迭代关系来并行模拟植物的功能与结构的反馈关系,只需确定少量参数就能模拟植物(如树木)的生长。与其他模型相比,GreenLab 模型在机理性