



# 植物生长建模与可视化——回顾与展望<sup>1)</sup>

胡包钢<sup>1,6</sup> 赵星<sup>2,6</sup> 严红平<sup>1,6</sup> de Reffye Ph<sup>3,6</sup>  
Blaise F<sup>3,6</sup> 熊范纶<sup>4</sup> 王一鸣<sup>5</sup>

<sup>1)</sup>(中国科学院自动化研究所模式识别国家重点实验室 北京 100080)

<sup>2)</sup>(中国科技大学计算机科学系 合肥 230027)

<sup>3)</sup>(Laboratoire de Modelisation des Plants, CIRAD, BP5035, 34032 Montpellier, France)

<sup>4)</sup>(中国科学院合肥智能机械研究所 合肥 230031)

<sup>5)</sup>(中国农业大学电子电力工程学院 北京 100083)

<sup>6)</sup>(中国科学院自动化研究所中法联合实验室(LIAMA) 北京 100080)

(E-mail: hubg@nlpr.ia.ac.cn)

**摘要** 回顾了植物生长的建模与可视化研究. 为了加深对不同模型的目的、内涵与局限性的理解, 该文对植物生长模型进行了分类. 在植物生长机研究中, 对目前常见的分形方法、随机过程、人工智能等建模方法的特点进行了比较分析. 分别介绍了植物仿真与可视化方面的研究进展及其相关技术, 以及植物生长软件的发展状况. 最后, 总结了该领域研究中存在的主要问题, 并讨论了未来研究与应用方面的发展趋向及其前景.

**关键词** 植物生长, 仿真, 可视化, 计算机建模.

## PLANT GROWTH MODELING AND VISUALIZATION —REVIEW AND PERSPECTIVE

HU Bao-Gang<sup>1,6</sup> ZHAO Xing<sup>2,6</sup> YAN Hong-Ping<sup>1,6</sup> de REFFYE Ph<sup>3,6</sup>  
BLAISE F<sup>3,6</sup> XIONG Fan-Lun<sup>4</sup> WANG Yi-Ming<sup>5</sup>

<sup>1)</sup>(National Laboratory of Pattern Recognition, Institute of Automation, CAS, Beijing 100080)

<sup>2)</sup>(Department of Computer Science, USTC, Hefei 230027)

<sup>3)</sup>(Laboratoire de Modelisation des Plants, CIRAD, BP5035, 34032 Montpellier, France)

<sup>4)</sup>(Hefei Institute of Intelligent Machines, CAS, Hefei 230031)

<sup>5)</sup>(College of Electronic and Electric Power Engineering, CAU, Beijing 100083)

<sup>6)</sup>(LIAMA, Institute of Automation, CAS, Beijing 100080)

(E-mail: hubg@nlpr.ia.ac.cn)

**Abstract** A review of plant growth modeling, simulation and visualization is presented. We categorize the plant models according to their specific purpose in applications.

1) 中国科学院自动化研究所中法信息、自动化与应用数学联合实验室(LIAMA)及国家自然科学基金(60073007)资助课题.

The classification will be helpful to recognize associated limitations of each model. It is pointed out that the 3-D visualization model provides a unique approach for the study of plant growth with respect to its morphological or geometrical information. Various methodologies are discussed for comparison when they are used in construction of morphogenetic and ecophysiological models. These include fractal, L-systems, stochastic process, artificial intelligent, etc. The state of the art in 3-D visualization technique of plants is described. The current status of software development is given for applications in both agronomy/forestry and entertainment. Finally, we summarize the existing issues and highlight the perspectives from the viewpoints of research and applications.

**Key words** Plant growth, simulation, visualization, computer modeling.

## 1 引言

青青园中葵，朝露待日晞。  
阳春布德泽，万物生光辉。

摘自《汉乐府》长歌行

回溯两千年的历史时空，佚名作者留下了这段吟诵植物生长的优美诗句，表达了古人对“植物—绿色—雨露—阳光—万物—生命”引发出来的无穷美感与深远意蕴。

以计算机为手段对植物生长进行建模与仿真，将为探索植物生命的奥秘和生长过程的规律，以及改善人类生存环境质量带来新的契机。对于中国这样的一个农业大国、林业弱国，开展植物生长的建模研究有着特别重要的意义。农林业信息化将成为 21 世纪的重要发展趋势，生态环境保护与建设是人类社会可持续发展的永恒主题。与此同时，以模拟植物生长为内容的娱乐、教育软件也是不可忽视的发展方向。

植物作为一种生物体，其构造机理、生长过程以及与环境的作用相当复杂，应用计算机模拟植物生长过程涉及到多学科的知识融合，如生物学、植物学、生态学、信息科学、应用数学等。本文将对植物生长的建模与可视化研究工作进行回顾与展望，介绍一些重要的研究工作，侧重于对不同研究方法的比较，以期探寻出该领域研究中存在的问题及其发展趋势。

## 2 植物生长建模的分类

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，预测未来提供有用的工具。以植物为对象的计算机模型可以有多种分类形式。这一问题的讨论对于我们加深理解有关模型的目的、内涵与局限性十分必要。但应该注意到，某些模型分类是存在模糊性或多义性的。下面是我们按照不同方式进行的分类总结及其他学者的研究结果。

### 2.1 根据植物体规模方式分类

植物生长模型可以分为多种层次或尺度。首先是微观模型与宏观模型的分类。前者在组织、细胞或分子的水平对植物机体进行分析研究，后者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. 植株个体间的相互影响与作用不仅是植被群体模型的研究内容,该模型的宏观程度还可以包括相当地域范围内的生态环境与植被相互作用与调控的功能模拟. 植株个体模型中又可以进一步分为器官(organ)模型、根系(root)模型与地表上植物体(shoot)模型. 图 1 表示了植物生长研究中以植物体规模方式对模型方法进行的分类. 本文内容将限制在宏观模型范围内.

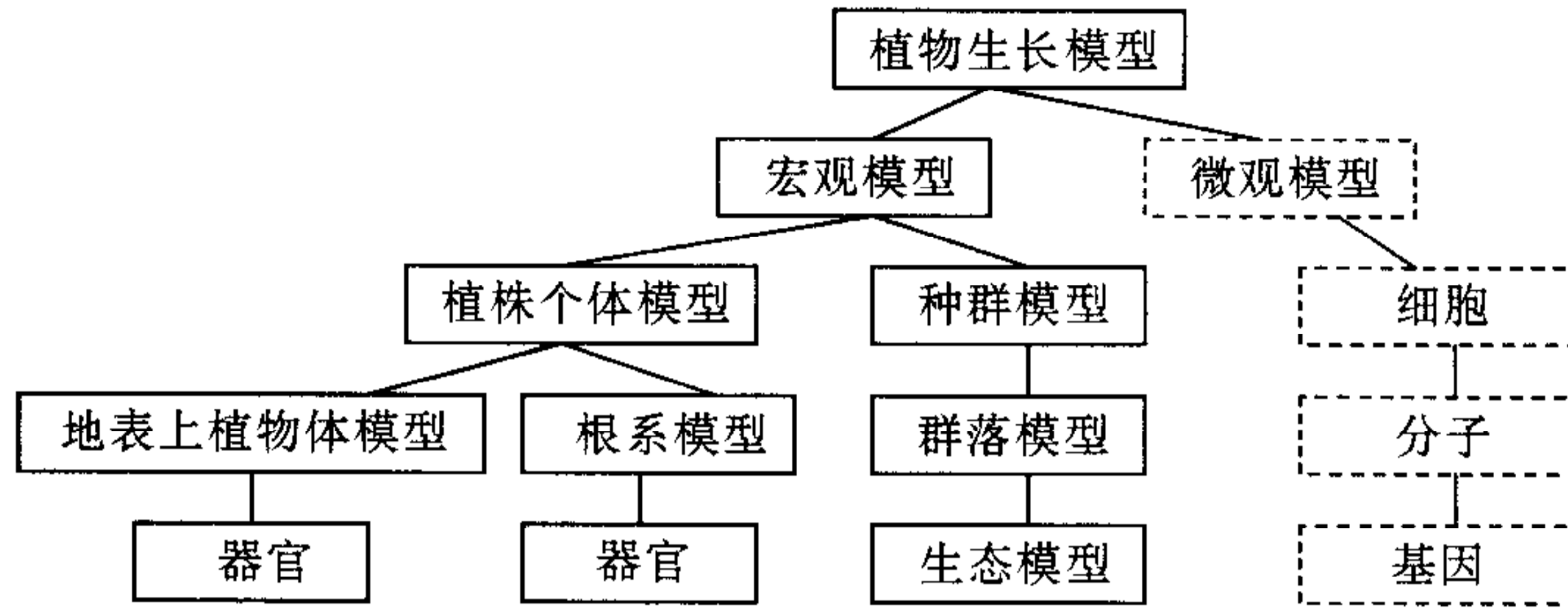


图 1 根据不同研究层次对植物生长模型分类

### 2.2 根据模型功能分类

在实现植物的可视化仿真中,首先应计算植物的生长过程,然后应用计算机图形方式显示出植物形态结构随生长的发育变化. 因此,我们按照模型完成的功能和模拟的过程,将植物生长模型分为两大类模型(图 2):生长机(growth engine)模型和可视化(visualization)模型. 所谓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. 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. 形态发生模型提供植物的形态信息. 它可以进一步分解为拓扑(topological)结构模型和几何(geometrical)结构模型. 拓扑结构模型是植物建模中的最基本模型<sup>[1]</sup>,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.

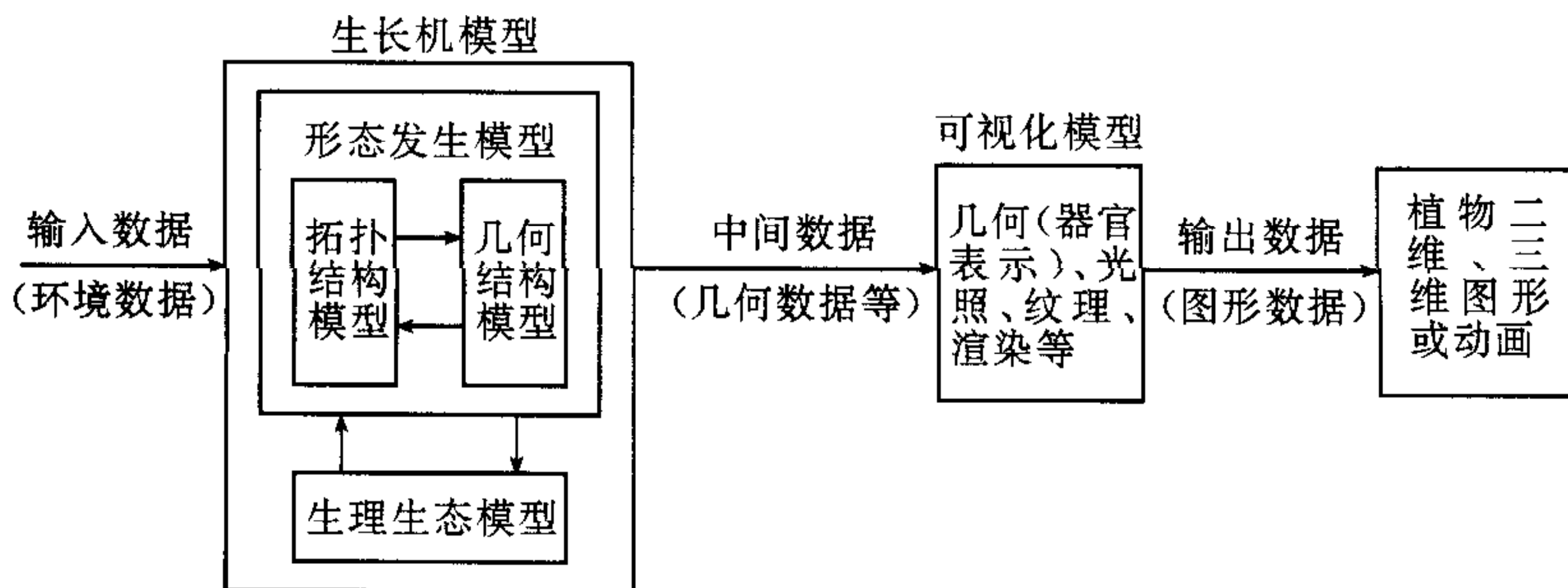


图 2 植物生长模型与可视化

可视化模型利用计算机图形学技术,用二维或三维图形形象地显示植物的生长过程,包括几何、光照、纹理等一些子模型. 该几何子模型的主要功能是根据生长机模型计算得到的



几何数据,将一些图形符号(symbols)变换尺寸后,表示植物的各器官.例如可用大小不同的椭球体表示不同大小的植物果实.该子模型不同于形态发生模型中的描述植物形态的几何结构模型.

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.它可以帮助研究者通过图形方式更有效地观察与解释植物生长中的结构与功能、生长发育、进化、分布等各种规律,增强对问题的洞察与见解能力,并加快模型验证工作.更为重要的是,可视化三维建模为研究与探索“植物—植物”,“植物—环境”或“人工操作—植物”交互关系提供了独到的方法与途径.因为植物的形态结构不仅能够反映植物的生长状况,同时也决定和影响植物的生长发育.借助可视化模型研究植物生长的典型实例包括:植物冠层光强分布、光合作用产量、趋光效果,水分蒸腾,种植间距,作物与杂草竞争,植物体的变形、弯曲及倒伏,植物相互间或与外界障碍物之间产生的根系或冠体碰撞等问题.同时,植物生产过程中的人工干预也将涉及到三维可视化仿真研究,如人工修剪、整形等栽培操作下的植物生长过程模拟,施喷化肥、农药、水等人工管理下的效果模拟.

### 2.3 根据建模方法分类

Thornley 等将植物建模方法分为两大类:经验式(empirical)模型与因果式(causal)模型<sup>[2]</sup>.由于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,因此该模型也可称为描述型(descriptive)或统计式(statistical)模型.最典型的描述型模型实例是应用人工神经网络方法模拟花卉生长<sup>[3]</sup>.该类“黑箱模型”的特点是适用性广、方法简单、计算速度快.因果式模型可以用于解释植物的内在生长机理,故又称为解释型(explanatory)、生理式(physiologically based)或功能式(functional)模型. Prusinkiewicz 于 1998 年进一步讨论了两种模型的差异<sup>[4]</sup>.他指出两者在建模中因果(或下上)信息应用方面是相反的,经验式模型是上至下的分析式(top-down 或 analytic)模型,因果式模型是下至上的合成式(bottom-up 或 synthetic)模型.前者根据实验数据的分析方法建模,后者通过合成已知或假设的机理建模. Marcelis 等认为描述型模型可以成为解释型模型中的子模型,在模型结构层次上前者必须低于后者<sup>[5]</sup>.例如,通常解释型作物生长模型包括了作物光合作用、养料生成与分配、器官生长等多个描述型子模型.解释型模型的特点是适用于验证假设、合成知识和加深理解复杂系统的内在规律.

### 2.4 根据模型应用背景分类

根据植物生长建模与可视化仿真的应用背景不同,可以归结为两大类模型:以农林业应用为背景的模型和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果的真实性要求方面有着很大的差异.前者追求基于视觉效果真实性<sup>[6]</sup>,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模型;后者要求基于植物学知识的真实性<sup>[7]</sup>,它必须建立在植物的生态生理原理之上.

## 3 关于植物生长机模型的研究

植物的生长发育是一项十分复杂的过程.这表现为 a)控制变量及影响因素众多;b)各变量与生长结果之间可能具有较强的动态耦合变化过程;c)生长过程呈现随机性、非线性、多变性及突变性.可以理解,建立一个完整的生长机模型,并全面反映出以上特征是十分困



难的. 因此, 任何一个植物生长机模型, 总是建立在一定的假设条件之下, 并根据某些特定研究内容, 对植物生长过程进行的简化数学处理. 比较经典的、系统性的植物建模研究专著可以参见文献[8~12]. 有关研究综述文章见文献[5, 13~16]. 以下我们就生长机模型中的两大子模型的建模方法分别进行讨论.

### 3.1 形态发生模型

在形态发生模型方面, 目前比较常用的方法包括: a) 分形(fractal)方法; b) L 系统; c) 随机过程. 分形方法是根据植物的形态结构, 利用了描述具有自相似性(self-similarity)的数学功能来表现植物生长的拓扑及形态结构. 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)、分枝矩阵(ramification matrix)<sup>[17]</sup>、粒子系统(particle system)<sup>[18]</sup>、正规文法方法<sup>[19]</sup>、A 系统(A-system)<sup>[20]</sup>以及 Oppenheimer 提出的特定的分形方法<sup>[21]</sup>等.

IFS 是分形绘制的典型方法, 通过若干仿射变换, 将整体形态变换到局部. 早期 Barnsley 与 Demko 应用 IFS 方法生成了自相似性极强的蕨类植物叶片<sup>[22]</sup>, 之后 Barnsley 等发展了再现迭代函数系统(recurrent IFS)方法<sup>[23]</sup>. 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)方法<sup>[24]</sup>. 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. 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. 粒子系统是 Reeves 于 1983 年提出的一个随机模型. 由于该方法是以粒子单元的扩展来构造物体的空间与时间上的发生形态, 因此不适合于表现个体植物的拓扑及形态, 只是比较宏观地模拟森林、草丛一类景象<sup>[25]</sup>. 正规文法方法是由 Smith 发展的基于形式语言的并行重写算法. Oppenheimer 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. 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 等四种几何结构模型. 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.

1968 年, 理论生物学家 Lindenmayer 提出了著名的 L 系统, 成为植物生长建模的主要方法之一. 这是一种字符重写系统或形式化语言方法, 通过对植物对象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(set of productions, 可以理解为描述规则), 生成字符发展序列(developmental sequences of words), 以表现植物的拓扑结构. 为建立完整有效的植物模型, L 系统不断扩展其功能. 加拿大学者 Prusinkiewicz 为 L 系统的发展作出了杰出的贡献. 早期的 L 系统简称为 D0L 系统. 前缀 D0 代表确定性, 与上下文无关(context free). 通过加上几何形态信息, 诸如线段的长度和线段的转角等, D0L 系统利用“乌龟行走式解释算法(turtle interpretation)”, 可模拟分形几何图形. 随机 L 系统克服了确定性 L 系统只能生成规则分形图形的局限, 可构造随机的植物拓扑结构. 参数化 L 系统使 L 系统能够模拟时延信息<sup>[26]</sup>. 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. 1L 系统是只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. Kurth 与 Sloboda 认为上下文相关的 L 系统在表现与环境交互方面是有缺陷的<sup>[9]</sup>, 因为上下文相关功能只能提供局部的敏感性. Mech 与 Prusinkiewicz 发展了所谓的“开放式(open)L 系统”<sup>[27]</sup>. 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”两方的相互信息, 以实现植物与环境并发过程的模拟研究. 他们给出了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, Prusinkiewicz 等提出了时变 L 系统<sup>[28]</sup>. 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(dL-system)<sup>[29]</sup>.

随机过程方法主要包括 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, 也称为参考轴技术(reference axis technique)<sup>[7,11]</sup>. 该模型通过马尔可夫链理论及状态转换图(state transition graph)方式描述植物发育、生长、休眠、死亡等过程. Godin 等在此基础上提出了多尺度意义下的植物拓扑结构模型(MTG)<sup>[1]</sup>, 这种模型能够以不同时间尺度描述植物的拓扑结构. 这种建模方法物理意义明确、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)<sup>[30]</sup>, 该方法根据植物的生理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.

形态发生模型的难点主要表现在拓扑结构生成方面. 以上介绍的模型正是围绕这个核心问题而发展起来的. 其中一些方法在数学关系上具有一定的等效性. Prusinkiewicz 与 Hammel 讨论了在植物分支过程模拟时应用 Recurrent IFS 方法与 L 系统方法的等效关系<sup>[31,32]</sup>. 一些研究者还证明了马尔可夫链形式可以应用随机 L 系统表示<sup>[4]</sup>.

在考察拓扑结构有效性方面, 植物学家对各种植物拓扑结构进行归纳分类, 提出了构造(architectural)模型的概念. 著名植物学家 Hallé 等定义了 23 种构造模型<sup>[33]</sup>, 如 Corner 模型、Tomlison 模型、Leeuwenberg 模型、Rauh 模型等. 大多数植物的拓扑结构属于这些模型中的一种或几种模型的组合. 该项研究被认为是植物拓扑结构研究中的经典工作. 在基于农林业应用为背景的研究中, 实现各种植物构造模型以及模拟植物各类花序能力, 已经成为检验形态发生模型有效性的重要内容.

### 3.2 生态生理模型

在生态生理模型方面, 主要的建模工具可以归纳为传统数学方法(如数理统计、非线性函数、偏微分方程等)和人工智能方法两大类. 数理统计方法是植物建模中的常用工具. 该方法基本上不考虑生态生理方面的功能原理, 而是根据试验样本的统计数据建立数理关系. 因此, 由数理统计方法发展的模型在解释植物生长机理、应用普适性方面是有局限性的. 最近, 展志岗等应用基于生理功能的模型参数辨识方法进行了冬小麦的生长模拟研究<sup>[34]</sup>. 虽然这是一种数理统计方法, 但是通过设定生理功能方面的内参数, 并经过基于试验样本数据完成的参数估计, 比较有效地反映了小麦生长中的养分生成与分配的机理过程. 应用数理统计方法, 可以得到统计式的经验公式, 或确定式的非线性表达式. 以非线性函数为工具的描述型模型具有许多优点. 首先, 该模型是建立在实验观测数据基础上, 在可控的环境条件(如温室)下模型预测结果比较可靠; 再有, 该类模型简单、待定系数少、特别适于预估植物的各个生理生长阶段. 因此, 非线性函数在农作物及花卉生产中得到了广泛的应用. 如许多研究者



应用各类多项式、指数函数、双曲函数,  $S$ -曲线等描述农作物的生长周期、产量预估、光合作用、养分分配、叶片生长、以至环境因素等<sup>[5]</sup>. 其中各种  $S$ -曲线被大量用于近似拟合植物节间长度、叶片尺寸等生长数据, 并被称为生长曲线(growth functions). 另一方面, 偏微分方程可以认为是基于解释型的建模工具. 例如, de Reffye 等在建立植物水分传输模型时是基于水动力微分方程<sup>[12]</sup>.

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, 并获得了相当广泛地应用<sup>[35]</sup>. 最为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<sup>[36]</sup>. 专家系统建模方法的优点在于以农业专家经验为基础, 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. 由此可以充分、广泛地应用专家知识, 并特别适用于处理机理不明、难于数理化的问题. 但是, 该建模方法本身决定了它的局限性. 首先, 如何全面地获得专家经验不是一项容易的工作; 其次, 模型的有效性极大地依赖于专家的所在地域; 最后, 当专家经验冲突时, 模型不能保证得到正确推断.

人工智能方法在植物生长建模研究中的进一步发展是人工神经网络、模糊系统、遗传算法的应用. Elizondo 等应用人工神经网络方法预测花卉开花期及豆类作物生理成熟度<sup>[3]</sup>. 模型的输入信息为每日中的最高、最低环境温度、光照量、种植期与开花期等. 通过训练数据调整模型参数, 利用该模型对未经训练的数据进行预测, 其平均预测误差分别为 0.143 天与 2.19 天. Center 与 Verma 应用模糊建模方法构造了西红柿作物的光合作用模型<sup>[37]</sup>. 该模型表达了温度、二氧化碳浓度、光照强度三个变量与光合作用总量的关系.

到目前为止, 传统数学方法仍在生态生理建模方面占有主导地位. 因为这些方法更适合于功能原理方面的解析表达. 而应用人工智能方法建立的模型一般说来是描述式、非生理式的. 如果说专家系统与模糊建模方法还能利用专家知识, 那么人工神经网络方法基本上是一种“黑箱操作”, 模型的内参数不具有任何物理意义. 当考虑的输入变量很多, 输入变量与输出结果的机理关系十分复杂时, 人工神经网络方法将会显示出较大的优越性. 在 6.1 节中, 我们将对常用建模方法作出评价.

## 4 关于计算机可视化模型研究

植物的可视化模型包括几何、光照、纹理、渲染等一些子模型(图 2), 这些子模型的研究是植物可视化研究的主要内容. 绘制植物与绘制其它物体有许多相似或相同的研究内容, 如图形的快速渲染等. 作为一种生物体, 植物还有一些不同于其它物体的特性, 如枝条的弯曲、植物的向光性、由季节更替和光照强弱等引起的植物各组织器官的尺寸、形状以及颜色等的变化. 这些也是植物可视化研究的重要内容.

### 4.1 植物器官的绘制

植物器官包括茎、枝、叶、果实、花朵等. 植物的茎、枝形状简单, 可用圆柱体或圆锥体连接而成. 果实主要用椭球体表示. 花朵由花瓣和萼片组成, 首先绘制花瓣和萼片, 然后组合成花朵. 花瓣和萼片的形状类似于叶片的形状, 叶片的一些绘制方法可用于花瓣和萼片, 下面主要介绍叶片的绘制.

模拟叶片和花瓣的常用方法是利用双三次曲面(bicubic patches)表示. 如 Prusinkiewicz 用该方法实现了葵花叶片和花瓣、玫瑰花瓣等的模拟<sup>[9]</sup>. 该方法较适合模拟某一生长阶段植



物叶片和花瓣的形状,模拟叶片和花瓣在生长过程中形状和尺寸的连续变化需不断调整所有参数,形状不容易控制且计算量大。

为了模拟叶片的动态生长过程,一般用建立叶片模型的方法来模拟。最简单的方法是直接用多边形去模拟表面较小且平坦的叶片,通过增大多边形的各边边长来模拟叶片的扩张过程。

由于叶脉的形状类似于整棵树的分枝结构,因此 Prusinkiewicz 通过用 L 系统产生树状结构作为叶片的骨架<sup>[9,26]</sup>,通过在树状结构的末端插入线段形成闭合的叶缘的轮廓,或者将树状结构的末端点视作叶缘的特征点,利用这些特征点确定的参数曲线模拟叶缘轮廓,然后对轮廓内部进行填充得到叶片。

Viennot 的方法类似于 Prusinkiewicz 的方法,这种方法更适合模拟叶裂类型为深裂和全裂的叶片<sup>[17]</sup>。首先用从叶柄处发出的树状结构表示叶片的主叶脉,确定叶片各裂片的位置。然后用以主叶脉为中心发出的二级叶脉来模拟每个裂片的形状,最后用直线或参数曲线连接属于叶缘的每个裂片的边缘,形成叶片。

上述方法只适合模拟植物的同胚生长(homoblastic),即在生长过程中植物器官的尺寸增大,但形状基本不变。而不适合模拟植物的异形胚芽生长(heteroblastic),在这种生长过程中,植物器官的形状会发生变化,如叶片会产生新的裂片和凹口(notches)等。当新的裂片产生时,脉络结构的突然变化需要所有的控制点重新定位,在这种情况下,无论是利用直线连接树状结构的末端点形成叶缘,或者利用末端点所确定的参数曲线去模拟叶缘,都很难保证叶缘形状变化的连续性。

为此,Hammel 等提出一种用隐含轮廓(implicit contours)模拟复杂叶片的方法<sup>[38]</sup>,即首先用 L 系统产生近似于叶脉的树状结构,确定叶裂形状,然后用隐含轮廓技术追踪树状结构的末端点,从而得到叶缘的形状。最后根据真实叶片的特征,对由叶缘所围成的叶片表面进行弯曲和修补处理。

还可以用其它一些方法来产生叶片。如 Oppenheimer 用分形方法模拟落叶的叶脉<sup>[21]</sup>,Demko 用 IFS 产生了著名的蕨类植物叶片。这些方法只能产生严格分形的叶片,虽然可以通过添加随机函数产生随机形状的叶片,但却不适合模拟真实植物的叶片。

Espana 等用一个近似于叶片的长方形二维参数平面 $[u, v]$ 来模拟玉米叶片<sup>[39]</sup>,其中  $u$  轴对应玉米叶片中轴。他们首先将该参数平面分成 20 个相同的三角形,对应玉米叶片的主要骨架,然后根据叶缘形状、叶形曲线及叶尖的形状将每个三角形映射到三维空间 $(x, y, z)$ 。如果空间中的三角形的长边大于门限值,则将其对应的参数平面中的三角形沿其长边分割成两个子三角形。这样递归分割下去直到所有的三角形的长边都小于门限值。

在不同生育期玉米个体和群体的三维重建研究中,郭焱模拟了弯曲的玉米叶片<sup>[44]</sup>。其方法是通过空间坐标仪测定玉米叶片的空间坐标值,代入表征玉米叶曲线的二次方程中,求出方程的系数,确定了叶曲线。这样得到的玉米叶片形状非常接近实际植物的形状。

Jules 用三个多边形拼接成的图形模拟枫叶的形状。通过变化多边形之间的拼接关系,简单地模拟枫叶在风中的卷曲形状<sup>[40]</sup>。

## 4.2 枝条弯曲的模拟

模拟植物枝条的自然弯曲形态是直观形象地再现植物形体的重要内容。通常用参数曲线拟和枝条的弯曲形状<sup>[40]</sup>。该方法虽然能模拟各种枝条弯曲,但需要对植物枝条的弯曲形状作大量测量,而且不适合模拟植物生长的过程。因为随着植物的生长,由于枝条自身增粗、



增长以及枝条上器官的变化,枝条的弯曲形状不断变化,如果不断地人为给定枝条曲线参数,既不方便又很难真实反映植物的实际生长情况。

Prusinkiewicz 的方法是首先给定组成枝条的各个片段的初始方向矢量及整个枝条的趋向性矢量,然后通过计算这两个矢量的乘积得到每个片段的最终方向矢量,这样就得到了弯曲的枝条<sup>[9]</sup>。由于枝条上各片段的弯曲角度是非线性的,人为给定各片段的弯曲角度很难自然逼真地模拟枝条的弯曲形状,而且植物的枝条随其长度和生长位置的不同,其弯曲程度也不同,因此上述算法需要分别给出所有枝条的弯曲系数。

Weber 对植物的每个枝条设定两个偏转角度,枝条的前半段和后半段分别以不同的偏转角度向下和向上偏转,这样能模拟 S 型枝条弯曲形状<sup>[41]</sup>。为了模拟枝条弯曲的随机性,还可以对每一段加入随机偏转量。该方法类似于 Prusinkiewicz 的方法,虽然能模拟更复杂的枝条弯曲形状,但同样具有上述缺点。

de Reffye 将植物的枝条作为悬臂梁来分析其受力情况,得到枝条的弯曲形状。该模型尽量简化枝条的受力分析,模型简单,计算速度快,仅通过调整枝条的线性弹性模量,就可以得到自然逼真的枝条弯曲形状<sup>[42]</sup>。

Fourcaud 等应用有限元法(基于偏微分方程)模拟了树木由于自重产生的变形弯曲(生态生理影响)。该方法比一般的材料力学方法计算更为精确,并很好地表现了树木内应力分布变化与植物生长过程的相应关系,但计算速度较慢。

### 4.3 植物群落的绘制

森林、草原、花园等植物群落的绘制是计算机图形学中的一个重要研究内容,具有广阔的应用前景,如用于计算机辅助园林和景观设计、生态环境预测与可视化、计算机动画、游戏和虚拟场景绘制等。植物群落的绘制同时也是一个具有挑战性的课题,这是因为植物结构复杂,详细描述一株植物的三维几何形状一般需要 10MB 以上的存储空间,描述一个相对较小的具有 1 000 株植物的植物群落将需要 10GB 存储空间,大型植物群落的绘制超出了当前计算机的计算能力<sup>[45]</sup>。为了控制植物群落尺寸,提高绘制速度,主要算法如表 1 所示。在目前几种算法中,我们认为相似样本化(approximate instancing)方法在简化描述复杂度与保持绘制效果的综合能力方面更具有发展前景。真实地实时绘制植物生态系统的动态生长过程还是一项长期的研究课题。

表 1 植物群落主要绘制算法

主要算法 及代表性工作	算法简介	算法评价
植株依次绘制法 Reeves, 1985 <sup>[25]</sup>	每次绘制一株植物,绘制完毕则移出内存,接着绘制下一株植物。	不受植物数量的限制,但由于缺少邻近植物的详细信息,只能得到近似的渲染效果。
细节简化法 Weber, 1995 <sup>[41]</sup> Hoppe, 1997 <sup>[46]</sup> Marshall, 1997 <sup>[47]</sup>	简化相对于视点可观察范围的不必要细节。	减小了场景描述尺寸,但当视点发生改变时,有可能使植物视觉效果真实性变差。
纹理映射方法 Gardner, 1984 <sup>[48]</sup> Kajiya, 1989 <sup>[49]</sup> Neyret, 1995 <sup>[50]</sup>	用映射了纹理的二次曲面或平面表示复杂的景物,或利用体纹理的方法,模拟三维植物形态。	降低了渲染复杂度,但绘制的植物群落不自然生动,没有动态效果。
相似样本化方法 Kay, 1986 <sup>[51]</sup> Hart 1991, 1992 <sup>[52, 53]</sup> Dussen, 1999 <sup>[54]</sup>	根据场景中个体之间的相似特征,重复利用样本的计算结果,不必分别计算各个相似的个体。	降低了场景的复杂度,提高了绘制速度,取得较好的效果。



#### 4.4 植物某些特性的可视化处理

由于植物具有不同于其它物体的特性,如植物的向光性、植物枝条之间的相互碰撞、树叶在秋天时颜色的变化等,这里介绍一些对某些特性的可视化处理。

##### 4.4.1 碰撞检测

物体之间的干涉和碰撞检测在图形学、仿真、动画和虚拟现实等技术中得到广泛地研究,具有很重要的意义。在植物仿真中,需要对植物枝条之间、根系之间、植物周围环境之间进行碰撞检测。由于植物结构复杂,枝条数量多,不能用传统的碰撞检测方法,必须简化计算。Greene 利用体元素空间方法(voxel space)实现植物与障碍物之间的碰撞检测,模拟了蔓生植物沿着墙壁生长。所谓体元素空间方法就是将三维空间区域分割成相同的立方体单元——体元素(voxel),将空间中的植物和周围环境都用体元素近似表示<sup>[55]</sup>。例如将植物的各个枝条在空间中所经过的体元素标记出来,这样仅根据所标记的立方体编号,就知道该枝条的空间位置。同样将周围环境中的如墙壁等障碍物也用立方体表示,这样碰撞检测变成了是否占用了相同的立方体。分割成的立方体越小,则精度越高,计算速度越慢;反之则精度下降,速度加快。

Blaise 用同样的方法模拟了单株植物在生长过程中枝条之间、根系之间的互相影响,障碍物对植物生长的影响,以及相邻植物生长中枝条之间的躲让效应(shyness effect)<sup>[56]</sup>。

##### 4.4.2 植物向光性生长的模拟

为了模拟植物的向光性生长,首先应确定光照在各个方向上的分布状况。由于只能计算有限方向上的光照,因此 Blaise 用一个由 46 个六边形组成龟壳状结构来模拟半球形天空。每个六边形对应一个方向。知道了龟壳上每个六边形中的光照强度,也就得到了光线的分布状况<sup>[56]</sup>。

植物轴上新长出部分的生长方向由其初始生长方向和光照方向决定。初始生长方向也就是其支撑轴当前的生长方向。光照方向就是植物轴的顶芽从组成龟壳状结构的 46 个多边形中得到的最大光照强度的方向。然后根据轴对该光照方向的敏感度从初始方向向光照方向逐渐趋近。一般枝条对各方向的敏感度与其起始方向的夹角成反比。

Beneš 也分别用 16 个三角形、32 个三角形或 64 个三角形组合成半球形天空,用来确定光线的方向<sup>[57]</sup>。

##### 4.4.3 树冠光能分布的计算

树冠中光能的分布以及光在农田或树林中的传输对于研究植物的光合作用、向光形态、透光效果非常重要,传统的方法主要是基于实测建立统计模型。但是,该方法在建立完整的光能分布模型方面能力有限。近年来,更多的研究结合了计算机图形学算法(表 2)。

为了能尽可能准确地计算树冠中光能的分布,应考虑以下三点建议。

1) 树冠中的光主要包括三部分:直射的阳光、环境中的泛光、器官之间相互漫反射的光,其中直射的阳光是能量的主要成分。为了能全面准确地计算树冠中光能分布,各种算法应综合应用。

2) 阳光不仅受到气候的影响,而且太阳位置随时间、季节不断变化。因此,精确地计算树冠中光能的分布,建立一个合理的阳光照射模型非常必要。

3) 植物在生长过程中,枝条结构和器官数量不断变化,结合基于生长机理的植物动态



生长模型,对于计算光能分布非常重要.

植物虽然枝叶繁多,但具有典型的自相似结构.不仅植物的叶、果实、花朵及各级枝条结构之间非常相似,而且同类的整棵植物之间也非常相似.可以利用植物本身结构的特点,用较少的参数近似地表达植物结构,并用于计算植物的光能分布.因此,我们认为分层辐射法(hierarchical radiosity)更具优势.

表 2 计算树冠内光能分布的主要算法

主要算法 及代表性工作	算法简介	算法评价
光线追踪算法 Mech,1996 <sup>[27]</sup> Perttunen,1996 <sup>[58]</sup> Genard,2000 <sup>[59]</sup>	首先测量实际植物的形态结构,在计算机上重建植物的三维结构.然后追踪光线的传输路径,得到每个叶片的灰度级分布,作为光能分布的直接估计.	简单易用,速度慢,精度不高.主要适用于计算直射的阳光,以及在基于非生长机理的模型中确定光照的方向和枝干之间的相干性.
辐射度方法 Dauzat,1997 <sup>[60]</sup> Michael,1998 <sup>[61]</sup>	用辐射度方程计算几何体之间的多重漫反射.	适合计算环境中的泛光及器官之间相互漫反射的光能.
分层辐射法 Soler,2000 <sup>[62]</sup>	利用植物具有典型的自相似结构,首先计算样本的光照效果,然后通过仿射变换扩展到与之相似的几何体.	算法速度较快,占用内存较少.适用于基于生长机理的植物模型.

#### 4.4.4 树叶颜色随季节的变化

Chiba 根据植物的种类,通过估计每片叶子上得到的光照总量和叶子每部分的最明亮处的方向,模拟了树叶颜色在秋天的逐渐变化<sup>[63]</sup>.并且考虑了其它因素,如叶片上离叶柄和主叶脉较远的部分先衰老,然后扩展到整个叶片等.

#### 4.4.5 枝干纹理的生成

在绘制较粗的树木枝干时,为了形象逼真,一般需要贴加纹理.通常把真实植物的一段枝干的纹理处理成数字图片,在绘制植物图形时,进行纹理映射<sup>[64]</sup>.为了加速图形显示,也可以用数学方法生成枝干纹理,如 Oppenheimer 根据分形噪音产生的锯齿波作为纹理上任意一点的值.通过指定隆起部分的数目及纹理的粗糙度,就产生了凸凹不平的树皮状纹理<sup>[21]</sup>.

## 5 软件开发及其应用

植物生长的建模与可视化有着广阔的应用前景.一方面可以用于农林业中植物的科学研究、生产过程管理、产量优化模拟与预测、城市景观设计等;另一方面,它在娱乐、商业、教育等行业中显示了巨大的潜在市场,如虚拟现实、计算机动画、游戏软件、商业广告、教育软件等方面.如前所述,植物计算机模型根据应用目的大致可归结为以农林业应用为背景的模型和非农林业应用为背景的模型两大类.由于应用目的不同,其相应的软件功能和实现方式也产生了很大的差异.因此,相应地植物模拟软件也可分为两大类:应用于农林业研究的软件和单纯植物外观形态的模拟软件.表 3 给出了当前世界上比较著名的植物生长模拟软件.下面就两种类型的软件分别讨论.



表3 目前国际上已开发的虚拟植物生长软件

国家	研究机构或公司	软件名称	研究方法	主要研究内容	网站域名
美国	USDA, Mississippi State University, Clemson University.	—GOSSYM/COMAX —CottonPlus	基于棉花生理生态建模方法	棉花生长过程管理专家系统	<a href="http://www.wiz.uni-kassel.de/model_db/mdb/gossym.html">http://www.wiz.uni-kassel.de/model_db/mdb/gossym.html</a>
	USDA Forest Service	SVS	—基于图形学的方法 —应用少量植物学知识	植物群丛的模拟	<a href="http://forsys.cfr.washington.edu.cn">http://forsys.cfr.washington.edu.cn</a>
	Onyx Computing Inc.	—Tree Cyberstore —Tree Professional —Tree Painter —Tree Classic	—基于图形学的方法 —应用少量植物学知识	—制作植物图形库、叶片库等 —用于快速生成植物图形	<a href="http://www.onyxtree.com/">http://www.onyxtree.com/</a>
	AnimaTek International, Inc.	World Bulider	基于图形学的方法	—制作各种自然景物 —用于景观设计	<a href="http://www.animatek.com">http://www.animatek.com</a>
澳大利亚	Centre for Plant Architecture Informatics, headquartered at the University of Queensland	Virtual Plants	基于 L-系统建模方法	—模拟棉花、大豆、玉米等农作物以及植物根系的生长 —病虫害对植物生长的影响	<a href="http://www.cpai.uq.edu.au/">http://www.cpai.uq.edu.au/</a>
法国	CIRAD	AMAP 系列软件	—自动机模型 —基于植物学建模方法	—植物生长过程测量、建模 —3D 植物图形库 —景观设计、园林规划	<a href="http://www.cirad.fr/produits/amap/amapen.html">http://www.cirad.fr/produits/amap/amapen.html</a>
	Universities of Clermont-Ferrand	ECOSIM	图像分割、遗传算法、multi-agent	—生态环境的模拟 —森林生长的模拟	<a href="http://www.isima.fr/ecosim/">http://www.isima.fr/ecosim/</a>
加拿大	University of Calgary	—CPFG —L-Studio	—基于 L-系统建模方法 —应用少量植物学知识	—L-系统与植物形态关系 —计算机辅助景观设计 —植物学教学 —再现灭绝的树种	<a href="http://www.cpsc.ucalgary.ca/Redirect/bmv/index.html">http://www.cpsc.ucalgary.ca/Redirect/bmv/index.html</a>
	Daylon Graphics Ltd	Leveller	基于图形学的方法	基于 GIS 数据的植被地貌恢复	<a href="http://www.daylongraphics.com">www.daylongraphics.com</a>
日本	岩手大学	—Virtual Gardening —Virtual BONSAI —Digital Landscapes	—建立了对环境敏感的植物生长模型 —根与土壤相互作用模型	—植物生长特性,如自我修剪、光照对植物的影响,植物根系的生长等 —景观模拟	<a href="http://www-cg.cis.iwate-u.ac.jp/lab/index-e.html">http://www-cg.cis.iwate-u.ac.jp/lab/index-e.html</a>
德国	Kurtz-Fernhout Ltd.	—Garden with Insight —PlantStudio	—基于图形学的方法 —应用少量植物学知识	—花园模拟 —生成植物图片	<a href="http://www.kurtz-fernhout.com">http://www.kurtz-fernhout.com</a>
	University of Karlsruhe (Greenworks Gbr)	Xfrog	基于图形学建模方法	用交互式方法快速建造各种植物图像	<a href="http://www.greenworks.de">http://www.greenworks.de</a>



## 5.1 应用于农林业研究的软件

这类软件的共同特点是需要对植物的生长发育进行长期、大量的测量. 根据所测得的数据拟合表现出植物各种生长参数的变化规律, 建立植物生长发育计算机模型, 并结合其它植物的生态生理模型, 定量地模拟植物的生长发育过程. 棉花作物可能是植物生长软件在农林业应用中最为成功的例子. 20 世纪 70 年代初, 美国农学家建立了初步的棉花生长模拟系统, 并于 80 年代发展了著名的 GOSSYM(GOSSypium SIMulation model)模型. 这是一个以生态生理模型为基础的应用软件<sup>[65]</sup>. 它包括了棉花地上部分的生长发育和产量形成, 光合作用的积累和分配, 棉花根系生长以及氮素、水分的吸收和利用等一系列机理性模拟. 之后, 该软件与 COMAX 相结合, 增加了棉花管理操作方面的内容, 如种子播期、种植密度、施肥灌溉等<sup>[36]</sup>. CottonPlus 是在 GOSSYM/COMAX 软件的基础上发展的新的棉花管理系统<sup>[66]</sup>. 它可实时地计算并显示出单株棉花的生长发育、形态发生和产量形成, 以及土壤剖面水分、氮素、氨和有机质等的变化. 以上这些软件在实际应用中已经取得了可观的经济效益<sup>[67]</sup>.

Virtual Plants 是澳大利亚研究者开发的应用软件. 主要用于模拟棉花、大豆等农作物的生长过程和病虫害对植物生长的影响, 研究棉花和虫子之间交互作用. 但目前该软件只能定性地模拟, 距应用于农林业生产还有相当的距离.

我国研究工作者也对棉花生长及其管理开展了研究工作. 如潘学标等于 1996 年开发的 COTGROW 棉花生产管理系统<sup>[68]</sup>. 它是融气象、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.

早期的软件开发与应用一般限定作物对象. 进入 20 世纪 90 年代后, 一些研究者开始考虑发展通用的农作物生产管理软件. 这些软件包括: APSIM<sup>[69]</sup>, GePSi<sup>[70]</sup>, GPSF<sup>[71]</sup>, SPASS<sup>[67]</sup>, OWSimu<sup>[72]</sup>等. 以德国慕尼黑技术大学发展的 SPASS(Soil-Plant-Atmosphere System Simulation)为例, 该软件包括了作物、土壤、小气候(microclimate)三个部分子模块, 共 22 个方面的数据处理内容. 这些内容基本涵盖了作物生长中的主要信息.

法国 CIRAD 开发的 AMAP 系列软件在植物生长机理模型与可视化模型结合方面取得了卓有成效的进展<sup>[11, 73]</sup>. 该软件包括若干个子系统软件, 以完成不同的应用功能. 如 AMAPmod 子系统软件主要用来建立具体植物的生长发育模型. AMAPsim 子系统软件根据 AMAPmod 所建立的描述植物生长、死亡、枝条分布情况的植物模型和三维可视化植物的生长过程. AMAPpara 的目标在于模拟环境对植物生长的影响. 该软件用参考轴技术描述植物的拓扑结构, 通过用体元素的方法表示植物的枝条, 能模拟在植物之间生长过程中枝条之间的相互碰撞、障碍物对植物生长的影响以及植物的向光性. 在 AMAPhydro 中, 建立了植物水动力模型(hydraulic model). 该模型模拟了用类似电阻的方法计算叶片和枝干及枝干对植物体中水分传输的影响, 根据各器官所得到的水分的多少模拟植物体内营养物质的产生和分配过程, 并能模拟植物形态结构对植物生长的影响. 所计算出植物各器官的生长变化曲线, 如节间的伸长和叶片的扩展的变化曲线, 已经与棉花和小麦等作物的测量参数进行了验证, 取得了较好的一致. 但由于植物生长过程的复杂性, AMAP 软件目前的主要应用领域仍在景观设计方面.

## 5.2 单纯植物外观形态模拟软件

这类软件的共同特点是不需要应用复杂的植物生长机理模型, 目的是简便快速地生成



美丽逼真的植物图形,侧重于计算机图形学。

加拿大 Calgary 大学开发的植物模拟软件 CPFPG,基于 L 系统,使用者首先根据其预先定义的解释符号,编制所要模拟的植物的 L 系统产生式,然后根据这些产生式生成植物图形。该软件功能较强,理论上能生成各种植物图形,但使用复杂,理解困难,交互性差,不易快速生成使用者期望的植物图形。

为此,一些软件采用图形化、交互式的植物参数输入方式,以使用户在仅需少量的植物学知识或不需要任何植物学知识的情况下也能快速构造出视觉上栩栩如生的植物图形。如德国 Kurtz-Fernhout 公司的 PlantStudio 软件应用一些图符表示植物的分生组织、分枝结构、花序、叶序、节间、花朵、叶片、果实等的具体属性。例如针对节间,分别用三组共 14 个图符表示节间的粗细、长短、弯曲形状等属性。用户只需通过鼠标点击图形,就可以输入植物参数。德国 Karlsruhe 大学的 Xfrog 软件定义了一些表示植物器官、植物结构、全局变量和功能函数的小图符,每个图符有描述其具体属性的参数表,将这些图符作为构筑植物结构的部件,通过组合这些图符生成植物<sup>[74]</sup>。该软件以整个枝条为单位构造植物,虽然不符合植物的实际生长特点,但作为一个纯图形学意义上的植物模拟软件,参数输入方法结构条理,容易操作。美国农业部的 SVS 软件定义了一组控制树冠形状的参数,并由滑块控件来调节,用户通过鼠标调节滑块位置,能很快得到比较满意的树冠形状。

有些软件还建立了常见植物图形库。使用者仅需选择植物种类、输入植物年龄及少量随机变量参数,就可以得到逼真的植物图片。例如 onxy 公司的 TREE CLASSIC 建立了具有 200 多种常见植物的三维植物图形库;AMAP 软件也模拟了约 400 多种植物,已经作为植物图形库在一些三维动画商用软件(如 MAYA,SoftImage 等)中得到使用。

## 6 存在的主要问题及发展前景

植物生长建模的研究基本上可以认为始于 20 世纪 60 年代末至 70 年代初。在这过去的 30 多年里,植物生长的建模、仿真与可视化研究和应用已经得到了相当程度的发展。然而,它对人类生活的影响才刚刚开始,未来的发展很快会超出人们的想象。尽管如此,下面我们根据目前研究中存在的一些主要问题,提出该领域的发展前景,以期引起更多学者的讨论,从而加深我们对问题的全面认识,有目标地加强今后的研究工作。

### 6.1 植物生长机模型体系的发展与完善

可以说,到目前为止以植物为对象的建模方法远未完善,形态发生模型研究与生态生理模型的集成研究工作很少。我们认为单纯的分形方法在实现各种植物构造模型方面能力有限,且缺少与生态生理模型的接口方式。以自动机为主的随机过程方法,基于形式化语言的 L 系统方法,微分方程描述的传统数学方法,以及人工智能方法等均表现了各自的优越性。从原理上讲,L 系统为植物生长拓扑结构以至几何形态建模提供了一个很好的理论体系,并与 AMAP 软件中的随机过程方法及分形等其它方法在数学上具有等效关系。但是,应用 L 系统中语言编程方式对于理解植物的具体拓扑结构关系并不具备优越性。如果将 L 系统实施分为设计(信息压缩)与计算(信息膨胀)两个阶段<sup>[75]</sup>,目前仍然缺少 L 系统的设计方法。怎样根据已知的植物学知识归纳、抽象出有关植物生长的语言式描述规则并不是一件简单的工作<sup>[4]</sup>。相比之下,基于状态转移图式的随机过程参数输入方法(AMAP 及双尺度自动机



模型)在设计与应用上更为简单、直接. 如何直观地、合理地引入植物学知识将是植物形态发生模型建模的关键.

由于植物生长是多变量、多机理的过程,因此总结植物生长规律,建立植物生长过程中众多的生态生理数理关系仍是亟待发展的研究课题. 模型方法为科学研究植物提供了强有力的工具. 然而,构造植物模型还需要大量的、各个局部内容的科学基础研究积累. 如发育与形态发生、光合作用、呼吸、水肥吸收与利用、土壤、大气、病虫害、农艺措施等. 系统地将科学理论基础与各类建模方法集成,并有机地将形态发生与生态生理两个模型结合为生长机模型,将是植物生长机模型体系研究的主要内容. 建模体系方法的简易性、可理解性、普适性、定量化能力等将是该体系方法完善与否的主要考察指标.

## 6.2 植物三维形态自动测量系统

植物生长过程中三维形态数据采集是植物建模的重要环节之一. 它直接影响了模型的有效性及其可靠性研究. Moulia 与 Sinoquet 对各种数字化测量方法进行了总结,主要包括机械式装置与超声波方法. 应用多摄像机实现植物三维建模研究的,包括 Ivanov 等人对玉米的测量<sup>[76]</sup>,以及严涛等对树类植物的测量<sup>[77]</sup>. 但是,该方法仍然需要大量的人工干预处理. 发展对于各类植物三维形态实现快速、准确、无损的自动测量技术是一项有难度的课题,特别是对于高大的植物以及地表下植物器官等的测量. 与该技术相关的整个模型系统自动定标同样是需要关注的课题. 植物生长形态自动数据采集系统的另一个重要应用前景是农作物、花卉、果树、林木、中草药等经济植物的自动化生产管理与控制.

## 6.3 关于模型有效性及其评价方法的研究

模型有效性检验是任一模型建立与应用中不可忽视的问题. 有效性检验大致可以分为校核(verification)与验证(validation)两个层次. 校核研究主要是针对模型中的真实性或机理功能方面进行检验. 应用植物学原理建模的真实性程度直接受限于我们对植物生长机理的理解. 另一方面,有些机理过程(如光合作用、干物质分配等)并非是直接可观测的. 这都给模型校核带来困难. 验证研究可同时适用于机理类模型与非机理类模型(如神经网络). 它将主要考察数学模型与物理对象在系统响应特征方面的等价精度. 到目前为止,缺少对于植物生长机模型在校验与验证方面的系统性研究工作. 在基于视觉效果真实性的植物体可视化研究中,目前多采用一种主观的评价方式(如光照检验). 这显然是不适合于方法的优劣比较. 如何根据认知科学原理,设定主-客观性综合评价指标,应该是今后可视化研究中予以关注的课题. 建立并发展一套通用的、可量化的模型评价方法,将会促进模型方法有效性问题的研究.

## 6.4 植物生长可视化

自然植物形体的复杂性、多样性及日控变化等特点,对于计算机可视化提出了众多的难题. 如在植物器官的绘制方面,怎样模拟如卷心菜的叶子等植物器官的交错盘绕,以及蝶形、唇形、轮状花冠等比较复杂花形的绘制,仍然是有趣而又具有难度的研究课题. 可以认为,植物体形态的复杂性与计算时间和空间的矛盾将一直是可视化研究中的重点问题. 如何利用植物本身固有的特性,有效地降低植物渲染的复杂性,改进渲染算法,以及与计算机硬件技术结合以提高渲染速度等,依旧是今后植物可视化研究需要解决的难点. 植物在外力影响下的动态变化,如枝条在风中摇曳、草丛随风波动等,对于构成生动的自然场景非常重要. 目前这方面的可视化技术还处于初始发展阶段<sup>[78]</sup>. 另外,结合虚拟现实技术,实现真实感很强的



三维漫游式植物体可视化和人机交互等,也都是植物可视化研究的方向。

### 6.5 各类信息的综合集成及多学科知识融合

植物生长建模研究应该以综合各类信息技术为途径,扩展并强化它在农林业中的广泛应用。目前,该研究已经包括了综合应用遥感(RS)技术、地理信息系统(GIS)、全球定位系统(GPS)、网络技术、传感技术、自动控制、人工智能、多媒体等。如法国 AMAP 软件在景观设计中已经结合了 GIS 技术,以实现对真实地貌场景的建模。应用网络系统为农作物管理决策支持提供远程服务标示了信息化农林业发展的重要方向<sup>[72,79,80]</sup>。植物生长建模内容将在此类农作物管理决策支持系统中占有重要的地位。以文字、语音、图像结合的多媒体技术可以为用户提供直观、形象的网络远程服务与技术支持。

植物生长建模是十分具有挑战性的研究领域。传统的单学科、经验式、定性化研究方法已无法满足要求,需要各学科知识互相渗透、互相融合。控制论中的许多基础理论知识将为建模方法带来启迪,如动态系统辨识、植物—土壤—大气的模型耦合分析、稳定性分析、随机过程控制等。同时,新的人工智能技术也为植物建模研究带来新的思路和方法,如可以将 Multi-agent 技术用于植物与环境的交互作用模拟中。通过将植物和环境定义为智能体,以实现对植物群落的仿真研究。可以认为,植物生长建模将是信息农林业中的核心与基础技术。多学科知识融合以及各类信息技术综合集成将是推动植物生长建模理论发展与实际应用的必由之路。

### 6.6 软件开发及其应用

由于单纯地生成视觉效果上形象逼真的“虚拟植物”图形技术已日趋成熟,以教育、娱乐为应用背景的植物软件将会得到更加迅速的发展。如建立各种三维植物图库,包括常见植物、濒危植物、古生植物、中草药等。全面、完整的植物图库将是数字图书馆或电子百科全书的重要收集内容。各种游戏软件也将不可避免的包括植物图形。

然而,以农林业为应用背景的软件开发将是一项艰巨、长期的研究任务。这主要是由于人们对植物生命体的认识不够全面,现有的模型方法远未完善,以及农林业应用对于模型仿真结果可靠性的严格要求。因此,软件应用内容将会经历一个由局部—全面的发展过程。以农作物为例,最终的应用目标是生成包括品种选择、播期确定、水肥管理、病虫害防治、农艺措施、产量预测等各种内容的植物生产管理软件系统,以及包含监测、控制内容的软硬件系统。在林业方面,虽然以景观设计、植被恢复再现为内容的应用取得了可喜的演示结果(AMAP 软件),但有关全面的(如包括各种生理功能模型)模拟树木生长过程仍是有待研究的课题。另一方面,以森林生产为应用目的的软件开发将是重要的方向,其内容可包括造林密度、混交林效果、间伐方式、产量及品质优化等。最为挑战的课题将是以植被群体为规模的自然或人工(如农林复合, agroforestry)生态系统建模研究。在植物—土壤—大气—其它生物生态复杂大系统中,植物模型将以子系统形式出现。各子模型将表现着较强的动态耦合特征,这将使系统因果关系分析变得更为困难。

除上述问题外,以植物为对象的软件开发还存在许多其它特有的问题需要解决。首先是植物生长数据输入的界面设计,这在以农林业为应用背景的软件开发中尤为重要。由于实际应用中会涉及到众多的模型输入参数,这就要求应用软件具有简易、友好的用户界面输入方式,使用户能够交互地完成参数输入过程。其次,植物体连续、分枝的特有结构为发展标准化的植物类软件方法提供了可能。标准化内容可以包括软件结构、数据库形式、面向对象的算



法、植物体几何形态/生理状态的描述方式、数据输出格式及交互功能等. 该标准化软件应该不受计算机软硬件平台的限制. 这方面研究将是有相当难度的课题. 再有, 优化计算应该成为软件开发中的重要研究内容. 优化计算不仅可以得到有依据的植物生产优化管理方案, 同时还节省了大量的人力、物力及时间. 另一方面, 模型参数估计中不可缺少优化计算. 对于植物这样的生物体, 应用上百个内外参数进行优化计算是完全可能的. 发展和应用快速、近似全局最优的优化算法是不容忽视的问题. 最后, 作为应用软件, 它还有许多共性的软件技术问题本身需要解决, 如并行处理、构件化、复用技术、可移植性、软件测试与维护等.

可以预料, 信息农林业与信息娱乐业将是迅猛发展的朝阳产业. 植物生长建模及可视化仿真软件将会扮演着十分重要的角色. 我们期待它在将来能同时造福人们的物质世界与精神世界.

### 6.7 科学与艺术的结合

长久以来, 科学与艺术被认为是两个不同的人类活动领域. 然而, 随着计算机技术的迅猛发展以及人们文化生活的增长需求, 科学与艺术相结合将成为 21 世纪中人类活动的新潮流. 目前已经发展的许多新兴研究领域, 如计算机图形学、人-机交互艺术学、科学可视化、人工生命、媒体博物馆等<sup>[81]</sup>, 已经表明了这一趋势. 植物是大自然恩赐予人类最珍贵的礼物, 它不仅是人们赖以生存的物质来源及获取新鲜空气的渠道, 也同样是启迪人们智慧、净化人们灵魂的精华艺术作品. 例如, 仅是植物中花瓣的形态图案、纹理细节、色彩搭配等就组成了宏大的五彩缤纷、个性昂然的自然图库. 科学寻真, 艺术求美. 植物为人们将科学与艺术的融合提出了众多美妙的课题, 它将引导科学家与艺术家合作探索真与美共存的大自然造物.

### 参 考 文 献

- 1 Godin C, Carglio Y. A multiscale model of plant topological structures. *J Theor Bio*, 1998, **84**(3), 191:1~46
- 2 Thornley J H M, Johnson I R. *Plant and Crop Modeling: A Mathematical Approach to Plant and Crop Physiology*. New York: Oxford University Press, 1990
- 3 Elizondo D A, McClendon R W, Hoogenboom G. Neural-network models for predicting flowering and physiological maturity of soybean. *Transactions of the ASAE*, 1994, **37**:981~988
- 4 Prusinkiewicz P. Modeling of spatial structure and development of plant; A review. *Scientia Horticulturae*, 1998, **74**:113~149
- 5 Marcelis L F M, Heuvelink E, Goudriaan J. Modeling biomass production and yield of horticultural crops; A review. *Scientia Horticulture*, 1998, **74**:83~111
- 6 Kruszewski P. An algorithm for sculpting trees. *Computers and Graphics*, 1999, **23**:739~749
- 7 de Reffye P, Edelin C, Francon J *et al.* Plant models faithful to botanical structure and development. *Computer Graphics*, 1988, **22**(4):151~158
- 8 Prusinkiewicz P, Hanan J. *Lindenmayer Systems, Fractals, and Plants*. New York: Springer-Verlag, 1990
- 9 Prusinkiewicz P, Lindenmayer A. *The Algorithmic Beauty of Plants*. New York: Springer-Verlag, 1990
- 10 Thornley J H M, Johnson I R. *Plant and Crop Modeling: A Mathematical Approach to Plant and Crop Physiology*. New York: Oxford University Press, 1990
- 11 Bouchon J, de Reffye P, Barthelemy D. *Modelisation et Simulation de l'Architecture des Vegetaux*. Paris, INRA, 1997
- 12 de Reffye P, Fourcaud T, Blaise F *et al.* A functional model of tree growth and tree architecture. *Silva Fennica*, 1997, **31**:297~311
- 13 de Reffye P, Houllier F. Modeling plant growth and architecture; Some recent advances and applications to agrono-



- my and forestry. *Current Science*, 1997, **73**:984~992
- 14 Prusinkiewicz P, James M, Mech R. Synthetic topiary. *Computer Graphics*, 1994, **28**(3):351~358
- 15 Le Bot J, Adaniwucz S, Robin P. Modeling plant nutrition of horticultural crops: A review. *Scientia Horticulturae*, 1998, **74**:47~81
- 16 Hoogenboom G. Contribution of agrometeorology to the simulation of crop production and its applications. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2000, **103**:137~157
- 17 Viennot X G, Eyrolles G. Combinatorial analysis of ramified patterns and computer imagery of trees. *Computer graphics*, 1989, **23**(3): 31~39
- 18 Reeves W T. Particle systems——A technique for modeling a class of fuzzy objects. *Computer Graphics*, 1983, **17**(3):359~376
- 19 Smith A R. Plants, fractals and formal languages. *Computer Graphics*, 1984, **18**(3):1~10
- 20 Aono M, Kunii T L. Botanical tree image generation. *IEEE Comput. Graphics & Appl.*, 1984, **4**(5):10~34
- 21 Oppendheimer P E. Real time design and animation of fractal plants and trees. *Comput Graphics*, 1986, **20**(4):55~64
- 22 Barnsley M F, Demko S. Iterated function systems and global construction of fractals. *R Soc London Ser*, 1985, (A399):243~275
- 23 Barnsley M F, Elton J H, Hardin D P. Recurrent iterated function systems. *Constructive Approximation*, 1989, **5**:3~31
- 24 Prusinkiewicz P, Hammel M. Automata, language, and iterated function systems. In: *Fractal Modeling in 3D Computer Graphics and Imagery*, J C Hart, F K Musgrave (eds.), ACM SIGGRAPH, Course Note C14, 1991. 115~143
- 25 Reeves W T, Blau R. Approximate and probabilistic algorithms for shading and rendering structured particle systems. *Computer Graphics*, 1985, **19**(3):313~322
- 26 Prusinkiewicz P, Lindenmayer A, Hanan J. Developmental models of herbaceous plants for computer imagery purpose. *Computer Graphics*, 1988, **22**(4):141~150
- 27 Mech R, Prusinkiewicz P. Visual models of plants interacting with their environment. *Computer Graphics*, 1996, **30**(3):397~410
- 28 Prusinkiewicz P. A look at the visual modeling of plant using L-system. *Agronomic*, 1990, 211~224
- 29 Prusinkiewicz P, Hammel M, Mjolsness E. Animation of plant development. *Computer Graphics*, 1993, **27**(3):351~360
- 30 赵星, de Reffvye P, 熊范纶, 胡包钢, 展志岗. 虚拟植物生长的双尺度自动机模型. *计算机学报*, 2001, **24**(6):608~615
- 31 Prusinkiewicz P, Hammel M. Automata, language, and iterated function systems. In: *Fractal Modeling in 3D Computer Graphics and Imagery*, J C Hart, F K Musgrave (eds.), ACM SIGGRAPH, Course Note C14, 1991. 115~143
- 32 Prusinkiewicz P, Hammel M. Language-restricted iterated function systems, Koch constructions and L-systems. In: *Fractal Modeling in 3D Computer Graphics and Imagery*, J C Hart (eds.), ACM SIGGRAPH, Course Note 13, 1994, (4):1~14
- 33 Hallé, Oldeman F, R A A, Tomlinson P B. *Tropical Trees and Forest: An Architectural Analysis*. New York: Springer-Verlag, 1978
- 34 Zhan Z, Wang Y, de Reffvye P, Wang B, Xiong Y. Architectural modeling of wheat growth and validation study. In: 2000 ASAE Annual International Meeting, Milwaukee, Wisconsin, 2000
- 35 Xiong F L. Neural network based on intelligent systems in agriculture. In: *Proceedings of IFAC Workshop on Expert Systems in Agriculture*. Huangshang, China, Beijing China; International Academia Publisher, 1992
- 36 Lemmon H E. COMAX: An expert system for cotton crop management. *Science*, 1986, **233**:29~33
- 37 Center B, Verma, B P. A fuzzy photosynthesis model for tomato. *Transactions of the ASAE*, 1997, **40**:815~821



- 38 Hammel M S, Prusinkiewicz P, Wyvill B. Modeling compound leaves using implicit contours. In: Proceeding of Computer Graphics International'92, Tokyo, 1992. 119~212
- 39 Espana M L, Baret F, Aries F *et al.* Modeling maize canopy 3D architecture application to reflectance simulation. *Ecological Modeling*, 1999, **122**:25~43
- 40 Jules B. Modeling the mighty maple. *Computer Graphics*, 1985, **19**(3):305~311
- 41 Weber J, Penn J. Creation and rendering of realistic trees. In: Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, ACM SIGGRAPH, Los Angeles, California, 1995. 119~128
- 42 de Reffye P. Essai sur les relations entre l'architecture d'un arbre et la grosseur de ses axes végétatifs, Modélisation et simulation de l'architecture des végétaux. INRA éd., Sciences Update, 1997. 255~423
- 43 Fourcaud T, Lac P. Mechanical analysis of the form and internal stresses of a growing tree by the finite element method. In: Engineering Systems Design and Analysis, Engin, 1996. 213~220
- 44 郭焱. 作物生长与模拟的可视化研究——以玉米为例[博士学位论文]. 北京:中国农业大学, 1997
- 45 Deussen O, Lintermann B. A modeling method and user interface for creating plants. In: Graphics Interface97, Morgan Kaufmann, San Francisco, 1997. 189~197
- 46 Hoppe H. View-dependent refinement of progressive meshes. In: SIGGRAPH'97 Conference Proceedings, 1997. 224~231
- 47 Massall D, Fussel D S, Campbell A T. Multiresolution rendering of complex botanical scenes. In: Processings of Graphics Interface 97, 1997. 97~104
- 48 Gardner G Y. Simulation of natural scenes using textured quadric surface. *Computer Graphics*, 1984, **V18**(3):11~20
- 49 Kajiya J T, Kay T L. Rendering fur with three dimensional textures. *Computer Graphics*, 1989, **V23**(3):271~289
- 50 Neyret F. A general and multiscale model for volumetric textures. In: Proceedings of Graphics Interface 95, 1995. 83~91
- 51 Kay T L, Kaija J T. Ray tracing complex scenes. *Computer Graphics*, 1986, **20**(4):269~278
- 52 Hart J C, DeFanti T A. Efficient anti-aliased rendering of 3D linear fractals. *Computer Graphics*, 1991, **V25**:91~100
- 53 Hart J C. The object instancing paradigm for linear fractal modeling. In: Proceedings of Graphics Interface 92, 1992. 224~231
- 54 Dussen O, Hanrahan P, Lintermann B, Mech R, Pharr M, Prusinkiewicz P. Realistic modeling and rendering of plant ecosystems. In: Proceedings of the ACM SIGGRAPH Conference on Computer Graphics, 1998. 275~286
- 55 Greene N. Voxel space automaton: modeling with stochastic growth processes in voxel space. *Computer Graphics*, 1989, **23**(3):175~184
- 56 Blaise F, Barczy J F, Jaeger M *et al.* Simulation of The Growth of Plants Modeling of Metamorphosis and Spatial Interactions in the Architecture and Development of Plants. New York: Springer-Verlag, 1998. 81~101
- 57 Beneš B. Skylight approximation for simulation of plant development. In: Proceedings of the IEEE Symposium on Information Visualization, 1998. 146~150
- 58 Perttunen J, Sievänen R, Nikinmaa E *et al.* Lignum: A tree model based on simple structural units. *Annals of Botany*, 1996, **V(77)**:87~98
- 59 Genard M, Baret F, Simon D. A 3D peach canopy model used to evaluate the effect of tree architecture and density on photosynthesis at a range of scales. *Ecological Modeling*, 2000, **V128**:197~209
- 60 Dauzat J, Eroy M N. Simulating light regime and intercrop yields in coconut based farming systems. *European Journal of Agronomy*, 1997, **7**:63~74
- 61 Michael C, Bruno A. The nested radiosity model for the distribution of light within plant canopies. *Ecological Modeling*, 1998, **111**:75~91
- 62 Soler C, Sillion F. Hierarchical instantiation for radiosity. In: B Peroche, H Rushmeier eds. Rendering Techniques'00, New York, NY, Springer, 2000. 173~184



- 63 Chiba N, Ohshida K. Visual simulation of leaf arrangement and autumn colours. *The Journal of Visualization and Computer Animation*, 1996, **7**:79~93
- 64 Bloomenthal J. Modeling the mighty maple. *Computer Graphics*, 1985, **19**(3):305~311
- 65 Reddy V R, Baker D N, Jenkins J N. Validation of GOSSYM: part II. Mississippi conditions. *Agri Syst*, **17**:133~154
- 66 Lemmon H, Chuk N. Object-oriented design of a cotton crop model. *Ecological Modeling*, 1997, **94**:45~51
- 67 Wang E, Engel T. SPASS: A generic process-oriented crop model with versatile windows interfaces. *Environmental Modeling & Software*, 2000, **15**:179~188
- 68 潘学标, 韩湘玲, 石元春. COTGROW: 棉花生长发育模拟模型. 棉花学报, 1996, **8**:180~188
- 69 McCown R L, Hammer G L, Hargreaves J N G *et al.* APSIM: An agricultural production system simulation model for operational research. *Mathematics and Computers in Simulation, Elsevier Science*, 1995, 3~4
- 70 Chen J, Reynolds J F. GePSi: A generic plant simulator based on object-oriented principles. *Ecological Modeling*, 1997, **94**:53~66
- 71 Gauthier L, Gary C, Zekki H. GPSF: A generic and object-oriented framework for crop simulation. *Ecological Modeling*, 1999, **116**:253~268
- 72 Pan X, Hesketh J D, Huck M G. OWSimu: An object-oriented and Web-based simulator for plant growth. *Agricultural Systems*, 2000, **63**:33~47
- 73 Jaeger M, de Reffye P. Basic concepts of computer simulation of plant growth. *J Biosci*, 1992, **17**:275~291
- 74 Lintermann B, Deussen O. Interactive modeling of branching structures. *IEEE Comput. Graphics & Appl.*, 1999, **19**(1):56~65
- 75 齐东旭. 分形及其计算机生成. 北京: 科学出版社, 1996
- 76 Ivanov N, Boissard P, Chapron M, Valery P. Estimation of the height and angles of orientation of the upper leaves in the maize canopy using stereovision. *Agronomie*, 1994, **2**:183~194
- 77 严涛. 基于图像的树木造型方法的研究[博士学位论文]. 北京: 中国科学院软件研究所, 2000
- 78 冯金辉, 陈彦云, 严涛, 吴恩华. 树在风中的摇曳——基于动力学的计算机动画. 计算机学报, 1998, **21**(9):769~773
- 79 Georgiev G A, Hoogenboom G. Near real-time agricultural simulations on the web. *Simulation*, 1999, **73**:22~28
- 80 Jensen A L, Boll P S, Thysen I, Pathak B K. Pl@nteInfo—A web-based system for personalized decision support in crop management. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2000, **25**:271~293
- 81 Sommerer C, Mignonneau L. Art @ Science. New York: Springer-Verlag, 1998

**胡包钢** 见本刊第 27 卷第 4 期.

**赵 星** 中国科技大学计算机科学系博士研究生. 主要研究方向为虚拟植物生长、计算机真实感图形绘制.

**严红平** 中国科学院自动化研究所中法实验室博士研究生. 主要从事植物生长建模与三维仿真、计算机图形学等方面的研究.

**Philippe de Reffye** 中国科学院自动化研究所, 中法信息、自动化、应用数学联合实验室(LIAMA)法方主任. 中国科学院客座教授.

**Frederic Blaise** 中国科学院自动化研究所, 中法信息、自动化、应用数学联合实验室研究员.

**熊范纶** 中国科学院合肥智能机械研究所研究员, 首席科学专家, 博士生导师.

**王一鸣** 中国农业大学电子电力工程学院教授, 博士生导师.