浙 江 林 学 院 学 报 2001，18(1)：76～79
*Journal of Zhejiang Forestry College*

文章编号：1000-5692(2001)01-0076-04

# 植物形态的模拟

高　峰
(浙江林学院 信息工程与基础科学系，浙江 临安 311300)

摘要：植物结构、植物形态以及植物生长过程的仿真与模拟，一直是人们关心的问题，深受农林工作者的重视。基于 L 系统的基本思想，讨论分形的计算机生成技术在植物的结构和形态的仿真模拟方面的应用，所做的主要工作为：将 Lindenmayer 方法应用于植物形态的模拟，同时利用 Turbo C++语言编程实现。图 5 参 5

关键词：植物形态模拟；分形；Lindenmayer 方法
中图分类号：TP391.41；Q944　　　文献标识码：A

分形的原文 Fractal，是 B. B. Mandelbrot 用拉丁词根拼造的单词，意思是细片、破碎、分数、分级等等[1]。分形是描述不规则几何形态的有力工具。不言而喻，不规则的几何形态在自然界处处可见，诸如花草、山脉、树木、云彩、火焰等。正因为如此，人们说分形是大自然的几何学。近一二十年来，分形研究受到非常广泛的重视，其原因在于分形具有深刻的理论意义，又有巨大的实用价值。分形提供了描述自然形态的几何方法，使得在计算机上可以从少量数据出发，对复杂的自然景物进行逼真的模拟，并启发人们利用分形技术对信息作大幅度的数据压缩。

在分形的诸多研究课题中，分形的计算机生成问题，具有明显的挑战性和重大的应用价值[2,3]。采用分形生成方法，可以从少量的数据生成复杂的自然景物图像，这使我们在仿真模拟技术方面前进了一大步。分形的计算机生成，有许多有效的方法，其中 Lindenmayer 方法（简称 L 系统）和迭代函数系统（简称 IFS 方法）便是典型的代表。本文基于 L 系统的基本思想，就分形的计算机生成技术在植物的结构和形态的仿真模拟方面的应用展开讨论。

## 1　L 系统

1968 年，生物学家 Aristid Lindenmayer（1925－1989）引入了一种字符串重写机制，后来被称为 L 系统。“重写”是 L 系统中的核心概念，它的基本思想是根据预先定义的重写规则集不断地生成复合形状并用它来取代初始简单物体的某些部分以定义复杂物体。通常，重写可递归地进行下去。

由于 L 系统的导入，激起了人们用字符串表示图形的兴趣。人们设想将 L 系统作为植物生长的有效模型，因此，最初的研究工作集中在基于 L 系统的植物图形的自动生成上。1979 年，Szilard 和 Quinton 提供了一种解释 L 系统的新方法。他们的工作集中在有精确定义几何的图形表示上，并且表明了简单的上下文无关 L 系统可用来生成今天被人们称之为分形的旋绕曲线。

值得指出的是，L 系统在图像生成应用中所取得的巨大成功与它的并行操作机制直接相关。因为

收稿日期：2000-08-23；修回日期：2000-10-05
作者简介：高峰(1969－)，男，江西万载人，助教，硕士，从事控制理论及其应用和计算机仿真与辅助设计等研究。

植物按并行方式生长。并行机制是植物模拟中的重要因素，所以，L 系统用于造型，是成功的应用，是植物生长的过程模拟。它的基本思想可以应用到诸如电子线路设计和建筑群体结构模拟等方面。

L 系统是一种形式语言。从形式语言上下文关系上来看，L 系统可以分为 3 类：0L 系统、1L 系统和 2L 系统[4]。其中最简单的 L 系统是 D0L 系统，D0L 系统的定义及操作为：

令 $V$ 表示字母表，$V^*$ 表示 $V$ 上所有单词的集合，$V^+$ 表示 $V$ 上所有非空单词的集合，一个字符串 0L 系统是一个有序的三元素集合 $G = < V, \omega, P >$，这里 $\omega \in V^+$ 是一个非空单词，称作公理。$P \subset V \times V^*$ 是一有限生成规则集，生成规则 $(a, x) \in P$ 写作 $a \rightarrow x$，字母 $a$ 和单词 $x$ 分别称作生成规则的前驱和后继。规定对任何字母 $a \in V$，至少存在一个非空单词，$x \in V^+$，使得 $a \rightarrow x$，若对给定的前驱 $a \in V$ 无明确解释的生成规则，则规定 $a \rightarrow a$ 这个特殊的生成规则 $(a, a)$ 属于 $P$。如果对每个 $a \in V$，当且仅当恰有一个非空单词 $x \in V^+$，使 $a \rightarrow x$，那么就说 0L 系统是确定的，记为 D0L 系统。

设 $\mu = a_1 a_2 \cdots a_m$ 是在 $V$ 上定义的任意一个单词，当且仅当对所有的 $i = 1, 2, \cdots, m$，成立 $a_i \rightarrow x_i$，则称单词 $\upsilon = x_1 x_2 \cdots x_m \in V^*$ 是直接由 $\mu$ 生成的。若存在一个单词 $\mu_0, \mu_1, \cdots, \mu_n$ 的生成序列，使 $\mu_0 = w$，$\mu_n = \upsilon$ 且 $\mu_0 \rightarrow \mu_1 \rightarrow \cdots \rightarrow \mu_n$，则称单词 $\upsilon$ 是由 $w$ 经 $n$ 次派生生成。

## 2　L 系统的几何解释

由 L 系统的定义知，字符串重写系统最后得到的是一个由特定字母组成的字符串。为使该字符串能描述某种图形，我们需要对它进行恰当的几何解释。这就要求 L 系统生成的字符串应包含必要的图形几何信息。在这里，我们引入一种龟标记的字符串图形解释。这种解释首先由 Szilard 和 Quinton 所给出：

设想 1 只乌龟在平面上爬行，其状态用 3 个值描述，记以 $(x, y, \alpha)$，其中 $x, y$ 为乌龟所在位置的直角坐标，$\alpha$ 表示乌龟头的朝向。给定爬行的步长 $d$ 及扭转方向的角度增量 $\delta$，乌龟可以反馈下述符号表示的命令（图 1）：$F$ 表示向前移动 1 步，步长为 $d$。乌龟的状态为 $(x', y', \alpha)$，其中：

$$x' = x + d\cos\alpha, \quad y' = y + d\sin\alpha。$$

从 $(x, y)$ 向 $(x', y')$ 画一直线段：$F$ 表示向前移动 1 步，步长为 $d$，不画线；+ 表示向左转 $\delta$ 角，乌龟下一状态为 $(x, y, \alpha + \delta)$，规定正向角是逆时针方向，负向角是顺时针方向；－ 表示向右转 $\delta$ 角，乌龟下一状态为 $(x, y, \alpha - \delta)$；所有其他符号均不予解释（乌龟保持当前状态）。

这样，对任一字符串 S，若 $(x_0, y_0, \alpha_0)$ 是乌龟的初始状态，$d$、$\delta$ 为固定的步长和角度参数，则可得到一个与字符串 S 相对应的图表（线段集）。该图形就是字符串 S 基于乌龟爬行规则的几何映射。例如，字符串 F→FFF－F－F＋F－F＋F－F－FFF 的乌龟爬行解释如图 2 所示，在这里 $\delta = 90°$。

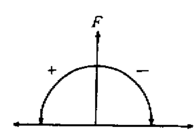


图 1　字符串 F，+，－的解释

Figure 1　Explanation of character string F，+，－

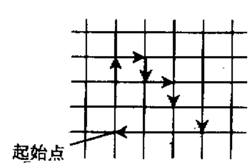


图 2　一个字符串的乌龟爬行解释

Figure 2　Explanation of turtle track of a character string

## 3　空间 L 系统及其几何解释

上述字符串的几何解释是二维的。自然，空间的情形更引人注目。要对字符串进行三维几何解释，关键是用 3 个向量表示乌龟行走的方向：$H$ 表示向前，$L$ 表示向左，$U$ 表示向上，且有 $H \times L = U$，如图 3。

令 $R$ 为旋转矩阵，乌龟行走方向的改变表示为 $(H', L', U') = (H, L, U)R$，绕 $U$ 逆时针方向旋转 $\theta$ 角的旋转矩阵用 $R_u(\theta)$ 表示，绕 $L$ 旋转及绕 $H$ 旋转的旋转

$$R_u(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$R_l(\theta)=\begin{bmatrix}\cos\theta & 0 & -\sin\theta\\ 0 & 1 & 0\\ \sin\theta & 0 & \cos\theta\end{bmatrix};\quad R_h(\theta)=\begin{bmatrix}1 & 0 & 0\\ 0 & \cos\theta & -\sin\theta\\ 0 & \sin\theta & \cos\theta\end{bmatrix}。$$

矩阵分别用 $R_l(\theta)$ 及 $R_h(\theta)$ 表示，则有下述符号控制空间情形乌龟的方位：+ 表示左转 $\delta$ 角，旋转矩阵等于 $R_u(2)$；– 表示右转 $\delta$ 角，旋转矩阵等于 $R_u(-\delta)$；& 表示绕 $L$ 下转 $\delta$ 角，旋转矩阵等于 $R_l(\delta)$；∧ 表示绕 $L$ 上转 $\delta$ 角，旋转矩阵等于 $R_l(-\delta)$；\ 表示绕 $H$ 左转 $\delta$ 角，旋转矩阵等于 $R_h(\delta)$；/ 表示绕 $H$ 右转 $\delta$ 角，旋转矩阵等于 $R_h(-\delta)$；| 表示向后转 180°，旋转矩阵等于 $R_u(180°)$。

## 4 植物形态的模拟

为了形式化地描述许多植物（从菌类到树木）的分支结构，1968 年 Lindenmayer 引入了带括号的字符串。为了将模拟结构映射为电脑图形，他又引入了作用在带括号字符串上的 L 系统的几何解释。下面我们介绍带括号的字符串及作用在它上面的 L 系统的几何解释。

首先，为了描述分支结构，引入 2 个新的字符[8]。其含义为：[表示将当前乌龟爬行的状态压入堆栈，信息包括乌龟所在的位置与方向，以及即将画的线段的颜色、宽度等其他属性；] 表示从堆栈中弹出一个状态作为乌龟的当前状态，但不画线。

由于新字符的引入，使得分支结构能以简单的方式进行描述。例如，字符串 F→F［+F］F［–F］F 表示图 4 中的树。

应当指出的是，带括号的 0L 系统的派生方式与不带括号的 0L 系统是相同的，其中括号重写为其自身。这样，我们就可由文中介绍的派生方式和几何解释来生成各种二维以及三维图形。

图 5 是使用由带括号的 0L 系统在 Turbo C++ 环境下生成的一些分形植物的例子。

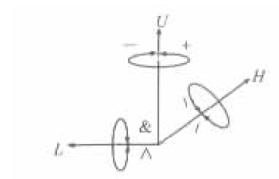


图 3 空间方向及旋转示意图

Figure 3 Sketch map of spatial direction and its circumgyratetion

图 4 带括号的字符串的几何解释

Figure 4 Geometry explanation of character string with bracket

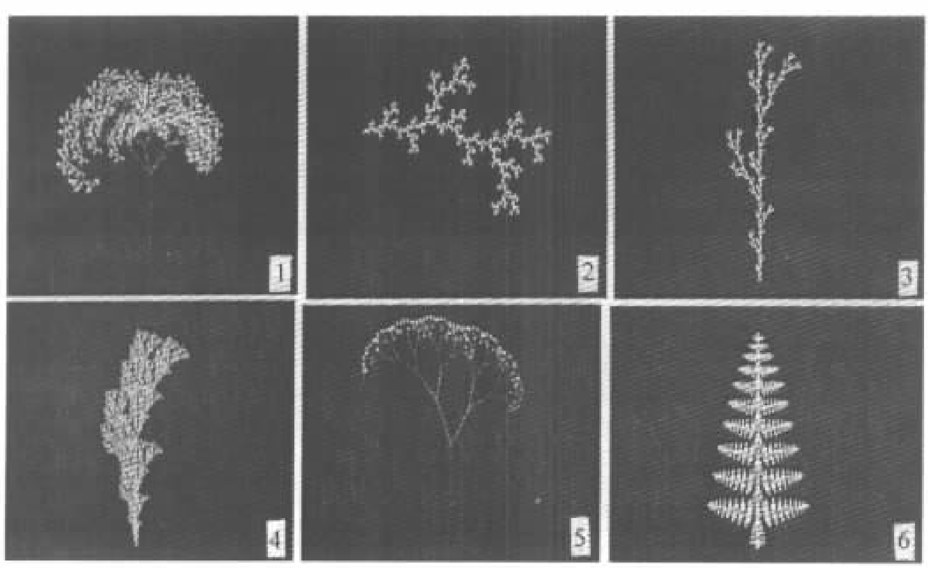


图 5 模拟效果图

Figure 5 Showing simulated results

1. 秋天花样的树木；2. 桧树的小枝；3. 模拟小树；4. 模拟树木；5. 果实累累的树木；6. 羊齿树叶

1. blooming tree in autum；2. branch of Chinese juniper；3. sapling；4. tree；5. fruifful tree；6. Leave of bracken

## 5　结束语

植物结构、植物形态以及植物生长过程的仿真与模拟，一直是人们关心的问题，深受农林工作者的重视。本文讨论的是模拟植物生长的 L 系统。由 L 系统的基本思想，可以看出，设计 L 系统（给出公理、定义生成规则）的过程是依照自相似结构形成信息压缩的过程。利用 L 系统进行绘图，则是它的逆过程，即信息的复原过程。如何从被描述的对象提取小量的信息，从而完成 L 系统的设计，这是困难的同时也是十分有意义的研究课题。另一方面，虽然 L 系统能有效地给出植物的拓扑结构，但是要想绘制真实感的二维或三维植物形态，还必须结合曲线拟合和曲面拟合等几何造型技术，这同样是一个十分有意义的研究课题。植物形态模拟图与植物形态钢笔画[5]相比有其自身独有的效果。

**参考文献：**

[1] Mandelbrot B B. *The Fractal Geometry of Nature* [M]. 上海：上海远东出版社，1998.

[2] Donald H，Baker M P. *Computer Graphics* [M]. 北京：电子工业出版社，1998. 276 – 301.

[3] 齐东旭. 分形及其计算机生成[M]. 北京：科学出版社，1994. 1 – 34.

[4] 彭群生，鲍虎军，金小刚. 计算机真实感图形的算法基础 [M]. 北京：科学出版社，1999. 414 – 422.

[5] 韩红. 植物钢笔画技巧探讨[J]. 浙江林学院学报，1996，**13** (3)：339 – 345.

# Modeling of plant physiognomy

GAO Feng

(Department of Information Engineering and Basic Science，Zhejiang Forestry College，Lin'an 311300，Zhejiang，China)

Abstract：Emulation of structure，morphology and growth in plant arouses people's interest，especially researchers in agriculture and forestry. Based on the Lindenmayer system，application of fractal computer techniques in emulation of plant morphology and structure is discussed. Lindenmayer system is used to emulate tree，sapling，branch，fruit and leaf in shape，and object figures are made with computer by use of Turbo C + + language.

Key words：emulation of plant morphology；fractal；Lindenmayer system