

基于真菌生长模型的分形图象生成算法^{*}

荆新¹ 孟祥旭²

¹(中国科学院软件研究所计算机科学开放研究实验室 北京 100080)

²(山东大学计算机科学系 济南 250100)

摘要 基于真菌生长模型,建立了环境自适应的参数 L-system. 在考虑真菌内营养物质流动控制生长的基础上,充分考虑环境对真菌生长的影响. 在此基础上,提出了基于真菌生长模型的分形图象生成算法,生成的图象分支自然、协调. 通过环境调整,可有效控制图象的生成风格,特别适合工业图案设计和动画图案设计等领域.

关键词 分形学, L-system, 参数 L-system, 环境自适应.

中图法分类号 TP391

分形学^[1]是计算机图形学领域中的研究热点之一. L-system 的提出,对于形式化的描述生物或植物的结构特征及生长过程做出了开创性的工作.^[1,2]但是,一般的 L-system 被强加给了不变的结构,使图形的几何外形太平整,显得呆板、不自然. A. Turbridge 和 H. Jones^[3]建立了基于营养物质在真菌中流动控制生长的生物模型,按生物规则进行细胞分裂和产生分支,形成了与自然真菌观察一致的结构模型,显示出非常自然的分支结构. 本文在此生物模型的基础上,提出了分形图象生成模型,产生了具有自然分支结构的图形,并进一步提出了具有营养控制和方向控制的环境自适应图象生成算法,在图象生成密度和方向上便于控制,得到了比较满意的纹理图形.

1 基于真菌生长模型的参数 L-system

一个菌丝体的生长起始于一孢子的发芽,发芽的孢子进行细胞分裂,通过延长和分支过程形成一个菌落. 菌丝的生长可看做是菌丝头吸收细胞质中胞囊(悬浮在细胞质中的小球,为菌丝提供生长所需营养物质)的结果. 按其作用和特点,将真菌细胞分为几类:未发芽的孢子 *P*、发芽的孢子 *G*、菌丝头细胞 *T*、顶端细胞 *A*、隔细胞 *M*、普通细胞 *S*、分支细胞 *B*. 代表不同细胞的字符与分支标志“[”和“]”构成 L-system 的字母表^[1,3],图 1 所示为用此字母表产生的菌丝体的一部分,其相应 L-system 字符序列为

$S S B[S B[A A A T]M A T]M A A T.$

各类细胞的性质以及由这些性质导出的部分产生式规则^[1,3]如下.

(1) $P(a)$:未发芽的孢子, a 为所含胞囊数. 此细胞产生胞囊;如果胞囊数超过阈值 V_{max} ,孢子发芽,产生一个发芽孢子 G 和一个菌丝头细胞 T . 相应的产生式为

$$P1: P(a); (a < V_{max}) \rightarrow P(a+Rp),$$

$$P2: P(a); (a \geq V_{max}) \rightarrow G((1-F)(a+Rp), F(a+Rp))T(0, 0, off, 4, 0, 0),$$

其中 R_p 为单位时间孢子产生的胞囊数, F 为胞囊流动因子 ($0 \leq F \leq 1$).

(2) $G(a, b)$:发芽孢子, a 为剩余胞囊数, b 为向右(左右分别表示接近或远离孢子,即 L-system 字符串的左右位置)传输的胞囊数. 它只产生胞囊并向右传输.

(3) $T(a, b, c, d, e, f)$:菌丝头细胞, a 为所含胞囊数, b 为细胞长度, c 是细胞核分裂标志(on/off), d 是细胞核数(初始值为 4), e 是顶端细胞 A 的个数, f 是隔信号(某顶端细胞的标号,表示在此产生一隔膜). 菌丝头细胞的性质和作用比较复杂,首先,它从左边获得胞囊,其长度增加依赖于吸收胞囊数,相应的产生式为

$$P3: T(a, b, c, d, e, f); C3 \rightarrow T(a+import-absorb, b+absorb * R1, \dots, \dots, \dots),$$

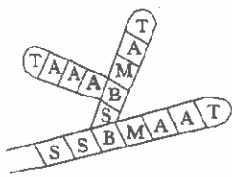


图1

* 本文研究得到国家自然科学基金和国家 863 高科技项目基金资助. 作者荆新,女,1973 年生,博士生,主要研究领域为计算机图形学. 孟祥旭,1962 年生,教授,主要研究领域为计算机图形学,图象处理.

本文通讯联系人:荆新,北京 100080,中国科学院软件研究所计算机科学开放研究实验室

本文 1997-04-28 收到原稿,1997-09-08 收到修改稿

其中 *import* 和 *absorb* 分别为从左边输入和细胞吸收的胞囊数, *R1* 为细胞吸收一个胞囊可增加的长度, 条件 *C3* 表示下面列出的菌丝头细胞产生式的抑制条件均不成立, “...”表示参数不变.

当菌丝头细胞超过最大细胞长 *Lh* 时, 应用产生式 *P4* 生成一个新的顶端细胞.

$$P4: T(a, b, c, d, e, f); (b > Lh) \rightarrow A\left(\frac{(1-F) \cdot a \cdot Lh}{b}, \frac{F \cdot a \cdot Lh}{b}, e+1, 0\right) T\left(a - \frac{a \cdot Lh}{b}, b - Lh, c, d, e+1, f\right).$$

若顶端细胞每核胞囊数大于界值, 核分裂标志设为 *on*, 准备进行分裂; 当核分裂标志设为 *on* 时, 细胞核数目以适当比率增长, 当细胞核数目大于界值 *Nmax*, 停止核分裂, 选择一适当顶端细胞生成隔膜, 将此顶端细胞序号作为信号向左传送.

(4) *A(a, b, c, d)*: 顶端细胞, *a* 为剩余胞囊数, *b* 为向右传输的胞囊数, *c* 是顶端细胞序号, *d* 是来自右端的隔信号 (若无, 则为 0). 它从左边获得、产生并向右传输胞囊; 按右边传来的隔信号决定是否转换为隔细胞 *M* 或普通细胞 *S*.

(5) *M(a, b, c)*: 隔细胞, *a* 是剩余胞囊数, *b* 是向右传输的胞囊数, *c* 是进入此细胞的胞囊流量. 它通过流量控制阻挡胞囊向右流动, 以利于分支的产生.

(6) *S(a, b)*: 普通细胞, *a* 是剩余胞囊数, *b* 是向右传输的胞囊数. 它产生并向右传输胞囊, 若所含胞囊数超过界值 *Vmax*, 产生一分支:

$$P5: S(a, b); (a \leq V_{max}) \rightarrow S(a', b').$$

$$P6: S(a, b); (a > V_{max}) \rightarrow B(a', Cm \cdot a, b' - Cm \cdot a) [T(0, 0, off, 4, 0, 0)].$$

其中

$$a' = (a + Rp)(1 - F) + import, \\ b' = (a + Rp)F.$$

Cm 是流向分支的胞囊流动因子.

(7) *B(a, b, c)*: 分支细胞, *a* 是剩余胞囊数, *b* 是向右传输的胞囊数, *c* 是流向分支的胞囊数. 它产生胞囊, 并以因子 *Cm* 将胞囊分流, 分别流向分支与主干.

此参数 *L-system* 的公理^[1,2]通常设为 *P(0)*, 图 2 即为用此参数 *L-system* 生成的字符串加上图形解释例程所生成的图形.



图 2 未加任何控制的图形

2 参数可控的图象生成模型

上节建立的 *L-system* 真菌模型利用营养流动的方法控制真菌的生长和分支, 使生成的图象具有很好的分支结构, 但此图形中的图象密度和方向难以控制. 事实上, 环境因素对真菌生长具有重要的意义, 这些因素包括环境中的营养分布状况等. 考虑这些影响, 本文提出了环境自适应图象生成算法, 建立了参数可控的图象生成模型, 通过环境设置控制真菌生长速度和方向, 完成对生成图象密度和方向的控制.

2.1 营养控制

真菌生长需从外界吸取营养, 首先建立真菌生长的营养环境, 让真菌细胞在生长过程中进行营养竞争. 本文将真菌生长环境划分成区域, 称为“营养区”, 赋予每一块营养区一个营养供给初值, 真菌细胞的生长状况依赖于所在营养区内营养供给状况, 为判断细胞隶属于哪个营养区, 在生长模型中, 为真菌生长引入了几何信息, 为 *L-system* 中代表不同细胞的字符增加了位置和方向属性参数 (*x, y, ang*), 增加了位置和方向参数的产生式如下所示.

在不增加新细胞的产生式中, 位置和方向参数不发生改变, 如

$$P1: P(a, x, y, ang); (a < V_{max}) \rightarrow P(a + Rp, \dots, \dots, \dots).$$

在增加新细胞的产生式中, 新细胞的位置 (*x', y'*) 依赖于当前细胞的位置和方向, 为产生弯曲的菌丝和分支, 方向 (*ang'*) 也发生改变, 方向的改变依赖于一个方向分布函数 *uniform(mean, std)*, 此函数返回一个满足均值为 *mean*, 标准差为 *std* 的概率分布的随机值.

$$ang' = ang + uniform(mean, std), \\ x' = x + Lh \cdot \cos(ang'), \\ y' = y + Lh \cdot \sin(ang').$$

在引起真菌延长的产生式中, 方向改变满足的均值 *Dmean* 和标准差 *Dstd* 一般设为 9° 和 3°.

$$P2: P(ax, y, ang); (a \geq V_{max}) \rightarrow G((1 - F)(a + Rp), F(a + Rp), x, y, ang) T(0, 0, off, 4, 0, 0, x', y', ang'),$$

$$P4: T(a,b,c,d,e,f,x,y,ang):(b>Lh) \rightarrow A\left(\frac{(1-F) \cdot a \cdot Lh}{b}, \frac{F \cdot a \cdot Lh}{b}, e+1, 0, x, y, ang\right) \cdot T\left(a - \frac{a \cdot Lh}{b}, b - Lh, c, d, e+1, f, x', y', ang'\right).$$

在引起分支生成的产生式中,均值 $Bmean$ 和标准差 $Bstd$ 一般设为 80° 和 15° .

$$P6: S(a,b,x,y,ang):(a>V_{max}) \rightarrow B(a', Cm \cdot a, b' - Cm \cdot a, x, y, ang)[T(0, 0, off, 4, 0, 0, x', y', ang')].$$

细胞的位置确定了细胞所隶属的营养区,所有进入此营养区的细胞共同竞争其中的资源.随着营养区内细胞数目的增多,菌落的局部密度增大,资源竞争加剧,维持细胞生长可用的营养物减少,细胞的生长速度也相应减少.在此算法中,细胞不再以常数率 Rp 生成胞囊,单位时间生成率 rp 依赖于营养区内细胞数目和营养供给状况.

若营养区内细胞数目超过允许的最大值,进入该营养区的菌丝头细胞就会因得不到足够的营养而死亡.本文在此算法中增加一个新的细胞类:死亡的菌丝头细胞 D ,它只包含位置参数 (x, y) ,与此类细胞相关的产生式如下所示.

$$P7: T(a,b,c,d,e,f,x,y,ang):C7 \rightarrow D(x,y).$$

$$P8: D(x,y) \rightarrow D(x,y).$$

$P7$ 表示若菌丝头细胞 T 在其营养区内得不到足够的营养($C7$),则死亡, $P8$ 表示死亡细胞 D 不再有任何生命活动.

营养竞争的结果使得营养丰富的地方细胞生长速度快,数目多,生成图形上表现为此区域图象密度大,相反,营养相对匮乏的地方细胞稀少,此区域图象密度也相对较小.因此,通过营养环境的设置,很容易达到控制生成图象线条密度的目的.图3所示的图形为均衡设置营养区中营养初值而产生的.



图3 增加了营养控制的图形

2.2 生命周期控制

为了模拟在纺织工业的蜡染纹理中,染料沿着蜡纹在布匹上扩展的势头随着时间的推进而减缓以至停止的效果,本文赋予菌丝头细胞一定的生命周期(只赋予菌丝头细胞生命周期,这是因为本模型假定菌丝的生长是靠头细胞的分裂来完成的),相应地为 T 设置属性参数 $life$,初始值为1.每个左边为 T 的产生式做如下变动.

$$T(\dots, life) \rightarrow T(\dots, life+1).$$

$life$ 控制细胞的生长参数 $r1$,使每个菌丝头细胞在生成初始阶段生命力最旺盛;随着时间的延长,生长速度逐步减小,大部分吸收的胞囊用于维持生命而不是细胞生长;当生命周期达到最大界值时($C7'$),细胞死亡.对产生式 $P7$ 稍加变动,得到

$$P7: T(a,b,c,d,e,f,x,y,ang):(C7 \text{ or } C7') \rightarrow D(x,y).$$

图4为增加了生命周期控制所得,与图3相比,显得比较严整.



图4 增加了生命周期控制的图形

2.3 方向控制

如同藤萝生长时人为设置引导其生长的杆或绳那样,为控制真菌的生长方向,本文为真菌的生长设置了具有相同作用的“吸引域”.在生长环境中设立几个椭圆、圆、矩形或其他形状的区域,区域由两点确定的矢量及给定宽度确定.吸引域对未进入此区域的细胞生长没有影响,一旦菌丝头细胞 T 进入某个吸引域,就会受到吸引,按分布函数 $F(x, y)$,沿着矢量的方向生长.根据吸引域形状的不同,可以构造相应的分布函数.

当 $F < 0$ 时, T 在吸引域外部;当 $F \geq 0$ 时, T 在吸引域内部(包含边界).此时,函数值反应了吸引力的大小,越靠近区域中心,吸引力越大.为使图形富于变化,在其上增加一随机扰动 $r = uniform(0, 1)$.若吸引力足够大,产生式 $P9$ 使菌丝头细胞以 $\frac{1}{2}\alpha$ 角向平行于吸引域矢量的方向偏转, α 角是 T 的原方向与吸引域矢量所成的锐角.

$$P9: T(a,b,c,d,e,f,x,y,ang):C9 \rightarrow A\left(\frac{(1-F) \cdot a \cdot Lh}{b}, \frac{F \cdot a \cdot Lh}{b}, e+1, 0, x, y, ang\right) \cdot T\left(a - \frac{a \cdot Lh}{b}, b - Lh, c, d, e+1, f, x', y', ang' + \frac{1}{2}\alpha\right).$$

其中 $C9$ 表示的条件表达式为 $((b > Lh) \text{ and } (r + F \geq 0))$.若某菌丝头细胞同时在几个吸引域内,细胞会向着吸引力最

大的矢量靠拢.图 5 为在右上角设置了一个椭圆形吸引域而生成的图形.



图 5 增加了方向控制的图形

3 结束语

本文将生物生长模型用于分形图象生成,产生了满意的效果.环境自适应 L-system 的建立,大大增加了图象生成的可控性.调整参数可以获得丰富的图形,这些纹理图形可用于图案设计和动画设计等方面.本算法已成功地应用于印花图案设计系统,模拟生成底纹、蜡纹及其他图案.当然,此模型还有不足之处,仍有进一步发展的潜力,可以根据需要进一步完善图象生成算法.另外,与生物生长模型相类似,还可建立基于渗透原理等物理模型的图象生成系统,这在图形、图象的自动生成和自然景物的计算机模拟方面有很大的用途.此领域的工作还有待进一步探索和完成.

参考文献

- 1 王东生,曹磊等.混沌、分形及其应用.合肥:中国科学技术大学出版社,1995
(Wang Dong-sheng, Cao Lei *et al.* Chaos, Fractal and Their Applications. Hefei, China University of Science and Technology Press, 1995)
- 2 Prusinkiewicz P, Lindermyer A. The Algorithmic Beauty of Plants. New York: Springer Verlag, 1990
- 3 Turbridge A, Jones H. An L-system approach to modelling of fungal growth. The Journal of Visualization and Computer Animation, 1995,6:91~107

A Fractal Image Generating Algorithm Based on Fungal Growth Model

ZHENG Xin¹ MENG Xiang-xu²

¹(Laboratory of Computer Science Institute of Software The Chinese Academy of Sciences Beijing 100080)

²(Department of Computer Science Shandong University Ji'nan 250100)

Abstract Based on the fungal growth model, the authors develop an environmentally-adaptive parametric L-system and present a fractal image generation algorithm in this paper. This algorithm not only uses biological understanding of the flow of nutrients through the fungus to control the growth, but also takes the influence of the environment which fungus grow in into full account. The images generated by this algorithm have natural branching structure. By setting the environmental factor, its global-shape feature can be easily controlled. It is especially suitable for industrial pattern design, animation image design and so on.

Key words Fractal, L-system, parametric L-system, environmentally-adaptive.