

文章编号: 1001-1498(2010) 01-0059-06

# 杉木形态三维可视化模拟技术研究

吴 谦, 张怀清, 陈永富, 刘 闽

(中国林业科学研究院资源信息研究所, 北京 100091)

摘要: 本文从 IFS 方法在树木建模中的应用出发, 结合树木构筑学的特点, 提出了一套树木形态数据的调查方法, 以杉木为例在湖南攸县黄丰桥林场进行调查实验, 通过对所采集的杉木数据的分析, 获得杉木一级枝和二级枝枝长、枝根直径、仰角、方位角的分布规律, 将其作为 IFS 变换的入口参数, 构建杉木三维拓扑结构, 并在 .NET 和 DIRECTX9.0 平台上开发了杉木可视化模拟系统, 实现了杉木三维可视化模拟。

关键词: 树木构筑学; 形态; 三维模拟

中图分类号: S791.27

文献标识码: A

## Study on Visual Simulation Technology of *Cunninghamia lanceolata* Morphological Characters

WU Qian, ZHANG Huai-qing, CHEN Yong-fu, LIU Min

(Research Institute of Forestry Resource Information Techniques, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

**Abstract:** In this paper, some applications of IFS method in trees modeling were analyzed, and with the characteristics of trees architecture, an investigation method for the trees modality data was presented. Taking *Cunninghamia lanceolata* as an example, an investigation was conducted in Huangfengqiao Forest Fam of Youxian, Hunan province. By analyzing the data, some input parameters including the length, diameter, elevation angle and azimuth angle of its first-level, second-level branch were obtained, in order to make up three-dimensional topology of *Cunninghamia lanceolata*. The *Cunninghamia lanceolata* modeling system based on .NET frame and DIRECTX 9.0 was established, so as the *Cunninghamia lanceolata* three-dimensional simulating was realized.

**Key words:** trees architecthre; modality; three-dimensional modeling

1968 年, 美国学者 Lindermyer 提出了能够模拟植物形态结构的 L 系统作为植物形态模拟的一般框架, 之后植物虚拟受到了越来越多的关注。作为虚拟植物的重要方法之一——迭代函数系统 (IFS) 法, 属于分形构形系统的一种, 是分形几何学的重要分支。IFS 借助于计算机强大的迭代计算能力, 将分形理论的精髓: 自相似性、层次的多重性和不同层次的规则的统一性, 应用于计算机图形领域, 可以产生许多具有无穷细节的、精致纹理的图形<sup>[1-2]</sup>。因此,

对于自然界中随机性和自相似极强的树木而言, 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, 与以规则形状构图的传统方法相比较更具优势。

近年来, IFS 理论有了较大的发展, 国内很多学者对 IFS 也做了大量的研究和探索。郭继东等<sup>[3]</sup>讨论并研究了多 IFS 和嵌套 IFS 迭代生成算法, 采用概率驱动的随机迭代算法绘制生成自然景物。北京师范大学从计算机视觉和图形学的角度出发, 以照

收稿日期: 2009-07-20

基金项目: 国家“十一五”科技支撑重点项目课题(2006BAD23B06); 国家林业局 948 引进项目(2008-4-61); 中央级公益性科研院所项目(RIFRITZYZ2007001)

作者简介: 吴谦(1984—), 女, 河南沁阳人, 硕士研究生, 主要从事林业虚拟现实技术研究。

\* 通讯作者: 张怀清, 副研究员, 硕士生导师, 主要从事林业可视化模拟技术与湿地监测技术研究。

片作为有效输入提取树木骨架,然后用IFS和二叉树的方法重新构造三维树木模型。马石安、陈传波<sup>[4]</sup>对基于迭代函数的树木模拟方法进行了探索,从一个已模拟景物的IFS吸引子出发,改变参数自动生成无重复的序列画面,以此达到对森林景物动态模拟的目的。孙敏、马蔼乃和薛勇<sup>[5]</sup>将树的分形模型与其图像替代模型结合起来,初步解决了树模型在3D GIS中逼真的可视效果和数据量的问题。李庆忠、韩金姝<sup>[6-7]</sup>探讨几种基于IFS的彩色树木模拟技术,主要包括彩色树木自然着色的方法、自然光照状态下各种树影的绘制方法,以及随机因素和迭代概率对树木形态的影响。刘文进<sup>[8]</sup>从交互式获取自然景物IFS码的角度对任意自然景物的信息提取问题进行了全面讨论。程学珍等<sup>[9]</sup>提出了基于正余弦的IFS描述法,该方法克服了原有方法的生硬性和一律性,增加了分形造型结果的多样性。

祁燕等<sup>[10]</sup>采用IFS方法和随机参数化方法,实现树叶和树枝结构的建模,构造出三维桃树(*Amygdalus sp.*)和枫树的模型。仲兰芬等<sup>[11]</sup>提出单轴分枝和合轴分枝两类树木的递归算法,生成了单轴分枝和合轴分枝两类树木的IFS码。王昊鹏等<sup>[12]</sup>以基于遥感信息的植被虚拟仿真模拟为研究对象,讨论了基于IFS算法实现植被仿真模拟造型中的关键步骤,有效地实现了针对常规目标植被的高可用、高可融合遥感数据的仿真模拟。但是利用纯图形学的IFS方法进行树木的三维建模时,存在缺乏对树木分枝空间拓扑结构的准确描述,树木冠形变化难以控制等缺点,所生成的树木三维模型中枝茎、枝间距单一,没有变化,树木整体形态差异小,因而不符合真实的树木形态特征。

而在植物形态学领域中,树木构筑型可以用来描述树木的总体外貌特征,如树形、冠形、分枝结构

以及树体组成部分(芽、枝、叶等)的空间排布格局及数量变化动态等方面的内容。作为能直观显示树木基本轮廓的冠形,既是树木分类学和树木形态学的一个重要组成部分,也是构筑型分析中最常用到的一个要素。同时,树木侧枝及其空间变化特点又是决定树体和树冠形状的主要因素,侧枝的数量、长度和基茎等直接决定了树冠大小、形状和树冠结构<sup>[13-14]</sup>。

因此,在树木模拟中应该考虑如何将构筑学中对树木分枝、冠形的研究思想运用到IFS分形的方法中,通过描述作为最重要的树体形态生成和生长因子的分枝结构,来弥补IFS方法在树木建模中的不足。

## 1 研究方法

本文的研究方法分为以下几个方面:

(1) 选取适合描述树木结构的分形方法,分析该方法在树木形态模拟中的不足之处并对其进行改进,根据改进后的算法提取描述树木形态的参数;根据树木构筑学的相关知识,确定树木形态数据的调查方法,结合树木模拟算法中提取的形态参数,对树木形态进行详细的描述,确定树木调查因子。

(2) 根据确定的树木调查方法及调查因子选取具体树种为例进行调查实验,采集树木形态相关数据及纹理数据;对采集的树木形态数据进行详细分析,获取树木形态信息,提取IFS变换入口参数值的范围。

(3) 将提取的参数值作为IFS变换入口参数的基本值,采用改进的IFS算法构建树木三维拓扑结构;在相关的开发平台上对树木的三维模型进行渲染,实现树木形态模拟的三维可视化。

研究方法图如图1所示:

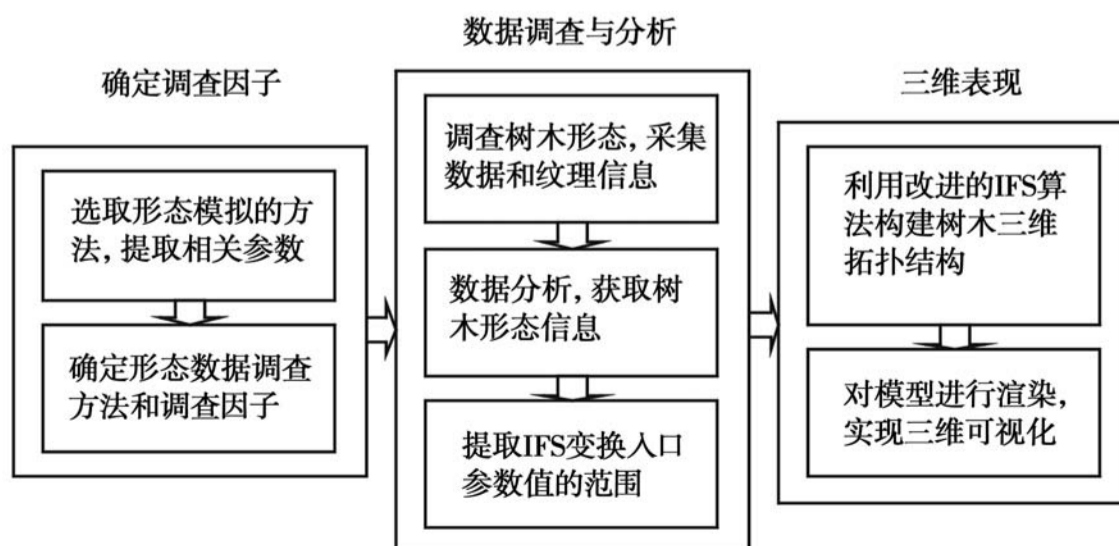


图1 研究方法图

## 2 研究区概况

以湖南省国营黄丰桥林场作为研究试验区, 该林场地处罗霄山脉中段武功山西南, 位于 113°04' ~ 113°42' E, 27°06' ~ 27°14' N。海拔为 115 ~ 1 270 m, 成土母岩以板页岩为主, 石灰岩次之, 还有少部分花岗岩、砂岩, 土壤有山地黄壤、红壤、紫色土和山地黄棕壤等; 该场属中亚热带季风湿润气候, 年平均气温 17.8℃, 无霜期 292 d, 年均降水量 1 411 mm, 主要经营树种为杉木 (*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.), 全场土地总面积 10 158 hm<sup>2</sup>, 森林面积 7 720.8 hm<sup>2</sup>, 其中杉木林面积 5 464.1 hm<sup>2</sup>, 占 70.77%。

## 3 可视化模型算法

依据 IFS 能够较好的模拟树木自相似的特点, 本文采用 IFS 方法来模拟树木的三维结构, 并对原始的 IFS 方法做了改进。原始的 IFS 迭代法是由固定的线性变换完成, 而修改的 IFS 迭代法是针对每一个树枝做不同的线性变换。不妨假设任意一个枝  $L_i$  设其顶点坐标为  $(a_1, b_1, c_1)$ , 末点坐标为  $(a_2, b_2, c_2)$ 。令  $W_i(X) = A_i(X) + t_i$ 。分别计算  $L_i$  的仰角和方位角  $\theta_i$ , 如公式 (1)、(2) 所示:

$$\theta_i = \arccos \frac{c_2 - c_1}{(a_2 - a_1)^2 + (b_2 - b_1)^2 + (c_2 - c_1)^2} \quad (1)$$

$$\varphi_i = \arccos \frac{a_2 - a_1}{(a_2 - a_1)^2 + (b_2 - b_1)^2}$$

假如  $b_2 - b_1 > 0$

$$\varphi_i = 2\pi - \arccos \frac{a_2 - a_1}{(a_2 - a_1)^2 + (b_2 - b_1)^2} \quad (2)$$

假如  $b_2 - b_1 < 0$

假如  $b_2 - b_1 = 0$

现在要对树枝进行线性变换, 生长出新的树枝出来。先令  $L_i(0, 0, l)$ , 顶点  $z_0 = (0, 0, 0)$ , 末点  $z_1 = (0, 0, l)$ 。  $l$  为  $L_i$  的长度, 假设一组新的变换  $W(L_i) = \prod_{i=1}^M W_i(L_i)$  ( $L_i$ , 其中  $W_i$  是与上述类似的线性变换, 令  $W_i(X) = A_i(X) + t_i$ 。再令  $B = W(L_i)$ , 假设  $B$  中的任一树枝的顶点为  $P_1$ , 末点为  $P_2$ 。重新对  $P_1$  和  $P_2$  做线性变换, 如公式 (3)、(4) 所示:

$$P_1 = \begin{pmatrix} \cos \theta_i & \sin \theta_i & 0 & \cos \theta_i & 0 & \sin \theta_i \\ -\sin \theta_i & \cos \theta_i & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -\sin \theta_i & 0 & \cos \theta_i \end{pmatrix} P_1 \quad (3)$$

$$P_2 = \begin{pmatrix} \cos \theta_i & \sin \theta_i & 0 & \cos \theta_i & 0 & \sin \theta_i \\ -\sin \theta_i & \cos \theta_i & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -\sin \theta_i & 0 & \cos \theta_i \end{pmatrix} P_2 \quad (4)$$

再把  $P_1$  和  $P_2$  分别做向量平移, 即:  $P_1 = P_1 + (a_2, b_2, c_2)$  和  $P_2 = P_2 + (a_1, b_1, c_1)$ 。这样实际完成了任意一个树枝生出新枝的过程。这种方法具有很好的局部性和灵活性, 因为每个树枝可以选择不同的变换。对于 IFS 模型需要给定的入口参数有: 仰角、枝下高、方位角和分枝级数。

但是经过模拟发现, IFS 在模拟树高增长变化中失真较为严重, 无法真实再现树木生长的实际情况, 为此, 引入树木生长模型来控制 IFS 中的收缩系数以减少失真。选取常用的 Logistic 生长方程作为本次模拟的生长模型, 如公式 (5) 所示:

$$y_t = \frac{R/k}{\frac{R/k - y_0}{y_0} e^{-Rt} + 1} \quad (5)$$

其中:  $y_0$  为初始值,  $R$  为相对生长率,  $k$  为环境限制因子,  $t$  为生长年限。因此对于生长模型而言需要给出树木树高、冠幅、胸径的初始值和树木的年龄。

## 4 树木形态参数确定

根据上述调查方法, 于 2008 年 6 月在湖南省攸县国营黄丰桥林场对不同年龄的杉木形态数据进行了调查实验。

### 4.1 树木形态参数调查方法

由于树木主要由树干、树枝、树叶和树根组成, 本研究暂时不考虑对树木根系的模拟, 本文提到的数据调查方法中只涉及到对树木地上部分(树枝、树干和树叶)的调查。选定树木三维模拟的模型后, 综合树木构筑学的概念分别对树木整体、树枝(干)和树叶信息进行描述。

4.1.1 树木整体信息调查 构筑学中在描述树木的结构时, 一般将树干定为 0 级枝, 然后在干上分出枝的是一级, 一级枝上再分出来的为二级, 依此类推, 最高可达九级。因此在树木整体信息中要记录该树总的级数, 以及第一级子枝的个数。

描述树木整体信息时, 除了树木名称、分枝类型、年龄、胸径、树高这些基本参数之外, 还需要测量树木不同部位的直径。首先测定树木根部的直径, 其次对于距离地面最近的第一个枝, 不管其是死枝还是活枝, 都要测定该枝的枝下高及枝下径。对于

能够直观表现树木形态的冠幅,需要分别测量其在东西向和南北向的值。描述树干整体信息的调查因子有:树木编号、树木名称、分枝类型、年龄、总级数、子枝个数、根径、胸径、树高、东西冠幅、南北冠幅、枝下高、枝下径。由上述这些参数可以把树木的整体信息描述出来。

**4.1.2 树枝(干)信息调查** 由树木的分枝规律可知每级的分枝结构都与树木本身具有相似性,利用树木分枝自相似的特点,将树干和树枝划分为一类,建立一个既可以描述树枝、树干信息,又能体现每级枝与其上级枝和下级枝关系的调查表。描述树枝(干)信息的调查因子有:分枝编号、父枝编号、当前级数、子枝个数、枝根直径、枝中直径、枝顶直径、枝下距、仰角、方位角、枝长、活枝标识、长叶标识。如图 2 所示。

**4.1.3 树叶信息调查** 树叶信息对于树木的模拟也有着非常重要的作用,不仅要在分枝表中调查其数量,还要记录能够反映树叶在枝上分布的信息。如该树叶所在分枝的编号、叶序类型、叶柄长度、仰角、方位角、叶长、叶宽和叶下距。叶下距是该树叶与父枝交点处到父枝枝根径处的距离,单位是 cm。描述树叶信息的调查因子有:树叶编号、父枝编号、叶序类型、叶柄仰角、叶柄长度、叶下距、叶长、叶宽。

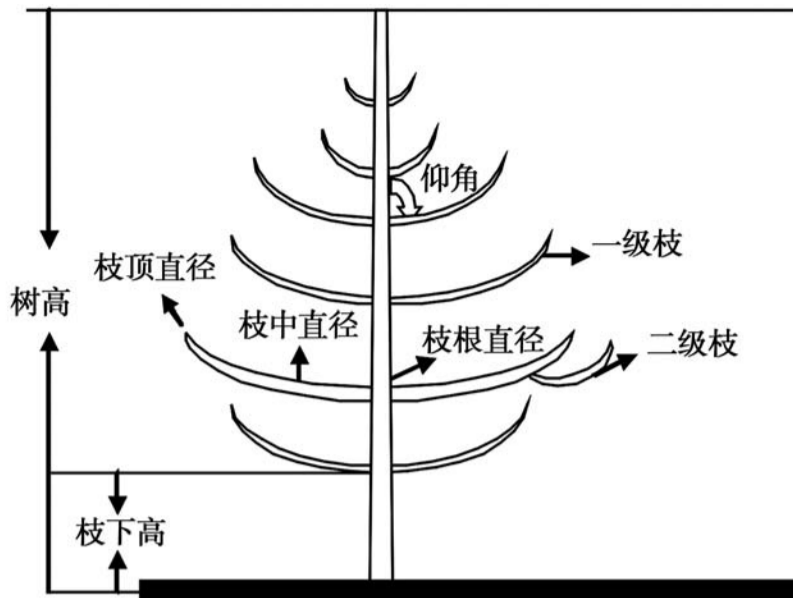


图 2 分枝调查基本参数示意图

## 4.2 调查数据分析

本文以杉木为例,选取林场中周围无干扰环境,并且冠形比较好的样木进行逐枝调查。共调查不同龄级的杉木 4 株。其中一级枝 304 个,二级枝个数 3 125 个。

对所调查的数据进行统计分析,主要考虑杉木一级枝和二级枝的枝径、枝长、仰角、方位角的分布范围。表 1 为一级枝与二级枝各参数分析结果,可以得出一级枝比二级枝枝根直径的平均值大,一级枝与二级枝枝长的平均值相差较大,一级枝比二级枝仰角的均值大。

表 1 一级枝与二级枝各参数分析结果

项目	一级枝 枝根直径/cm	二级枝 枝根直径/cm	一级枝 枝长/cm	二级枝 枝长/cm	一级枝 仰角/(°)	二级枝 仰角/(°)	一级枝 方位角/(°)	二级枝 方位角/(°)
平均	1.18	0.41	71.41	20.09	74.66	63.62	171.66	155.11
标准差	0.58	0.20	50.43	12.47	12.16	22.38	102.40	111.48
最小值	0.19	0.10	2	1	5	0	0	0
最大值	3.3	2.30	280	170	110	170	359	360
观测数	304	3 125	304	3 125	304	3 125	304	3 125

一级枝方位角的均值为 171.66°;二级枝方位角的均值为 155.11°。根据一级枝与二级枝方位角的

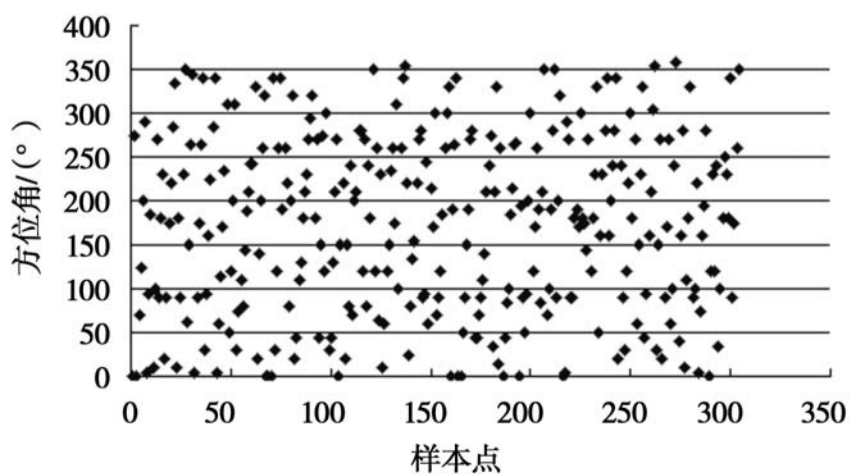


图 3 一级枝方位角散点分布图

原始数据得出一级枝方位角散点分布图(图 3)和二级枝方位角散点分布图(图 4)。

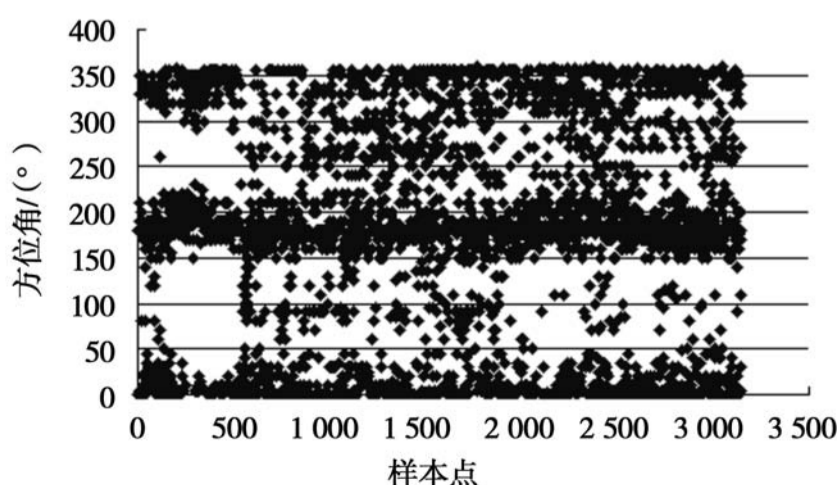


图 4 二级枝方位角散点分布图

由图 3 一级枝方位角散点分布图可以看出一级枝在主干上近似均匀分布的。将方位角从  $0 \sim 360^\circ$  平均分为 4 个区间, 求出每个区间内一级枝的个数在总枝数中所占的比重, 可以看出一级枝在每个区间内的分布基本相同, 如图 5 所示。因此在进行树木建模时, 一级枝在主干上的方位角分布是均匀的。

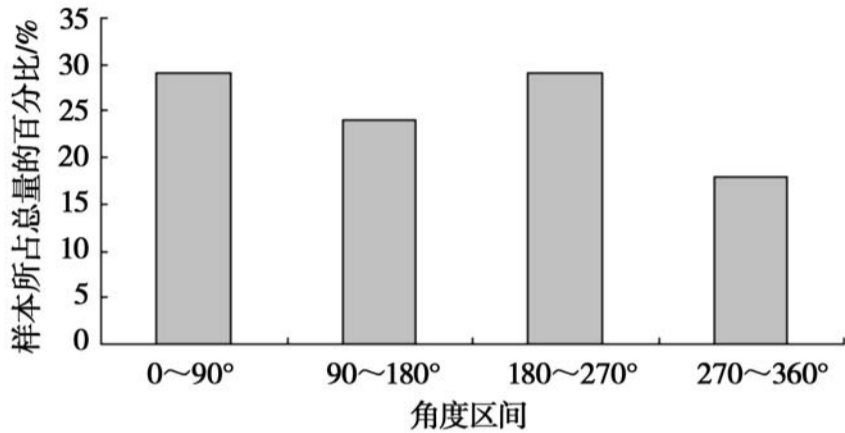


图 5 一级枝方位角分布图

由图 4 可以看出二级枝在  $0 \sim 50^\circ$ ;  $150 \sim 200^\circ$ ;  $300 \sim 360^\circ$  (三个范围内非常集中, 故将方位角从  $0 \sim 360^\circ$  (度划分为  $(45^\circ; 135^\circ]$ ,  $(135^\circ; 225^\circ]$ ,  $(225^\circ; 315^\circ]$ ,  $(315^\circ; 45^\circ]$  4 个区间并求出各个区间内二级枝个数在总枝数中所占的比重如图 6 所示, 可以得出二级枝主要分布在  $(135^\circ; 225^\circ]$ ,  $(315^\circ; 45^\circ]$  两个区间内, 由此可以知道二级枝在生长过程中由于树木本身要得到更好的生长条件, 树枝要更好的获得光照等原因, 所以在形态上表现为方位多数分布在  $180^\circ$  和  $360^\circ$  附近。

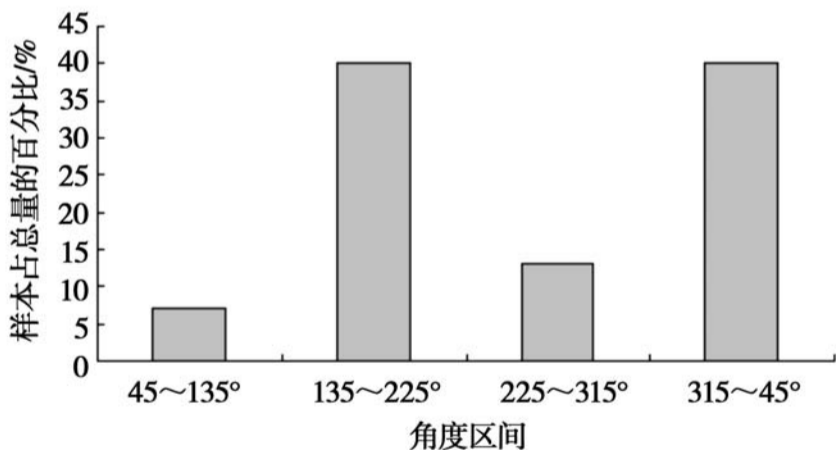


图 6 二级枝方位角分布图

根据上述分析结果确定 IFS 变换入口参数值的范围, 取实际测量的树高、胸径和冠幅的值作为生长模型的初始参数, 实测树木的枝下高和一级枝个数及仰角的平均值作为形态模型的参数。对于树枝的枝茎、枝长和方位角在程序中设置每项的平均值作为参数的基本值, 然后在最大值与最小值之间随机取数。

### 5 杉木形态三维可视化模拟

由改进后 IFS 变换方法构建杉木的三维几何拓

扑结构, 模型建立完成之后利用 DIRECTX9.0 提供的 API 及模型渲染技术, 结合实际中收集的树木纹理对模型进行渲染, 加以表现。在 .NET 和 DIRECTX9.0 平台上, 使用 C# 语言和面向对象的思想开发了杉木三维可视化模拟系统。系统主界面如图 7 所示。



图 7 树木三维可视化模拟系统界面

根据分析结果设置 IFS 变换入口参数的值, 设计树冠基本形状, 选取树皮纹理和树叶纹理, 如图 8 所示, 最后为三维可视化模拟结果, 如图 9 所示。

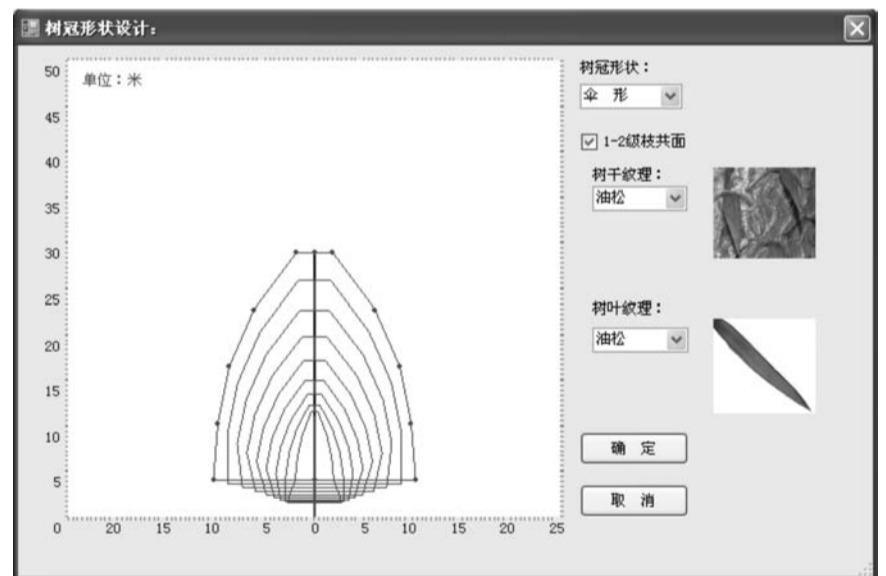


图 8 树冠形态和纹理设置界面



图 9 杉木形态可视化模拟结果

## 6 结论与讨论

本文提出了树木模拟中形态数据的调查方法,并以杉木为例对其形态参数进行了提取和分析。得出了杉木一级枝枝根直径、枝长、仰角、方位角和二级枝枝根直径、枝长、仰角、方位角这些参数的方差、均值,及其分布范围。并根据一级枝和二级枝方位角的数据做出散点图发现杉木的一级枝和二级枝的方位角的分布规律。以杉木基本形态特征的数据分析结果为依据,结合改进后的 IFS 方法,构建了树木形态模拟中树木三维拓扑空间结构,并用实际采集的纹理对三维模型进行了渲染,开发了杉木可视化模拟系统,实现了杉木三维可视化模拟。

本文采用 IFS 方法结合生长模型对树木形态进行了三维可视化模拟,尚未考虑树木形态模型和生理生态模型的结合,因而对于树木生长生理生态模型的模拟方法还有很大的探讨和研究空间。

### 参考文献:

- [1] arnsley M F, Demko S. Iterated function systems and the global construction of fractals[ C]. Proc Roy Soc, London, 1985: 243 - 275
- [2] 李庆忠, 韩金姝. 基于 IFS 的树木形态模拟真实感的研究[ J]. 微机发展, 2005, 15(7): 86 - 92
- [3] 郭继东, 赵婷婷, 魏小鹏. 基于 IFS 的虚拟自然景物生成[ J]. 大连大学学报, 2002, 23(6): 73 - 47
- [4] 马石安, 陈传波. 基于迭代函数系统的森林景物的动态模拟技

术的研究[ J]. 计算机工程与应用 2002, 11: 79 - 134

- [5] 孙 敏, 马蔼乃, 薛 勇. 树模型的三维可视化研究[ J]. 遥感学报, 2002, 6(3): 188 - 193
- [6] 李庆忠, 韩金姝. 基于 IFS 的树木形态模拟真实感的研究[ J]. 微机发展, 2005, 7(15): 86 - 92
- [7] 李庆忠, 韩金姝. 基于 IFS 的树木形态模拟方法[ J]. 计算机辅助工程, 2004, 13(4): 20 - 24
- [8] 刘文进. 基于迭代函数系统的树木模拟[ D]. 辽宁: 辽宁工程技术大学, 2005
- [9] 程学珍, 曹茂永, 徐小平. 基于分形的自然景物描述方法研究[ J]. 系统仿真学报, 2007, 19(21): 4957 - 4964
- [10] 祁 燕, 王 琰, 申铁成. 分形几何在三维树木建模中的应用[ J]. 沈阳理工大学学报, 2005, 24(2): 33 - 36
- [11] 仲兰芬, 王 琰, 程 磊. 三维分形树木 IFS 生成算法[ J]. 沈阳理工大学学报, 2005, 24(1): 28 - 31
- [12] 王昊鹏, 赵 凯. VRML 实现基于遥感信息的植物仿真系统[ EB/OL]. <http://www.paper.edu.cn>.
- [13] 孟宪宇. 测树学[ M]. 第 2 版, 北京: 中国林业出版社, 1996
- [14] 臧润国, 蒋有绪. 热带树木构筑学研究概述[ J]. 林业科学, 1998, 34(5): 112 - 119
- [15] 肖 锐, 李凤日, 刘兆刚. 樟子松人工林分枝结构的分析[ J]. 植物研究, 2006, 26(4): 490 - 496
- [16] 朱万才. 樟子松人工林林分三维可视化的研究[ D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2007
- [17] 仲兰芬, 王 琰, 程 磊. 三维分形树木 IFS 生成算法[ J]. 沈阳理工大学学报, 2005, 24(1): 28 - 31
- [18] 魏小鹏, 周运红, 张建明, 等. 自然景物 IFS 建模技术研究[ J]. 工程图学学报, 2003, 24(4): 103 - 109