

# 森林三维真实感建模与可视化 LOD 技术研究

刘真余, 芮小平, 董承玮

(中国科学院研究生院资源与环境学院, 北京 100049)

(2010 年 4 月 12 日收稿; 2010 年 8 月 3 日收修改稿)

Liu Z Y, Rui X P, Dong C W. Study on realistic modeling of three-dimensional forest and visualization based on LOD technology[J]. Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, 2011, 28(3): 322-327.

**摘要** 基于随机参数化 L 系统的形式化语言对树木进行三维构模. 依据树木与视点的空间关系, 动态划分了基于林分的层次细节 (LOD). 对不同的细节层次采用不同的模型进行处理以达到真实感绘制. 通过调整 L 系统的迭代、分层存储树木模型、十字交叉画树等策略分别对各个层次进行渲染, 并对层级细节的渲染效率进行了比较. 实验证明, 本方法能够很好地模拟三维森林虚拟系统, 可以满足森林三维场景的真实感和实时可视化效果的要求.

**关键词** 森林, L 系统, 三维可视化, 层次细节

**中图分类号** TP391

三维可视化理论与技术引入到森林的构模和真实感实时渲染中, 使得传统静态的森林场景绘制向动态、三维交互的方向发展, 目前正成为植物学与虚拟现实 (virtual reality) 研究的重要组成部分, 其中对树木的数字化与可视化是基础.

树木三维建模和渲染的算法和技术的方法主要分为 2 类: 基于图像构造与分形自相关理论的精细描述. 图像构造主要采用纹理映射的方式贴图到布告牌上, 它的优势在于用较少的时间开销模拟景物表面细节, 但是真实感效果较差; 分形方法能够精细地描述树木自相似性的特征, 目前国内外学者对分形理论的研究主要方法归结为 2 类: L-系统、迭代函数系统 (iterated function system, IFS)<sup>[1]</sup>. L-系统是 1968 年美国植物学家 Aristid Lindenmayer 提出的以一种字符重写的参数分形方法, 由对植物生长过程的抽象和概括, 构造公理和产生集, 从而构成字符串序列, 表现出植物的空间结构<sup>[2]</sup>. 其他学者在 L 系统的基础上提出了改进, Weber 等人提出树木的分步生长模拟方法<sup>[3]</sup>, 20 世纪 80 年代, 加拿大 Calgary 大学的学者 Prusinkiewicz 等人的工作进一步扩展了 L 系统的研究范围, 并给出了大量 L 系统产生的分形集与植物结构的例子<sup>[4-5]</sup>. 迭代函数系统由 Hutchinson 在 1981 年提出, 经 Barnsley 于 1985 年系统地研究和应用后得到广泛的应用. 这种数学方法主要依据了物体整体与局部空间自相似的特点, 将总体形状以一定的概率按不仿射变换迭代下去, 直至得到满意的分形图形<sup>[6]</sup>. 该方法在表现自相似性的自然景物更为灵活. 单独利用 L 系统或 IFS 函数迭代在描述植物形态结构的研究成果颇多, 比较典型的有清华大学的郑卓嘉等人给出的树木结构特征的文法描述<sup>[7]</sup>, 张树兵等提出的 L 系统建模方法的改进<sup>[8]</sup>, 王昊鹏等讨论的 IFS 搜索和解决植物的可视化生成问题<sup>[9]</sup>. 然而, 由于自然景物形态各异, 并不都由一层一层的自相似形状组成, 局部往往带有随机分布的特性, 因此单独地采用 L 系统和 IFS 建立模型与实际有很大差距. 此外, 用上述分形方法绘制单棵树木需要很长的计算时间, 而生成上百棵树木组成的森林所等待的时间不能满足实时性要求, 因此对林木的真实感绘制和实时渲染的可视化需要进一步研究.

\* 国家自然科学基金 (40901191) 和中国科学院研究生院院长基金资助

本文在总结前人工作的基础上介绍了一种集成随机和定量化于一体的树木三维真实形态的建模以及森林动态划分的层次细节(LOD)可视化渲染技术,综合了L系统精细微观构模与交叉画树的快速渲染的宏观优势.基于L系统理论将树木的三维空间结构模型参数化与数字化,并采用OpenGL对研究区域内林木进行实时绘制,利用L系统的迭代以及与视点相关的快速动态渲染等LOD方法开发了三维森林实时渲染系统.

## 1 树木三维建模

三维构模中把真实树木看成是由几个离散的空间基本单元组成.这些基本单元为枝、节、叶和花等模块,其中枝可以分为合轴分枝与单轴分枝2种模式<sup>[10]</sup>.合轴分枝具有较强大的侧枝从而没有明显的主干,而单轴分枝有明显的主干.

树木的一个局部通常由一个单独的模块或几个模块的组合而成,由于树木具有的局部和整体的自相似特性,局部的放大即是树木的几何轮廓.分形理论能够很好地表现这种自相似形态的拓扑关系,借助分形方法中的递归思想,通过形式化语言可以很好地描述与模拟树木的形态与生长.

### 1.1 森林树木三维空间结构

树木的空间结构主要是基于树木三维形态结构的几何描述,描述的是处于不同生长阶段的树木由不同的模块构成其形态.根据树木类型生长规则的特点,定义归属不同树种的树枝、树叶、节点等模块的语言描述,并将树木的几何形状参数化,从而交互地控制树木的整体形态.

自然界树木的结构具有随机性与各异性,一般把树木的生长过程描述为:

- 1) 树苗从破土而出开始,它的茎干会向其生长空间处长出一些小枝,那些位置称为节.
- 2) 茎干节的位置会生成会小的嫩枝,大多数小的嫩枝又长出一些更小的嫩枝,如此循环.
- 3) 枝、节组合成基本的模块,每棵树是由大量的枝节组成的模块构成.
- 4) 组成每棵树木的基本模块具有相似性,树种与树种的相似程度不同.

### 1.2 森林树木三维结构的形式语言描述

树木的分枝、节间生长过程利用参数量化,将树木的形态特征用字符形式化语言进行描述,从而表现树木的三维空间结构和拓扑关系.早期的L系统也称为D0L系统,D0表示与上下文无关(context free),即确定性.D0L系统是利用“龟形解译”(turtle interpretation)模拟分形几何图形.如果仅使用简单的D0L系统来模拟树木的形态结构,绘制的将是简易、真实感欠佳的树木,随机L系统和参数L系统从不同的层面克服了D0L的局限,笔者研究了集随机和参数化于一体的L系统.

### 1.3 随机参数化L系统

在树木三维形态的模拟中,枝结构是核心.由于树木的形态受到诸多环境因素的影响,其枝结构处处体现着随机的特征.集随机化与参数化于一体的L系统,可以表示成一个五元式

$$L = \{V, \Sigma, W, P, \Omega\}, \quad (1)$$

其中, $V$ 是一个字符解译的集合,由“F”、“[”、“]”、“+”、“-”等组成; $W$ 是种子规则,又称公理(axiom),用以确定字符串的初始迭代规则,满足 $W \in V$ ; $P$ 是产生式规则集(production),通过经验式的概括和抽象,可以逐次地替换母串 $W$ 的各个字符部分,从而得到一个复杂的对象.例如: $W$ 为 $FF[+F][ -F]$ ; $P$ 为 $F \rightarrow +F$ ;根据产生式规则去替换公理 $W$ 中每一个字符,得到如下序列: $FF[+F][ -F] \rightarrow +F+F[+ +F][ - +F] \rightarrow + +F + +F[ + + +F][ - + +F] \rightarrow \dots$ 依据迭代次数进行递归.

$\Sigma$ 表示一个参数集合; $\Omega$ 是函数,使得产生规则集 $P$ 服从 $(0,1]$ 的概率分布,以表现枝结构的随机性,随机参数化的L系统的概率规则可以用下面的公式表示:

$$\text{Predecessor}(\text{condition}) \xrightarrow{\text{Probability}} \text{Successor}, \quad (2)$$

式(2)中Predecessor表示当前枝节点的字符串前驱;condition表示当前枝节点的参数,该参数决定了后继枝节的几何形态的范围;Successor表示当前枝节点的字符串后继;Probability是一个随机概率计算公

式,后继枝节点的形态由概率计算决定迭代字符串,依据随机概率选择 Production 中的某一生成规则,下面是一个随机参数化 L 系统描述实例:

$$\begin{aligned}
W &: A(2)B(4)C(2)A(3), \\
P_1 &: A(x) \rightarrow A(x+2) : 2, \\
P_2 &: A(x) \rightarrow C(x-1) : 3, \\
P_3 &: A(x) : x > 2 \rightarrow B(x) : 5, \\
P_4 &: B(x) \rightarrow C(x+1) : 3
\end{aligned}
\tag{3}$$

依据 Production 的  $P_1, P_2, P_3$  生产规则,在第一次迭代中  $A(x)$  可以用  $A(x+2)$  或  $C(x-1)$  或  $B(x)$  替换. 最终选择哪个规则进行迭代,需要由当前枝节点的参数代入随机概率进行计算. 对于公理  $W$  中最后一个字符  $A(2)$ ,则满足  $P_1, P_2$  生产规则,  $\text{Probability}(P_1) = 2/(2+3) = 0.4, \text{Probability}(P_2) = 3/(2+3) = 0.6$ ,即按照  $P_2$  规则迭代的可能性最大;对于公理  $W$  中最后一个字符  $A(3)$ ,满足  $P_1, P_2, P_3$  生产规则,  $\text{Probability}(P_1) = 2/(2+3+5) = 0.2, \text{Probability}(P_2) = 3/(2+3+5) = 0.3, \text{Probability}(P_3) = 5/(2+3+5) = 0.5$ ,即按照  $P_3$  规则进行迭代的可能性最大.

因此种子  $W:A(2)B(4)C(2)A(3)$  经过第 1 次迭代最有可能的结果为

$$A(2)B(4)C(2)A(3) \rightarrow C(1)C(5)C(2)B(3).\tag{4}$$

根据公式(1)与(2),可以得到树木三维空间结构的随机参数化 L 系统的语言描述(如图 1):

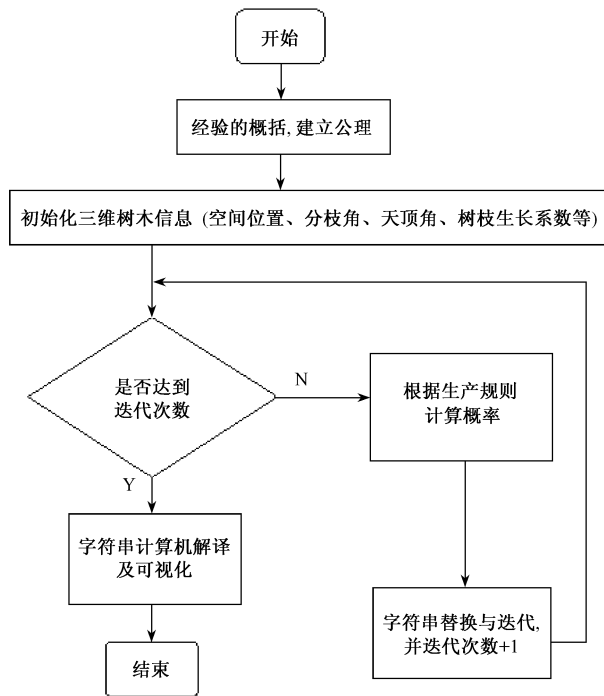


图 1 三维树木随机参数化构模流程

其中,迭代次数是控制 L 系统建树精细化程度最重要的因子之一. 通过对多种树木的模拟,笔者发现迭代次数为 5 时只能描绘出树木整体枝节的三维轮廓,无法绘制树木局部特征的细节. 迭代次数为 12 时能够细致地描绘树木的三维微观特征,但是由于计算复杂且耗时长,不适用在实时可视化场景中. 因此可以分层存储树木的 L 系统模型,相邻层次的迭代次数增 1. 这样不仅可以有效地选择合适效率的模型,并且当层次细节随视点连续动态变化时可减少树木刷新的突跳,使得 2 个相邻层次的模型间能够形成光滑的视觉过渡.

## 2 树木 LOD 可视化渲染

森林三维真实感场景中包含着不同树型的随机参数化 L 系统模型的树木,同一树种不同的生长阶段其形态也不相同,并且需要实时对森林三维场景的绘制与渲染,因此 L 系统模型的计算机可视化将会产生海量的数据,这与有限的硬件设备之间存在着矛盾与冲突。

首先可以改进的是不可视区域的景物.在视锥体外的景物在当前帧中不需要绘制.由视点的坐标与视线方向可以计算出视锥体与地形相交的区域,判断视点的可视区域,视线被遮挡的地形背面的场景不绘制,林木在视点的不可视区域和视点被遮挡的地方不绘制。

在可视范围内的场景渲染效率主要包括 L 系统迭代次数和视点相关的实时绘制 2 方面的影响. LOD 主要是依据景物与视点的空间关系划分层次,对不同的层次采用不同的绘制策略.空间关系如图 2 所示。

$\alpha$  是视点的视角范围; $d'$  是视点与屏幕的距离; $d$  是视点与树木在世界坐标的距离; $L$  是投影平面的边长; $l$  是树木的真实高度; $l'$  是树木在屏幕的投影高度.由几何关系,得出式(5)和式(6)。

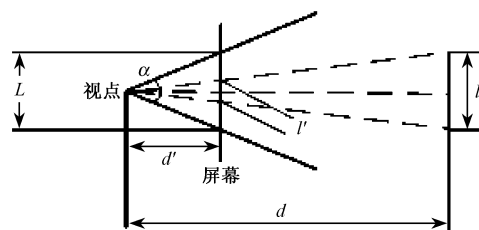


图 2 视点与树木的透视关系

$$d' = \frac{L/2}{\tan \frac{\alpha}{2}}, \quad (5)$$

$$l' = \frac{d'}{d} \times l = \frac{l \times L}{2d \cdot \tan \frac{\alpha}{2}}. \quad (6)$$

设  $\varepsilon$  为调整系数,通过它可以对视点的距离进行分级.  $\varepsilon$  的几何意义是将处于世界坐标中的树木在屏幕的真实投影高度  $l'$  缩小  $\varepsilon$  倍的高度.  $\varepsilon$  越小,精度越大,绘制越精细.因此可调整  $\varepsilon$  取值得出的阈值划分细节层次.定义  $d_i$  为视点到景物处于某一层次的允许距离。

$$d_i = \frac{l \times L}{2\varepsilon \cdot \tan \frac{\alpha}{2}}. \quad (7)$$

笔者开发的森林三维渲染系统将阈值划分为近距、中距、远距 3 个层次.对于近距离的树木用上述提到的随机参数化 L 系统进行构模渲染,L 系统字符串就是树木的真实三维精细模型,模型经过平移、旋转、缩放等仿射变换进行置换,可以减少重新建立、计算、生成 L 模型的开销;对于中距离的树木如果将迭代次数都设定为 12,则渲染效率非常低下,因此采用林分的思想.实验结果表明,在大多情况下树木的整体形态特征由其构成迭代次数的 75% 决定,中距离迭代次数多少,对真实感绘制的可视效果作用并不是很明显,通过调节迭代次数可适当提高渲染效率.笔者采用 OpenGL 列表结构分层存储各个迭代次数的树木模型,根据与视点的关系由近及远迭代次数依次递减进行绘制;对于远距离的树木采取布告牌(Bill-board)方法,将一棵树的图片作为纹理贴到一个四边形上,使四边形的法向量一直指向视点.这种方法真实感较差,通常使用改进的布告牌方法即十字交叉法,将 2 个布告牌的四边形 90° 十字交叉,并动态载入纹理,这样可以获取较好的视觉效果。

## 3 结果与分析

依据上述方法,用 VC. net 和 OpenGL 开发了三维森林真实感建模与实时 LOD 渲染系统,在如下的配置:Microsoft Windows XP Professional (SP3)操作系统,CPU 为 Intel(R) Core(TM)2 Quad CPU Q9400 2.66GHz,2048 MB (DDR2 SDRAM)内存,Geforce 9800GT (1024 MB)显卡,7200rpm Hitachi 80G 硬盘实现了森林三维真实感可视化系统,单木 L 系统建模绘制如图 3 所示.图 4 为场景的 LOD 渲染效果,场

景中绘制了约 5000 棵树.

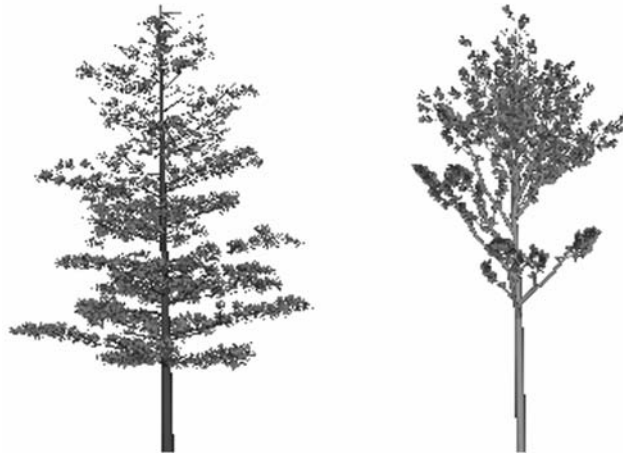


图 3 单木 L 系统建模

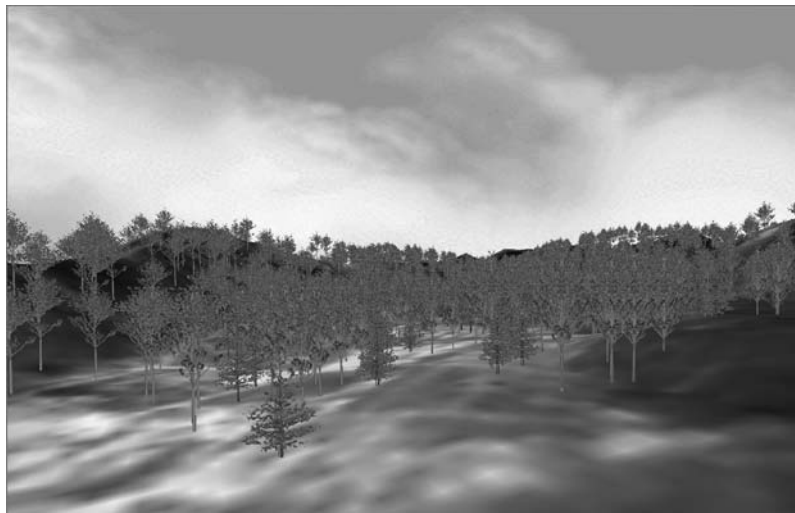


图 4 虚拟森林三维渲染效果

单纯地用十字交叉画树效率最高,但真实感效果较差.综合考虑目前硬件设备的计算能力与实时可视化要求,笔者比较了几种渲染方法之间的效率.在相同的配置下将单纯 L 系统、L 系统和十字交叉绘制、L 系统结合十字交叉与林分 LOD 这三种方法进行测试,如图 5 所示.从图 5 中可以看到,单纯的 L 系统绘制场景的效率下降幅度变化最快,这种方法在少量树木的时候能够达到实时的可视效果;L 系统与十字交叉的绘制方法提高了绘制效率,该曲线与单纯 L 系统曲线的差值就是十字交叉画树效率提高的部分;基于 L 系统的十字交叉与 LOD 绘制方法效率最高,该方法由于考虑到视点因素,动态划分了场景的层次细节,在不影响真实感效果的前提下能够满足大规模场景的渲染以及漫游的实时性要求.

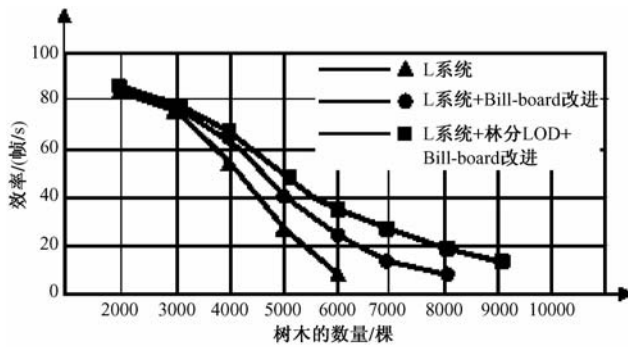


图 5 不同方法的绘制效率

## 4 结论与展望

文中用随机参数化 L 系统对树木进行真实感建模和绘制,在森林三维虚拟场景中利用与视点相关的 LOD 技术动态划分了 3 种层次细节,充分考虑到 L 系统精细建模与交叉贴图快速渲染的优势,开发了森林三维可视化场景,并能够满足实时渲染的要求。

用较少的时间、空间开销实现虚拟交互性的和谐系统是发展的趋势,真实感的渲染与三维实时可视化技术是未来研究的方向。为完善森林三维虚拟系统,未来的研究工作主要将在景物建模和计算效率等方面需要得到进一步的加强,主要包括以下几个方面:提高树木更细致的参数化形态精细建模;在地形与树木综合渲染时,研究基于数据分块、多线程及核心数据常驻内存、GPU 并行处理等方法以提高渲染速度;研究 Out-of-Core、自适应可视化等算法以提高大规模场景的绘制效率;研究在不同光照条件下枝叶的反射光泽与色调;树木在风、雨、雪等自然现象作用下的摇曳;树木的阴影形态及随时间的变化过程等。

### 参考文献

- [1] Lei X D, Chang M, Lu Y C, et al. A review on growth modelling and visualization for virtual trees[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2006, 42(11): 123-131 (in Chinese).  
雷相东,常敏,陆元昌,等. 虚拟树木生长建模及可视化综述[J]. *林业科学*, 2006, 42(11): 123-131.
- [2] Lindenmayer A. Mathematical models for cellular interaction in development: part I and II [J]. *Theoretical Biology*, 1968, 18: 280-315.
- [3] Weber J, Penn J. Creation and rendering of realistic trees[J]. *Siggraph*, 1995, 64(8): 119-127.
- [4] Prusinkiewicz P, Lindenmayer A. The algorithmic beauty of plants[M]. New York: Springer-Verlag, 1990.
- [5] Prusinkiewicz P. Modeling of spatial structure and development of plants[M]. *Scientia Horticulturae*, 1998.
- [6] Long J, Su X Y. Research and progress of arboreal plant 3D visualization in China[J]. *Forestry Machinery & Woodworking Equipment*, 2007, 35(6): 4-7 (in Chinese).  
龙洁,苏喜友. 国内树木三维可视化技术研究进展[J]. *林业机械与木工设备*, 2007, 35(6): 4-7.
- [7] Zheng Z J, Wu Y S, Li S L. Computer generation of 3-D realistic graphics of botanical trees[J]. *Chinese Journal of Computers*, 1990(2): 61-74 (in Chinese).  
郑卓嘉,吴佑寿,李叔梁. 计算机产生和显示植物树木的三维逼真图形[J]. *计算机学报*, 1990(2): 61-74.
- [8] Zhang S B, Wang J Z. Improvement of plant structure modeling based on L-system[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2002, 7(5): 457-460 (in Chinese).  
张树兵,王建中. 基于 L 系统的植物建模方法改进[J]. *中国图像图形学报*, 2002, 7(5): 457-460.
- [9] Wang H P, Jia X Y. Research on dynamic simulation method of plants based on arithmetic of IFS[J]. *Journal of Changchun Institute of Technology: Natural Science*, 2005, 6(2): 49-52 (in Chinese).  
王昊鹏,贾新宇. 基于 IFS 算法的植物动态仿真的研究[J]. *长春工程学院学报:自然科学版*, 2005, 6(2): 49-52.

## Study on realistic modeling of three-dimensional forest and visualization based on LOD technology

LIU Zhen-Yu, RUI Xiao-Ping, DONG Cheng-Wei

(College of Resources and Environment, Graduate University, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract** Trees are one of the most important natural features in the forest virtual scene rendering. The three-dimensional visualization model is proposed based on formal language of parametric and random L-system. According to the viewpoint in the spatial position, the model dynamically classifies stand levels of details which are described by various processing for rendering. By adjusting L-system iteration, models of hierarchical storage of tree, and bill-board approach, these levels of details are rendered separately. Experimental results show that this approach is an effective way to simulate forest virtual scene and it meets three-dimensional reality and real-time visualization requirements.

**Key words** forest, L-system, three-dimensional visualization, LOD