

引用格式: 马载阳, 张怀清, 李永亮, 等. 林木多样性模型及生长模拟[J]. 地球信息科学学报, 2018, 20(10): 1422-1431. [Ma Z Y, Zhang H Q, Li Y L, et al. Diversity model and growth simulation of tree[J]. Journal of Geo-information Science, 2018, 20(10): 1422-1431.] DOI:10.12082/dqxxkx.2018.180101

林木多样性模型及生长模拟

马载阳^{1,2}, 张怀清^{1*}, 李永亮¹, 杨廷栋¹, 彭文娥³, 李思佳¹

1. 中国林业科学研究院资源信息研究所, 北京 100091; 2. 南京师范大学 虚拟地理环境教育部重点实验室, 南京 210023;
3. 湖南省攸县黄丰桥国有林场, 株洲 412307

Diversity Model and Growth Simulation of Tree

MA Zaiyang^{1,2}, ZHANG Huaiqing^{1*}, LI Yongliang¹, YANG Tingdong¹, PENG Wene³, LI Sijia¹

1. Institute of Forest Resource Information Techniques, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 2. Key Laboratory of Virtual Geographic Environment, Nanjing Normal University, Ministry of Education, Nanjing 210023, China; 3. Youxian Huangfengqiao State-owned Forest Farm in Hunan Province, Zhuzhou 412307, China

Abstract: The living environment of trees is complex and changeable, resulting in different morphologies of trees. In order to depict the diversity and complexity of tree morphology, a simulation method of tree growth based on model decomposition was proposed. Firstly, we built diversified 3D tree models. The actual data of trees were measured, and used to fit tree trunk and crown shape curves based on the B spline function. Using the taper equation, the trend of trunk diameter was simulated. Meanwhile Direct3D API was used to realize the 3D tree morphology modeling. Secondly, the tree model was decomposed into 9 sub-models on the basis of the tree morphological characteristics. Finally, according to the topology relationship, sub-models were organized dynamically by linking scene nodes. Growth models of DBH, tree height, under branch height, crown height and crown width were used to calculate the tree morphological parameters by multithread parallel technology on multi-core processor, which represented the crown morphology in the cardinal directions at different age stages. And sub-models were controlled to realize the growth simulation of forest tree. The result shows that the method combines the 3D tree models with tree growth models closely. Meanwhile the under branch heights, crown heights, crown widths of trees in different directions grow accurately by growth models driving. The growth states in each direction of forest trees is simulated. The FPS of 3D rendering is always more than 25 and the average FPS is around 50 during trees growth. The direction heterogeneity of tree growth is simulated.

Key words: tree modeling; growth simulation; 3D model decomposition; models dynamic organization; dynamic visualization

***Corresponding author:** ZHANG Huaiqing, E-mail: zhang@ifrit.ac.cn

摘要: 林木生存环境复杂多变, 导致林木形态千差万别, 为了准确描述林木的形态多样性特征, 提出了一种基于模型分解的林

收稿日期: 2018-02-09; 修回日期: 2018-07-12.

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(CAFYBB2017SZ005); 国家重点研发计划(2017YFD0600905)。

[**Foundation items:** Central Public-interest Scientific Institution Basal Research Fund, No.CAFYBB2017SZ005; National Key Research and Development Program, No.2017YFD0600905.]

作者简介: 马载阳(1994-), 男, 硕士生, 研究方向为计算机可视化模拟技术。E-mail: zy_ma327@126.com

*通讯作者: 张怀清(1973-), 男, 研究员, 研究方向为计算机可视化模拟技术。E-mail: zhang@ifrit.ac.cn

木生长模拟方法。首先构建多样性林木三维模型,使用林木形态的实际测量数据,基于B样条函数约束树干、树冠形态,依据削度方程模拟树干直径的变化趋势,利用Direct3D实现林木形态的三维建模;其次,按林木形态特征进行林木模型分解,将林木模型分为9个子模型;最后,使用场景节点按照拓扑结构关系对子模型进行动态组织,基于胸径、树高、枝下高、冠高和冠幅生长模型,使用多核CPU多线程并行的计算方式,获得各年龄阶段林木东、南、西、北方向形态参数,从而对子模型生长状态进行控制,实现林木不同方向生长变化的可视化模拟。结果表明:该方法可将林木三维模型与生长模型紧密结合起来,林木各方向的枝下高、冠高和冠幅严格按照生长模型进行生长,可有效模拟出林木各方向生长状态的多样性;三维场景渲染帧率(FPS)保持在25以上,平均FPS可以达到50,实现林木生长的方向异质性模拟。

关键词: 林木建模;生长模拟;三维模型分解;模型动态组织;动态可视化

1 引言

虚拟森林环境一直是研究的热点,对于虚拟森林环境中林木的生长模拟,首先需要构建林木三维模型,然后以三维模型为基础进行林木生长过程的模拟。针对林木建模问题,国内外专家学者主要使用分形递归思想,通过递归的方法调用分形自相似结构,构建林木结构的模型^[1-3],或是基于图像、激光雷达点云和实际测量的方法获得林木形态特征,构建形态模型,实现林木三维建模^[4-9]。其中,She等^[10]提出了基于球面模型在树木建模时描述树冠三维外形的方法。对于林木生长过程模拟的问题,计算机学科领域专家主要使用规则迭代和智能算法对其进行动态模拟。例如,使用L系统,并结合相关技术模拟树木生长过程^[11-13];或者基于动画技术,结合林木生长约束技术模拟林木生长过程^[14-15]。在林学上,可以基于实测数据进行林木的生长模拟,使用实测数据建立知识库或生长模型,分别使用推理方法或使用生长模型计算出林木生长参数,结合三维可视化技术实现林木生长的可视化模拟^[16-20]。

林木由于周围生长环境的影响,会呈现不同形态特征,具有形态多样性。上述研究实现了对林木生长的模拟,但是没有模拟出林木生长过程中的多样性特征。而且使用规则迭代、智能算法等计算机技术的林木生长模拟方法难以与树高、胸径、冠高、冠幅等林木形态参数建立直接的联系。而从林学出发基于实测数据建立的生长模型与三维可视化模拟技术结合较为困难,现有的可视化方法模拟程度较低,大多是通过对于林木三维模型进行整体的放缩或者静态地替换模型模拟生长,不能很好地兼顾模拟效果和林木形态。

本文在上述研究的基础上,以杉木为例,重点研究林木生长过程中不同形态特征的模拟方法。以林木形态调查数据为基础,将林学的削度方程、

干形曲线和冠形曲线与计算机技术结合,建立多样化的林木三维模型,以林木生长模型为驱动,使用三维模型分解和子模型动态组织的方法将生长模型与林木三维模型结合,实现林木不同方向的生长模拟。

2 林木形态模型描述方法及生长模型

2.1 林木形态模型描述方法

干形是树干的形状,一般有通直、弯曲、饱满等区别^[21]。本文将干形曲线定义为树干中心线在某一平面上投影得到的曲线,用来描述树干的弯曲状态。冠形曲线是用来描述树冠形态的曲线,使用冠形曲线可以模拟树冠的纵断面。

削度方程是表示树冠不同高度处的直径 d 与该位置的高度 h 、树高 H 和胸径 D 的函数模型,用来表示树干直径由地面位置到树尖逐渐减小的变化趋势^[21-22]。对于杉木人工林,陈孝丑等^[23]通过对比验证,证实曾伟生提出的削度方程具有最佳效果^[24]。削度方程表达式为:

$$d/D = [(H-h)/(H-1.3)]^{C_0 + C_1 z^{1/4} + C_2 z^{1/2} + C_3 (D/H)} \quad (1)$$

式中: H 表示树高; D 表示林木胸径; h 表示树干某一位置的高度; d 表示该高度处的树干直径;参数 C_0 、 C_1 、 C_2 、 C_3 分别是3.99786、-8.63324、5.11564、0.19384。其中, $z = h/H$ 。

本文通过使用B样条曲线模拟林木干形曲线、冠形曲线,描述树干的弯曲状态和树冠的形态,使用削度方程模拟树干直径的变化趋势。

2.2 林木生长模型

林木生长模型是描述林木某个调查因子的总生长量随时间变化的数学模型^[21]。为了实现在生长过程中逼真地模拟林木形态,本文将胸径、树高、枝下高、冠高、冠幅作为林木形态的主要参数,以胸径、树高、树冠的东、南、西、北4个方向的枝下高、冠

表1 杉木生长模型表
Tab. 1 Growth models of Chinese fir

编号	模型名称	模型
1	胸径生长模型	$dD/dt = 1.564RS^{0.515}RD^{0.027}(0.133SI^{0.886}D^{0.230} - 0.016SI^{0.733}D)$
2	树高胸径曲线模型	$H = 0.492SI^{0.531}D^{2/3}$
3	枝下高生长模型	$Hb = -3.020 + 0.409 \times Age + 2.601 \times Pv$
4	冠高生长模型	$Hc = -3.036 + 0.469 \times Age + 2.690 \times Pv$
5	冠幅生长模型	$C = 0.660 + 0.037 \times Age + 0.160 \times Ph$

注： D 为胸径； RS 为相对植距； RD 为相对优势度； H 为树高； Hb 为枝下高； Hc 为冠高； C 为冠幅； Age 为林木年龄； Pv 是在林木某一个方向的垂直空间结构，与周围林木的树高有关； Ph 是在林木某一个方向的水平空间结构，与周围林木的方位角和水平距离有关； SI 是地位指数，反映地形、气候、土壤等综合情况

高、冠幅的生长模型为依据，计算各参数的年生长量，进行林木生长的三维可视化模拟。以杉木为例，生长模型如表1所示，胸径、树高模型来自文献^[25]，枝下高、冠高、冠幅生长模型是使用外业测量数据建立的基于空间结构的生长模型方程，用来表达林木某个方向的枝下高、冠高、冠幅的生长变化规律。

3 林木三维模型构建

3.1 林木干形及直径模拟

使用东西方向和南北方向的2条干形曲线，分别描述树干在东西和南北方向的弯曲状态，模拟林木在三维空间中的形态。

如图1所示，建立空间直角坐标系，以树干与地面的交点为原点，沿树干方向为y轴，沿地面向东为x轴，向北为z轴。2条干形曲线分别在二维坐标系xOy和zOy上，在y轴方向上每隔1 m高度，测量树干中心线在x轴和z轴方向上的偏移量，得到坐标

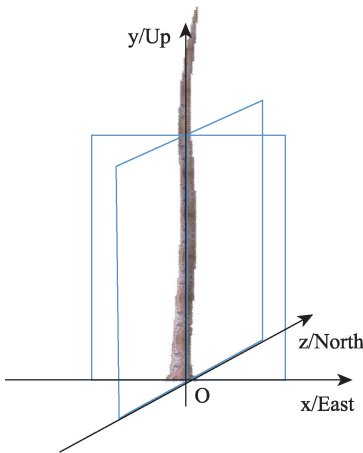


图1 干形数据坐标系
Fig. 1 Coordinate system of trunk shape data

(x_i, y_i) 和 (z_i, y_i) ，测量林木干形数据。以测量的坐标数据为型值点，使用3次B样条函数插值方法对干形曲线进行插值计算，首先反求控制点，再插值计算出东西和南北方向干形曲线上点的坐标 (x, y) 和 (z, y) ，该点在三维空间直角坐标系的坐标为 (x, y, z) 。

构筑树干三维模型，将树干分为多个小段，由树干底部到树尖计算每一小段模型的顶点坐标，并构成网格。如图2所示，每一小段近似为圆台，圆台上下底面的圆心在干形曲线上，依据式(1)的削度方程计算圆台上下底面直径 d 。使用八边形近似代替圆台的上下底面，根据直径 d 、圆心位置的坐标和当前位置的高度 h 计算八边形每个顶点的位置坐标，利用随机函数为每个顶点增加一个微小的偏移量，模拟树干表层起伏不平的效果。

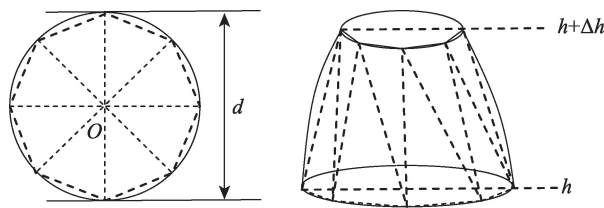


图2 构建树干圆台
Fig. 2 Construction of tree trunks

将拍摄得到树皮照片作为主干纹理，使用Direct3D将主干纹理映射到各圆台上，如图3所示，实现林木主干的建模。

3.2 树冠建模

使用分形迭代的方法模拟树冠的枝系结构，依据文献^[20]中所述杉木枝系结构模拟方法，以分枝个数、枝下高、仰角、方位角等实测数据为依据，采用IFS构建杉木枝系结构，树冠的分枝个数、分枝仰



图3 主干模型

Fig. 3 The model of truck

角和枝条方位角、枝下高分别使用IFS迭代次数、旋转矩阵和位移矩阵控制。本文定义的杉木树冠分枝级数为4级,第一级枝即为主干,各级分枝个数为1、50、8、4,整个杉木共有2000个分枝。

以林木东西和南北方向的树高、冠高、枝下高、冠幅林木形态测量数据为型值点,使用B样条曲线拟合树冠东西和南北方向的纵向冠形曲线,型值点设置如表2所示。通过计算树枝与冠形曲线的交点位置确定林木枝长。在纵向冠形曲线基础上,每隔1 m高度对纵向冠形曲线进行采样,获得采样点坐标,以采样点为型值点拟合模拟树冠横断面的横向冠形曲线,并依据横向冠形曲线计算其余方向的树枝长度。

表2 纵向冠形曲线拟合型值点

Tab. 2 The fitting data points of the longitudinal crown shape curve

型值点	X坐标	Y坐标
1	0	东向/南向-枝下高
2	东向/南向-冠幅	东向/南向-冠高
3	0	树高
4	西向/北向-冠幅	西向/北向-冠高
5	0	西向/北向-枝下高

使用四边形面片作为一个叶片模型单元,通过IFS计算叶片的方位角和仰角,将实际拍摄到的叶片照片利用纹理映射技术绘制到杉木叶片模型上,实现对树叶的模拟。定义每个分枝上绘制5片叶片,每棵杉木上共有10 000个叶片模型。整个树木的三维模型顶点数为129 754,面片数为123 402,在

绘制模型时使用背面剔除技术,仅显示朝向屏幕的片面,提高树冠三维模型渲染效率。树枝树叶模型如图4所示。



图4 树枝、叶模型

Fig. 4 The models of branches and leaves

4 林木三维模型分解

4.1 子模型构建

为了实现对林木不同方向生长变化的模拟,使林木树干和东、南、西、北4个方向的树冠在生长过程中的变化符合生长模型规律,体现树高、胸径、枝下高、冠高和冠幅的生长变化趋势。本文按照林木形态特征,为了便于使用树高、枝下高、冠高、冠幅等参数和相应的生长模型对林木形态变化进行控制和模拟,将林木分解为9个子模型。首先,根据将林木模型分为树干模型和树冠模型,然后依据树高、枝下高、冠高和冠幅等林木形态参数,将树冠分解为8个子模型:按照东、南、西、北方向分为4个部分,每个部分的枝下高至冠高的树冠部分作为一个子模型,冠高至树高位置的树冠部分作为另一个子模型,模型分解过程中保证树枝结构完整。图5是林木形态参数树高、胸径、枝下高、冠高和冠幅的示意图及从正前方和正上方观察林木得到的模型分解示意图,各子模型的原点如图6所示。

4.2 子模型属性

每个子模型作为相互独立的单元,具有各自的属性。树干模型的属性主要包括:编号、名称、年龄、树高、胸径。树冠子模型属性主要包括:编号、名称、年龄、枝下高、冠高、树高、冠幅。使用两位数字对子模型进行编号,数字的十位表示子模型所在的方位:分别使用1、2、3、4表示东、南、西、北,数字

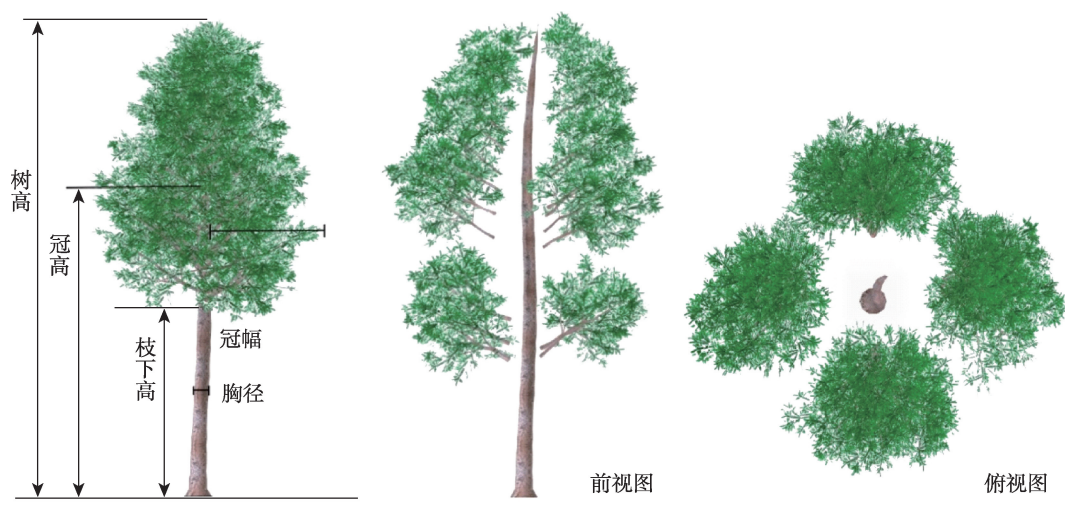


图5 林木形态参数和模型分解示意图
Fig. 5 Diagram of shape parameters and model decomposition

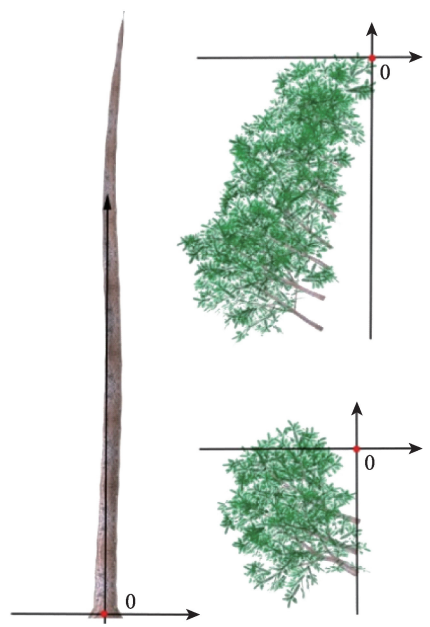


图6 子模型原点示意图
Fig. 6 Base points diagram of sub-models

的个位表示子模型位置是否超出冠高:0表示超出,1表示没有超出,以便对子模型进行组织管理。子模型具体编号如表3所示,定义子模型属性变量,各属性对应的变量类型、变量名称及所属子模型见表4。

5 生长过程中子模型动态组织

5.1 子模型生长量的计算

利用生长模型计算林木形态参数的变化量,实现符合自然规律的林木形态生长变化。对于一片

表3 林木子模型编号表
Tab. 3 ID table of tree sub-models

子模型	编号
树干	00
东面树冠(冠高以上)	10
东面树冠(冠高以下)	11
南面树冠(冠高以上)	20
南面树冠(冠高以下)	21
西面树冠(冠高以上)	30
西面树冠(冠高以下)	31
北面树冠(冠高以上)	40
北面树冠(冠高以下)	41

表4 林木子模型属性表
Tab. 4 Attribute table of tree sub-models

属性	变量类型	变量名	所属子模型编号
编号	int	ID	00、10、11、20、21、30、31、40、41
年龄	int	Age	00、10、11、20、21、30、31、40、41
名称	string	Name	00、10、11、20、21、30、31、40、41
树高	float	Height	00、10、20、30、40
胸径	float	DBH	00
枝下高	float	UBH	11、21、31、41
冠高	float	CH	10、11、20、21、30、31、40、41
冠幅	float	CW	10、11、20、21、30、31、40、41

林分,使用表1中的胸径、树高生长模型计算林木各年龄阶段的胸径和树高,依据林分内林木的空间结构关系确定每棵树的东、南、西、北4个方向的水平空间结构参数Ph和垂直结构参数Pv,以空间结构参数为基础使用表1中的枝下高、冠高、冠幅生长模型,计算每棵林木在东南西北不同方向上,每个年龄阶段的枝下高、冠高和冠幅。在多核CPU上,使用多线程并行的方式对林木形态参数生长量进行

计算,将东、南、西、北方向的生长量计算任务分别放入一个线程中同步进行,计算过程如图7所示。

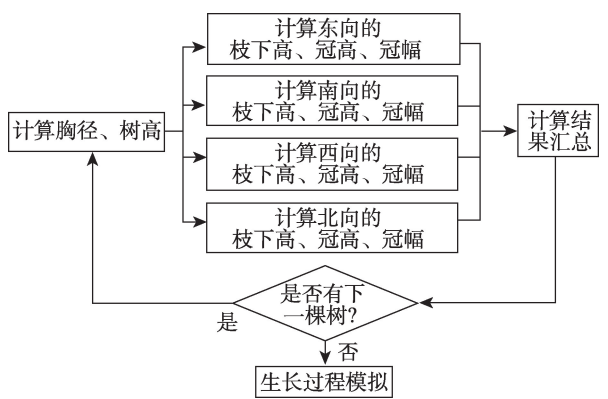


图7 子模型生长量计算过程

Fig. 7 Growth calculation process of sub-models

5.2 子模型动态组织

使用OGRE作为三维渲染引擎,将三维场景中的每个子模型作为独立的生长单元,按照子模型相互间的拓扑关系使用场景节点相互关联构成林木,依据林木形态参数计算子模型生长变化量,通过子模型动态组织的方式实现林木整体的生长,生长过程使用节点动画实现。由于林木生长过程中,子模型的长度、宽度和在三维场景中的位置都会发生变化,需要保持同一林木的各子模型相对位置不变,然后依据生长模型对子模型进行生长变化处理。本文定义SubTreeNode类对子模型进行动态组织与管理,SubTreeNode类的结构如图8所示。初始时,使用SubTreeNode类将子模型组织构成完整的林木,生长时动态调整SubTreeNode的大小,模拟出林木东、南、西、北不同方向生长状态的不同。

按照图9所示的林木模型结构,使用SubTree-

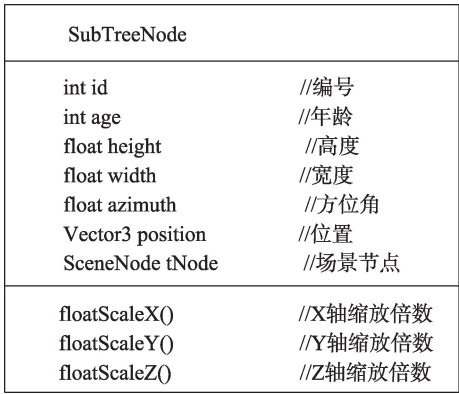


图8 SubTreeNode类结构示意图

Fig. 8 Schematic diagram of SubTreeNode class structure

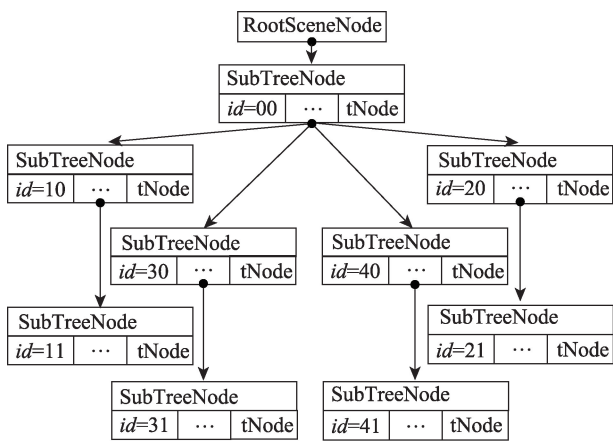


图9 林木模型结构图

Fig.9 Tree model structure diagram

Node成员变量tNode将各子模型组织成完整的林木三维模型。

以林木东面的子模型为例,初始时林木年龄为age1,子模型属性胸径、树高、枝下高、冠高、冠幅分别为DBH1、Height1、UBH1、CH1、CW1,使用子模型属性为SubTreeNode类的成员变量赋值,如表5所示。

表5 SubTreeNode类成员变量初始值

Tab. 5 Initial values of SubTreeNode class member variables

成员变量	树干	东面树冠上部	东面树冠下部
编号id	00	10	11
高度height	Height1	Height1-CH1	CH1-UBH1
宽度width	DBH1	CW1	CW1
方位角azimuth	α	$\alpha+90^{\circ}$	$\alpha+90^{\circ}$
位置position	$(x,0,y)$	$(x,Height1,y)$	$(x,CH1,y)$

注:位置坐标使用OGRE构建三维场景的世界坐标系

生长到年龄age2时,使用多线程并行的方式实时计算得到胸径、树高、枝下高、冠高、冠幅分别为DBH2、Height2、UBH2、CH2、CW2,为SubTreeNode类的成员变量赋值,如表6所示。

在OGRE三维场景中,通过tNode对模型id为00、10、11的3个子模型进行动态组织与管理,生长

表6 年龄age2时的SubTreeNode类成员变量

Tab. 6 Values of SubTreeNode class member variables in age2

成员变量	树干	东面树冠上部	东面树冠下部
编号id	00	10	11
高度height	Height2	Height2-CH2	CH2-UBH2
宽度width	DBH2	CW2	CW2
方位角azimuth	α	$\alpha+90^{\circ}$	$\alpha+90^{\circ}$
位置position	$(x,0,y)$	$(x,Height2,y)$	$(x,CH2,y)$

过程中子模型相对位置始终保持不变,依据图8模型结构自上向下控制子模型的生长,基本过程如下:

(1)将树干模型顺时针旋转 α 度,关联在场景节点RootSceneNode上,坐标为 $(x, 0, y)$,子模型10和11分别以相对坐标 $(0, Height1, 0)$ 、 $(0, CH1-Height1, 0)$,顺时针旋转90度关联在树干模型上;

(2)将树干模型的节点在y轴方向上进行缩放,实现树干高度依据树高生长模型(表1模型2)的变化模拟,缩放倍数为:

$$Scale = Height2/Height1 \quad (2)$$

(3)将树干模型的节点在x轴和z轴方向上进行缩放,实现树干直径依据胸径生长模型(表1模型1)的变化模拟,缩放倍数为:

$$Scale = DBH2/DBH1 \quad (3)$$

(4)对编号id=10的子模型,在y轴上控制节点缩放,实现依据冠高生长模型(表1模型4)的冠高生长变化模拟,缩放倍数为:

$$Scale = (Height1/Height2) \times [(Height2 - CH2)/(Height1 - CH1)] \quad (4)$$

(5)在x轴和z轴上,对节点进行缩放,实现林木冠幅依据冠幅生长模型(表1模型5)的变化模拟,缩放倍数为:

$$Scale = (DBH1/DBH2) \times (CW2/CW1) \quad (5)$$

(6)对于编号id=11的子模型,在y轴上控制节点缩放,实现林木枝下高依据枝下高生长模型(表1模型3)的变化模拟,缩放倍数为:

$$Scale = [(Height1 - CH1)/(Height2 - CH2)] \times (CH2 - UBH2)/(CH1 - UBH1) \quad (6)$$

(7)按步骤(4)–(6),依次对南、西、北面子模型进

行生长控制,其方位角分别为180、270和360°(或0°)。

6 应用实例

6.1 实验数据

本文使用了来自湖南省攸县黄丰桥国有林场的杉木人工同龄纯林样地调查数据,样地面积为2500 m²,林木株数为196株,林龄为9年。对样地内林木进行测量,测量因子包括胸径、树高、枝下高、冠高、冠幅,测量数据统计如表7所示。使用全站仪测量每株林木的相对坐标,并利用全站仪结合塔尺,测量林木干形数据。

基于外业调查的冠形测量数据和干形测量数据,利用B样条曲线拟合出林木的干形曲线和冠形曲线,构建了林木的三维模型。以调查的林木坐标数据为依据,在三维场景中模拟林木的空间结构并计算空间结构参数,模拟在生长过程中不同空间结构影响下的林木形态。

在VS 2008环境下使用C++作为编程语言基于OGRE三维渲染引擎进行三维可视化模拟。硬件配置为Inter(R) Xeon(R) W3530 2.80GHz CPU, NVIDIA Quadro FX 3800显卡,1G显存,6G内存。

6.2 林木生长可视化模拟效果与分析

基于实际测量的林木形态数据,使用Direct 3D构建三维模型,将林木模型载入三维场景中。利用OGRE三维渲染引擎,以森林样地为对象,使用样地调查数据进行林木动态生长过程的模拟。为了表现出林木不同形态特征,实现对林木不同方向生长变化的动态模拟,选择样地内一株林木,

表7 样地数据统计

Tab. 7 Data statistics of forest sample plot

林木数量/株	年龄/年	平均胸径/cm	平均树高/m	平均枝下高/m	平均冠高/m	平均冠幅/m
196	9	11.2	8.3	2.5	2.9	1.8

表8 林木形态参数

Tab. 8 The values of forest tree morphological parameters

形态参数	10 a				15 a				20 a			
	东	南	西	北	东	南	西	北	东	南	西	北
胸径/cm	14.75				19.89				22.97			
树高/m	12.44				15.18				16.71			
枝下高/m	3.39	3.31	3.47	3.51	5.67	5.63	5.67	5.71	7.97	7.97	8.01	8.01
冠高/m	4.04	3.95	4.12	4.16	6.73	6.68	6.73	6.77	9.43	9.43	9.47	9.47
冠幅/m	1.54	1.41	1.75	1.62	1.73	1.60	1.94	1.81	1.91	1.78	2.12	1.99

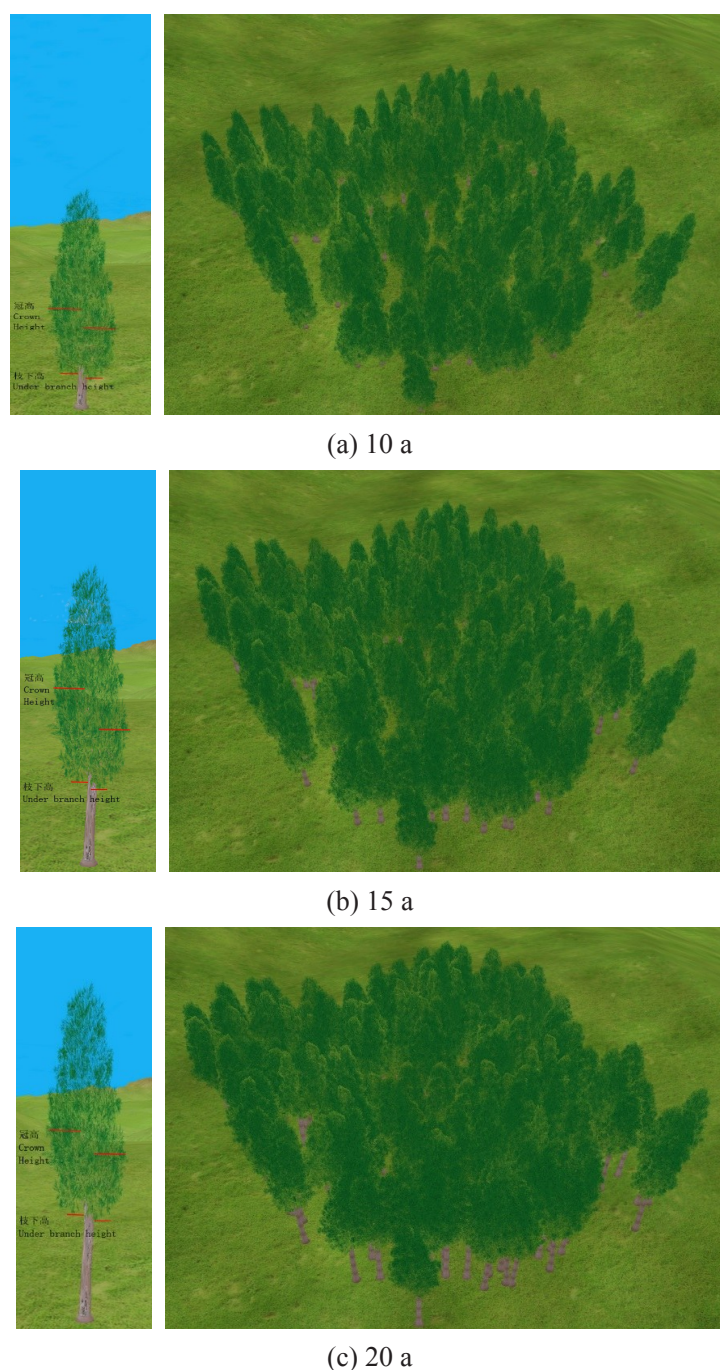


图10 林木生长状态

Fig. 10 Growth state of trees

对比该株林木 10 a、15 a、20 a 时的东、南、西、北方向的林木形态参数,如表 8 所示。图 10 分别为该株林木 10 a、15 a 和 20 a 的形态和样地对应年龄的生长状态。

以林木胸径、树高、枝下高、冠高和冠幅作为林木形态参数,使用生长模型计算出林木形态的大小,如表 8 所示,林木在 10 a、15 a、20 a 的形态参数大小都不相同,且参数变化的大小也不相同。结合

林木模型分解与子模型动态组织方法,实现了生长过程中东南西北不同方向枝下高、冠高和冠幅的区别模拟,图 10 中可以明显看出林木胸径、树高、枝下高、冠高、冠幅的变化趋势,林木不同方向的枝下高、冠高生长变化的各有区别。

在模拟林木生长过程中,使用遮挡剔除技术,渲染三角面片数为 7 040 080 个,分为 3370 个批次进行渲染,三维场景的帧率 FPS 可以维持在 25 以

上,平均FPS能够达到50以上,实现了流畅的林木生长动态模拟。

7 结论

本文以杉木为例,探究多样性林木三维模型的表达和生长模拟方法。以实际测量数据为基础,基于B样条曲线构建林木的冠形曲线和干形曲线,模拟树干弯曲状态和树冠形状,使用削度方程控制树干直径的变化趋势,建立的林木三维模型,该方法所构建的林木的树高、冠高、枝下高、冠幅等林木形态参数与被模拟的真实林木形态相似。依据生长模型使用了多核CPU多线程计算的方式,计算林木东、南、西、北不同方向的胸径、树高、枝下高、冠高和冠幅等林木形态参数的生长量,基于林木模型分解与子模型动态组织的方法,建立了生长模型与林木三维模型的相互联系,实现了林木生长的方向异质性模拟。相对于传统林木生长模拟方法,该方法更能反映林木在东、南、西、北不同方向,枝下高、冠高、冠幅的不同变化趋势,实现林木生长多样性的动态模拟,并为林木枝干、枝系结构生长变化的模拟奠定基础,为森林虚拟地理环境的构建和林业生产经营的虚拟化、信息化提供支持。

基于B样条曲线模拟林木复杂多样的形态,结合削度方程模拟树干直径变化,利用模型分解的思想建立三维模型和生长模型的联系,模拟生长过程。由于使用了林业上常用的林木形态描述参数,所以对于其他树种也具有很强的适用性。

为了模拟更大场景、更为逼真的林木生长过程,下一步需要使用GPU分担三维渲染和不同林木形态参数生长量的计算任务,同时探索更能体现环境因素作用的生长模型。同时,本文介绍的方法重点模拟了生长过程中的林木形态变化,今后将进一步研究林木枝系结构、枝稍量等,并依据生长的变化规律进行模拟。

参考文献(References):

- [1] 郝卫亮,王剑英.基于分形的三维树木形态模型[J].计算机应用,2007,27(9):2137-2139. [Hao W L, Wang J Y. 3D model of tree-image based on fractal[J]. Journal of Computer Applications, 2007,27(9):2137-2139.]
- [2] 丁欢,万旺根,余小清,等.基于几何参数的植物真实感模拟[J].计算机应用,2009,29(1):97-100. [Ding H, Wang W G, YU X Q, et al. Realistic simulation of plant based on geometry parameter[J]. Journal of Computer Applications, 2009,29(1):97-100.]
- [3] 张杰,林彬,蔡文奇,等.弯曲树枝和分形树根的三维模拟[J].计算机应用,2011,31(6):1703-1705. [Zhang J, Lin B, Cai W Q, et al. 3D simulation of bending tree branch and fractal tree root[J]. Journal of Computer Applications, 2011,31(6):1703-1705.]
- [4] Neubert B, Franken T, Deussen O. Approximate image-based tree-modeling using particle flows[J]. Acm Transactions on Graphics, 2007,26(3):88.
- [5] Tan P, Fang T, Xiao J, et al. Single image tree modeling [J]. Acm Transactions on Graphics, 2008,27(5):1-7.
- [6] 董灵波,刘兆刚.基于形态结构特征参数的樟子松人工林单木可视化研究[J].北京林业大学学报,2011,33(5):20-27. [Dong L B, Liu Z G. Visualization of individual Mongolian Scots pines in the plantation conditions based on characteristic parameters of morphological structures[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2011,33(5):20-27.]
- [7] Miller J, Morgenroth J, Gomez C. 3D modelling of individual trees using a handheld camera: Accuracy of height, diameter and volume estimates[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2015,14(4):932-940.
- [8] Hancock S, Anderson K, Disney M, et al. Measurement of fine-spatial-resolution 3D vegetation structure with airborne waveform lidar: Calibration and validation with voxelised terrestrial lidar[J]. Remote Sensing of Environment, 2017,188:37-50.
- [9] 高慧琳,李凤日,董利虎.基于分段回归的人工红松冠形预估模型[J].北京林业大学学报,2015,37(3):76-83. [Gao H L, Li F R, Dong L H. Crown-shape model of a Pinus koraiensis plantation in northeastern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2015,37(3):76-83.]
- [10] She J, Guo X, Tan X, et al. 3D visualization of trees based on a sphere-board model[J]. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2018,7(2):45.
- [11] 飞颢经纬,武寒凝.基于环境影响模拟树的生长[J].计算机应用,2010(s2):205-207. [Fei J J W, Wu H N. Simulation of tree growth based on environment impact[J]. Journal of Computer Applications, 2010(s2):205-207.]
- [12] 董格,刘小丹,孙红岩.模拟树木生长的综合力学模型[J].计算机工程与设计,2011,32(2):716-718. [Dong G, Liu X D, Sun H Y. Tree growth simulation's integrated mechanical model[J]. Computer Engineering and Design, 2011,32(2):716-718.]
- [13] 王珊.基于人工智能的虚拟树木生长过程模拟[D].北京:北京林业大学,2010. [Wang S. Growth process simulation of virtual tree based on artificial intelligence[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2010.]

- [14] 彭道黎,贺姗姗.基于Agent的油松林分生长模拟[J].北京林业大学学报,2009(s2):69-72. [Peng D L, He S S. Growth simulation of *Pinus tabulaeformis* stands based on Agent[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2009(s2):69-72.]
- [15] Zamuda A, Brest J. Vectorized procedural models for animated trees reconstruction using differential evolution[J]. Information Sciences, 2014,278:1-21.
- [16] Tang L, Chen C, Huang H, et al. An integrated system for 3D tree modeling and growth simulation[J]. Environmental Earth Sciences, 2015,74(10):7015-7028.
- [17] 周元满,谢正生,刘素青,等.短轮伐期桉树林分树冠生长的阶跃函数模型[J].南京林业大学学报(自然科学版), 2006,30(2):59-62. [Zhou Y M, Xie Z S, Liu S Q, et al. The unit step function model for crown diameter of short rotation *Eucalyptus*[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2006,30(2):59-62.]
- [18] 程希平,水崎大二郎,王四海,等.基于空间自相关构建树木生长模型[J].北京林业大学学报,2012,34(5):113-119. [Cheng X P, MIZUSAKI D, Wang S H, et al. Construction of tree growth model based on spatial autocorrelation[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2012,34(5):113-119.]
- [19] 雷相东,常敏,陆元昌,等.长白落叶松单木生长可视化系统设计及实现[J].计算机工程与应用,2006,42(17):180-183. [Lei X D, Chang M, Lu Y C, et al. Design and implementation of individual tree growth visualization system of Larch (*Larix olgensis*)[J]. Computer Engineering and Applications, 2006,42(17):180-183.]
- [20] 卢康宁,张怀清,刘闽,等.杉木单木生长可视化模拟系统设计与实现[J].林业科学研究,2012,25(2):207-211. [Lu K N, Zhang H Q, Liu M, et al. Design and implementation of individual tree growth visualization system of *Cunninghamia lanceolata*[J]. Forest Research, 2012,25(2): 207-211.]
- [21] 孟宪宇.测树学[M].北京:中国林业出版社,2006. [Meng X Y. Forest mensuration[M]. Beijing: Chinese Forestry Publishing House, 2006.]
- [22] Tang X, Pérez-Cruzado C, Fehrmann L, et al. Development of a compatible taper function and stand-level merchantable volume model for Chinese fir plantations[J]. PLoS One, 2016,11(1):e0147610.
- [23] 陈孝丑,余荣卓,林金叶,等.杉木人工林最佳削度方程的研究[J].福建林业科技,2004,31(4):15-18. [Chen X C, She R Z, Lin J Y, et al. Studies on the best taper equation of *Cunninghamia lanceolata* plantation[J]. Journal of Fujian Forestry Science and Technology, 2004,31(4):15-18.]
- [24] 曾伟生,廖志云.削度方程的研究[J].林业科学,1997,33(2):127-132. [Zeng W S, Liao Z Y. A study on taper equation[J]. Scientia Silvae Sinicae, 1997,33(2):127-132.]
- [25] 李永亮,鞠洪波,张怀清,等.基于WF的杉木人工林交互式疏伐可视化模拟技术[J].林业科学研究,2014,27(3): 329-334. [Li Y L, Ju H B, Zhang H Q, et al. Visualized simulation of interactive thinning in Chinese fir plantation based on workflow technique[J]. Forest Research, 2014,27(3):329-334.]