

# 大规模三维植被场景实时可视化方法

韩秀珍<sup>1</sup>, 谭继强<sup>2</sup>

(1. 中国气象局国家卫星气象中心, 北京 100081; 2. 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 武汉 430079)

**摘要:** 采用 L 系统结合野外观测数据来构建植被单体的三维结构模型, 根据植被模型特点, 分别对枝干和树叶两个组成部分进行几何简化, 大幅度减少模型所需的几何要素数量。在冠层模型简化中, 提出了分层 LOD 模型提取方法, 该方法可以高效提取出多复杂度的冠层 LOD 模型, 同时保证组成 LOD 模型的每片叶子都符合最小化误差方程的要求。在实时渲染过程中, 依据 LOD 技术对大规模植被实时可视化。为了实时得到植被在动态 LOD 场景中所需要的复杂度, 提出了一套 LOD 植被模型调用的新标准: 用衰减因子描述植被密度和视距对植被细节程度衰减的影响, 为动态 LOD 场景提供连续变化的复杂度标准。

**关键词:** L 系统植被; 动态 LOD; 几何简化; 森林场景

**文章编号:** 1000-0585(2012)03-0565-13

## 1 引言

植被是户外场景的重要组成部分, 良好的植被绘制效果可以增强三维虚拟场景的逼真度。由于植被结构复杂, 形态各异, 涉及大量的植被模型, 无法进行统一建模模拟, 当需要进行实时渲染的时候, 对森林景观进行完全细节的描述是难以实施的。如何描绘出大规模的森林景观, 使其既具有一定逼真度又能满足实时交互是多年来国内外研究者关注的焦点。目前提高大规模森林场景实时绘制效率的方法主要包括两方面: 一方面是提高硬件水平, 即采用处理速度更快的计算机图形硬件来加速渲染; 另一方面是对场景本身的绘制算法进行改进和完善。目前计算机的计算能力往往无法快速真实地模拟大规模植被。随着计算机图形技术的发展, 需要更快更真实的构建大尺度三维空间场景, 因此除了依靠基于硬件加速的绘制技术外, 还需要从图形绘制算法着手, 提高实时绘制的效率。

本研究采用 L 系统结合野外观测数据来构建植被单体的三维结构模型, 根据植被模型特点, 分别对枝干和树叶两个组成部分进行几何简化, 大幅度减少模型所需的几何要素数量。在实时渲染过程中, 依据动态细节层次 (LOD) 技术对植被进行不同程度的简化显示, 从而实现大规模森林场景的实时可视化。

在冠层模型简化中, 本文提出了分层 LOD 模型提取方法, 该方法可以高效提取出视相关的多复杂度 LOD 模型, 同时能够有效保证组成 LOD 模型的每片叶子符合最小化误差方程要求。所谓多复杂度 LOD 模型是指一个可以划分为细节区和粗糙区的 LOD 模型, 其中细节区的复杂度高于粗糙区。另外, 本文提出了一种新的动态 LOD 调用标准: 用衰

收稿日期: 2011-08-18; 修订日期: 2011-12-24

基金项目: 中国气象局小型基建项目 (200110804); 中国气象局关键技术项目 (CMAGJ2011M64); 国家发改委项目 (JCXXK-HT2009-017-02); 公益性行业 (气象) 科研专项 (GYHY (QX) 2007-6-7)

作者简介: 韩秀珍 (1974-), 女, 辽宁阜新人, 博士, 副研, 主要从事卫星遥感地表参数反演与气象卫星地面应用系统建设。E-mail: hanxz@cma.gov.cn

减因子描述树木分布情况,实时得到植被在场景中所需要的复杂度。该算法同时考虑了植被密度和视距对植被所需细节程度的衰减影响,为动态 LOD 技术运用于森林场景提供了连续的复杂度标准。实验结果表明,本文提出的方法具有良好的显示效果和运算效率。

## 2 对相关算法的评价

国内外研究人员对于植被可视化的简化进行了大量的研究,提出了许多简化绘制的算法。按照绘制单元的不同,植被的绘制分为以下两类:基于几何的绘制算法与基于图像的绘制算法。两类算法都有其自身的优势与弊端,可以针对树不同部分的特点采用对应的算法,而基于图像、几何的混合绘制算法是未来用于大规模场景简化的研究趋势之一。

### 2.1 基于图像的绘制算法

基于图像的绘制算法(Image Based Rendering, IBR)兴起于上个世纪 90 年代,通过一些预先处理好的图像集来生成场景,只与采用图像的分辨率有关,使用较少的数据量就能表达一个复杂场景,非常适合实时绘制植被量大的自然景观。基于图像的绘制算法有许多,包括了公告牌技术(Billboard)、替代物技术(Imposter)、层次深度图像、体纹理等等,绘制与视点相隔一定距离的植被能产生较好效果,但需较大内存空间来存储这些纹理,当视点或视角发生变化时,不能灵活地变化。

目前许多加速植被渲染的研究大都基于图像代替几何模型的技术,而较少对几何进行处理。如:宋铁英利用计算机图形与图像相结合的方法,提出一种基于图像的林分三维可视模型<sup>[1]</sup>;Jakulin<sup>[2,3]</sup>等用预先计算好的图片来代替树叶;国内一些研究者采用纹理四边形来代替成片的叶子以此来减少几何细节<sup>[4]</sup>,陈彦云等<sup>[5]</sup>分别采用多边形,纹理,体纹理作为工具来构造不同的植物。这些绘制算法渲染速度快,但采用的是二维图像,缺乏细节表达和真实几何表达,致使视觉真实感降低并且近视点的效果不够理想,极易产生图像的扭曲或失真。由于采样的数据较少且植被结构复杂,叶片之间的相互遮挡现象十分普遍,重投影后可能会出现空洞现象。总体说来,基于图像的绘制虽然能加快整体场景的渲染速度,但无法表达出植物的真实形体,不能满足表达真实感的要求。

### 2.2 基于几何的绘制算法

由于植被结构自身的复杂性,需要用大量的多边形来表达,因此植被的渲染很大程度上是在进行多边形的绘制。植被模拟目前主要的研究重心为植被模型简化,许多研究者采用线或点代替简单多边形:Oppenheimer<sup>[6]</sup>提出多棱柱表示粗树干,线表示细树干;Levoy 等<sup>[7]</sup>首次引入点元作为图形绘制单元;Weber 等<sup>[8]</sup>提出树的细节层次描绘,用一系列的点来描绘树叶和树骨架的线条,Weber 等还提出用线表示柱状树枝,点表示树叶,甚至省略树叶,用以简化模型;Deussen<sup>[9]</sup>提出对离视点远的植被用点进行绘制,近处的仍采用多边形。点元法需要处理结点的几何变换,绘制时间比多边形填充慢,当树木极近观察者时,用点或线绘制,会损失许多树叶的细节。

树干系统是由连续的几何要素组成,很多几何简化方法都适用并可大大减少几何要素的数量,但几何简化不关心枝干形态,可能会产生较大变形。Lluch<sup>[2]</sup>提出从枝干形态出发,定义枝干的重要性,用对外形影响较大的部分枝干模拟整个树干系统,取得了较好的显示效果。

对于冠层简化,Remolar<sup>[10]</sup>提出的实时树叶简化算法 FSA (Foliage Simplification Algorithm),能保持整个植被模型表面近似度并有效地减少树冠的多边形数量。其主要思想

是树叶合并：利用误差方程探测树叶间的相关性，将相关性最高的一对树叶合并成一片新叶。Remolar<sup>[11]</sup>进一步发展 FSA 方法，提出 VDF 方法（View-Dependent Multiresolution Model for Foliage）提取多复杂度的冠层 LOD 模型。Zhang 等<sup>[12]</sup>基于 FSA 算法，提出基于视点的 PLU（Progressive Leaves Union）算法，采用更合理的相似性测量方法选择最佳叶对进行叶片剔除。Zhang 等<sup>[13]</sup>又在此基础上提出 HUO（Hierarchical Union of Organs）算法，根据基本的植物学结构如叶序、花序来分级单独简化树的不同部位，HUO 算法与 FSA 算法、PLU 算法相比，更好地保持了植物学结构，但未应用到全部的拓扑结构。Campos<sup>[14]</sup>提出建立多复杂度 LOD 模型的新方法：从外到内复杂度递减的 LOD 模型来模拟冠层。将冠层由内到外分成多层，在各层内分别简化，建立多个细节程度不同的 LOD 模型。实时将每个区的 LOD 模型组合起来，形成了多复杂度的 LOD 冠层模型。

### 3 三维植被模型

L 系统通过一种字符重写系统或形式化语言方法，对植物生长过程的经验式概括和抽象，构造公理和产生集，生成字符串发展序列，以表现植物的拓扑结构。植物模型的基本组成模块包括树干、树枝和树叶等部分，通过用大的模块替换小的模块，来模拟植被的生长，如用带有两个分叉的树枝代替无分叉的树枝。经过多次模块替换，最终生成完整的植被模型。L 系统植被的基本组成模块是用字符来表示的，例如用字符“d”代表树干，用“g”代表树枝，用“[”和“]”表示树木的分枝点等等。模块之间的替换规则用字符或字符串的替换式来表达，依据替换规则和迭代次数进行字符串的多次累积性替代，树木的结构可用一长串字符来表示，这就构成了 L 系统植被模型。生成字符串以后，用龟形解释的方法为每个字符赋予图形绘制的意义，将字符串形式的植被模型转化为计算机图形。

在本研究中采用了一种集随机化、参数化于一体的 L 系统来构建植被模型<sup>[15]</sup>，流程如图 1 所示。生成的植被模型可以分成两部分：由连续三角面片组成的树干和树枝，由不

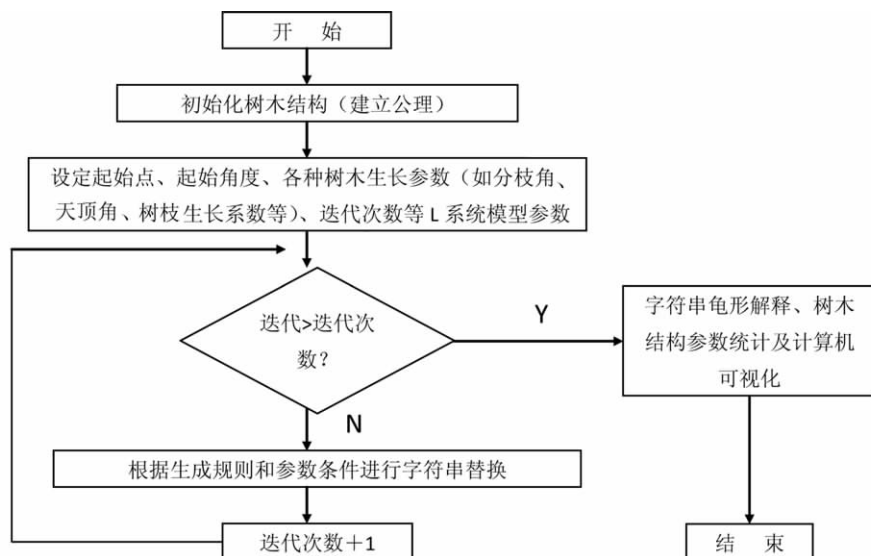


图 1 树木结构模型生成流程

Fig 1 Flow chart of tree structure model

连续的多边形表示的树叶。在构建冠层模型时,本研究采用纹理映射的技术,用四边形和真实纹理模拟树叶,这种做法既保持了树叶的逼真程度,又降低了多边形的绘制成本。

## 4 连续植被 LOD 模型的构建

考虑到 3D 植被的绘制复杂度,要实现大规模的森林场景显示,就要在保持外观完整的基础上采用简化方法来提高绘制的效率。细节层次技术 (LOD) 是通过降低单个模型的几何复杂度,从而降低单个模型的几何渲染时间,以达到提升可渲染的模型规模的目的。如果植被模型只有固定的复杂度,由于人体视觉的苛刻要求,当模型离人眼很近的时候,简单模型的真实感不够强,而当模型远离视点时,模型的复杂度却可以更低。传统的方法是针对同一个模型,存储几个具有不同几何复杂度的模型,然后根据场景中视点的位置变化和地形起伏变化来确定调用哪个模型,这就是静态 LOD 技术<sup>[16]</sup>。该算法运行时间短并且能够有效的利用顶点数组和显示列表。不足之处在于,存储多个代替品的方法对内存提出了苛刻要求。而且不同层次的 LOD 模块切换时会出现突跳现象。动态 LOD 技术则可以避免这些问题。它对单个模型通过计算,建立一个具有多级复杂度的、新的模型表达方式——多分辨率模型,以“原始模型+计算记录+算法”的方式构成。给定一种复杂度,就能够找到对应的合适的 LOD 模型。

本文采用了动态 LOD 方法,分别建立了树干系统和冠层系统的多分辨率模型,由于这种模型记录了不同复杂度的所有几何要素,因此可以方便的为实时渲染提供连续变化的 LOD 模型。

### 4.1 树干简化方法

虽然树枝和树干由连续的三角形面片组成,但是一般的几何简化方法难以有效的保持树干简化前后的结构最大相似性。本文采用了 Procedural multiresolution 算法<sup>[1]</sup>来实现树干和树枝简化。针对 L 系统构建的树木模型,将枝干系统划分成许多模块,所谓模块就是指两个树枝分叉点之间的一段枝干,其重要性用该模块和它所有的后代模块枝干长度的总和来表示。每个模块可以用 L 系统输出字符串中的一段字符组合来表示,按照模块的重要性从高到低的顺序,将输出字符串排序,就生成了多分辨率字符串,这种字符串就是枝干系统的多分辨率模型。下一步是要从多分辨率模型中提取出符合某一复杂度的 LOD 模型。与衡量重要性的标准相同,LOD 模型的复杂度也可以用枝干长度来衡量,具体的计算方法将在第 5 部分中介绍。一旦给定了需要显示的枝干总长度,就从多分辨率字符串中的第一个模块开始顺次提取,并将各个模块的长度叠加,直至总长度达到渲染要求。对提取出的字符串进行龟形解释,就生成了符合简化要求的树干 LOD 模型(图 2)。

### 4.2 树叶简化方法

虽然树叶是用较简单的几何体(四边形)来构建的,但是树叶数量十分巨大,所以在大规模森林场景构建中,冠层部分的简化十分重要。本文基于 VDF 算法提出了一种新的 LOD 模型提取方法。

**4.2.1 VDF 方法** 冠层视相关多分辨率模型 (VDF)<sup>[13]</sup>是由 FSA 方法 (Remo02) 简化得到的一系列树叶组成。该方法建立了一个二叉树结构的多分辨率模型,并可从中提取多复杂度的 LOD 冠层模型。

一片叶子由一对叶子合并而来,从而形成了叶子间的从属关系,新叶子是父结点,两片原始的叶子是两个子结点。将这种从属关系按照层次树结构进行组织,就形成了从下至

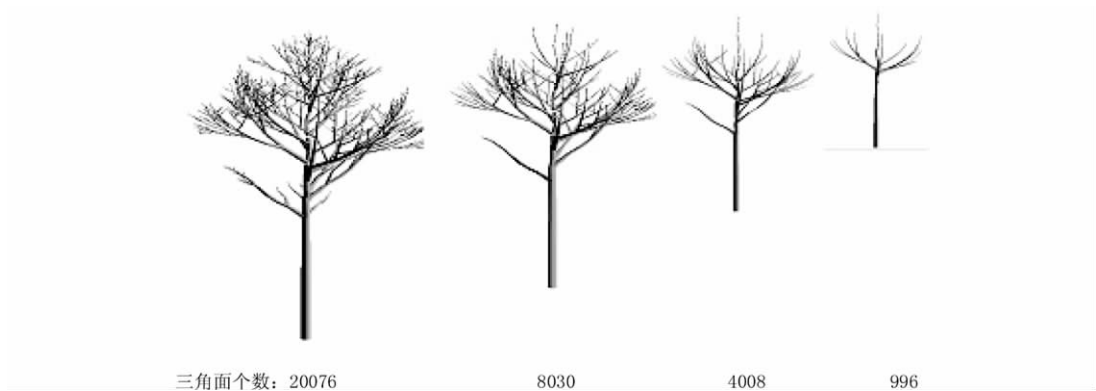


图 2 白桦树枝干的 LOD 模型

Fig. 2 LOD model of white birch branches

上的二叉树结构。图 3 所示的就是一个植被冠层简化过程中的二叉树结构。叶结点代表原始的十片叶子，根结点是简化的最终结果，只有两片叶子。按照叶子的生成顺序依次给结点编号。由于发生合并的叶子对是通过最小化误差方程选出的，所以一对叶子与它们合并生成的叶子之间的相似性越高，它们被合并的优先级就越高，其父结点的编号越小。因此对于编号较小的父结点，我们可以说这片叶子的相似性较高，同时其子结点对应的一对叶子的相似性也较高。如图 3 中所示，11 号叶子比 13 号叶子的相似性高，也可以说 9, 10 号叶子先于 4, 5 号叶子被合并，相似性较高。

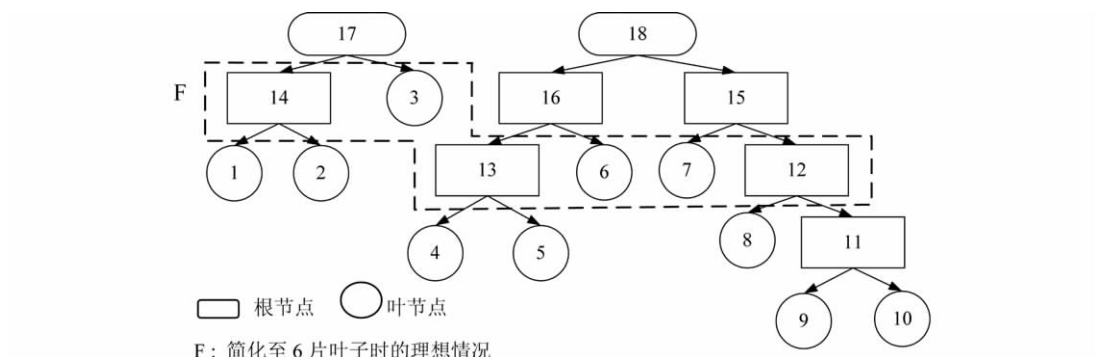


图 3 树木冠层多分辨率模型的二叉树结构

Fig. 3 Tree canopy multi-resolution model of binary tree structure

为了从二叉树结构中提取多复杂度 LOD 模型，VDF 定义了一个链表  $L_s$  来记录当前 LOD 需要渲染的树叶。通过遍历  $L_s$ ，检测每片叶子是否符合细节层次需求，合并位于粗糙区的叶子，分裂位于细节区的叶子，从而使两个区域的树叶具有不同的复杂度，建立多复杂度 LOD 模型。

顺序遍历  $L_s$  必然导致顺序合并或分裂  $L_s$  中的叶子。以图 4 中的多分辨率模型为例， $L_s$  由 1 到 10 这十个叶结点组成，假设这些叶子都位于粗糙区，需要合并成为 6 片叶子，那么顺序合并的结果如图 4 所示：

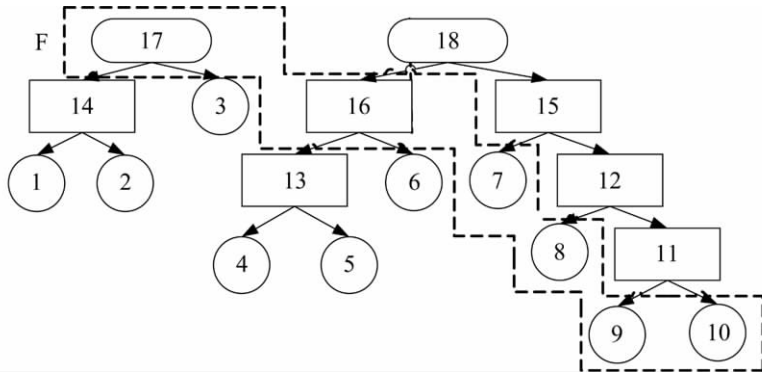


图4 VDF的简化结。F: 简化至六片叶子时的情况

Fig 4 Simplified chart of VDF

顺序合并导致相似性低的 17 号新叶子加入了  $L_s$ , 而相似性很高的 11 号新叶子没有显示, 与图 3 中 F 的理想情况相比, 这显然是不合理的。叶子的分裂操作同样会遇到这一情况。遍历  $L_s$  过程中, 不断的将位于粗糙区的叶子合并, 将位于细节区的叶子分裂。一次操作结束后, 简化后的树叶总量是无法控制的。需要合并的树叶对中, 有一片不在  $L_s$  中, 那么只有将该片叶子的后代结点逐一合并, 才能激活这片叶子。例如图 3 中的 7 号与 12 号叶子的合并, 就需要遍历 8、9、10 号结点的叶子, 将它们分别合并后才可以实现。另外  $L_s$  本身就占用一定的内存空间。本文在 VDF 方法的基础上, 提出了冠层的分层 LOD 模型提取方法。

**4.2.2 分层 LOD 模型提取方法** 本研究提出的分层 LOD 植被冠层提取方法, 可以实时响应连续的细节层次要求, 建立动态 LOD 模型。具体实现步骤如下:

(1) 建立树叶简化二叉树结构: 采用 FSA 中的树叶合并方法, 通过对原始冠层的不断简化, 形成以合并关系为基础的二叉树结构。

(2) 建立树叶层: 在树叶合并简化过程中, 建立一系列复杂度递减的树叶层。

(3) 分层提取 LOD 模型: 确定细节程度最接近的树叶层, 将该树叶层转化为动态 LOD 模型, 本文的算法可以支持单一复杂度或多复杂度 LOD 模型的提取。

其中第 (1) 与 VDF 基本相同, 因此下面本文只对第 (2) 和 (3) 部分进行论述。

#### (1) 建立树叶层

将二叉树结构中的某些叶子组合起来, 可以代替整个冠层, 它们的特点是相互间没有父子从属关系, 相互独立, 符合这个条件的叶子的集合就是一个树叶层。如二叉树的所有叶结点就组成了复杂度最高的树叶层, 而所有根结点组成复杂度最低的树叶层。从最细节到最粗糙的多个树叶层, 其叶子量是逐层递减的。第  $n$  层的叶子量可由下式得到:

$$num = maxnum - n \frac{maxnum - minnum}{N} \quad (1)$$

其中,  $maxnum$  是原始叶子的总量, 代表最高细节层次 0,  $minnum$  是简化最终结果的叶子量, 代表最粗糙细节层次  $N$ , 一般可设为  $0.1 \times maxnum$ ,  $n$  为层数, 取值范围从 0 到  $N$ 。

树叶层可以在建立二叉树结构的过程中获取。当树叶量简化到  $num$  时, 就标记这  $num$  片树叶为第  $n$  层。随着树叶简化程度不断加深, 就产生了  $N$  个复杂程度递减的树叶

层。以图 4 为例, 叶结点作为最细节的一层, 叶子数量为 10, 根结点组成最粗糙的一层, 叶子数量为 2, 如果我们要提取出 3 层树叶层, 则还需要叶子量为 6 的一个树叶层, 提取出的树叶层如图 4 中 F 所示。

## (2) 分层提取 LOD 模型

利用生成的多个树叶层, 本文提出了分层提取 LOD 方法。该方法不是从复杂的二叉树出发, 而是从细节程度最接近的那个树叶层出发, 高效的生成所需要的 LOD 模型。假设某一时刻需要显示的树叶量为  $lnum$ , 分层简化方法的主要步骤是: 首先建立一个空的链表容器, 称其为激活集合 (Active set); 接着找出树叶量最接近  $lnum$  的树叶层, 将这一层的树叶加入激活集合, 然后将它们作为初始值, 通过合并或分裂操作, 不断的加入新的叶子和删去原有的叶子, 反复这一过程直至激活集合中的树叶量等于  $lnum$ , 最后渲染集合中的树叶。

假设选中的树叶层有  $num$  片叶子, 那么:  $\Delta = num - lnum$ 。如果  $\Delta > 0$ , 从现有的树叶层向所需的细节层转化过程中, 需要通过树叶合并操作减少  $\Delta$  片树叶, 反之, 通过树叶分裂操作增加  $\Delta$  片树叶。

按照视线方向或叶片密集程度, 可以将一棵树分成细节区和粗糙区, 如分为正对视点和背对视点的两个半球体, 或分为冠层中心的部分和外围的部分等。在实时渲染中, 粗糙区的复杂度可以远远的低于细节区, 而不影响显示效果。为了进一步加速树木渲染, 本文生成了一种在两个区域具有不同复杂度的 LOD 模型—多复杂度 LOD 模型, 流程图 5 如下:

$criteria()$  函数的作用是把细节区叶子提取出来,  $!criteria()$  则可以提取粗糙区叶子。在初始化 Active set 这一步中, 利用  $criteria()$  函数将树叶层中属于细节的那部分叶子加入到集合中, 再经过合并或分裂操作转化为细节区的 LOD 模型输出, 利用  $!criteria()$  函数再进行一遍上述操作, 就可以输出完整的 LOD 模型了。

如果将树木划分为正对视图和背对视图的两个半球体, 那么树木初始模型的粗糙区与细节区包括的树叶量基本相当, 而 LOD 模型中要求细节区的树叶量多于粗糙区, 是粗糙区树叶量的  $k$  倍。因此当 LOD 模型需要的树叶量为  $lnum$  片, 只要细节区的树叶量为  $lnum/2$  片时, LOD 模型就符合复杂度要求了, 尽管此时粗糙区的树叶量仅为  $lnum/2k$  片。由于每次只生成半个区域的 LOD 模型, 流程图中的树叶改变量  $\Delta'$  应由下式得出:  $\Delta' = num' - lnum/2$ ,  $num'$  是 Active set 中的树叶数量, 约等于  $num/2$ , 所以  $\Delta' \approx \Delta/2$ 。

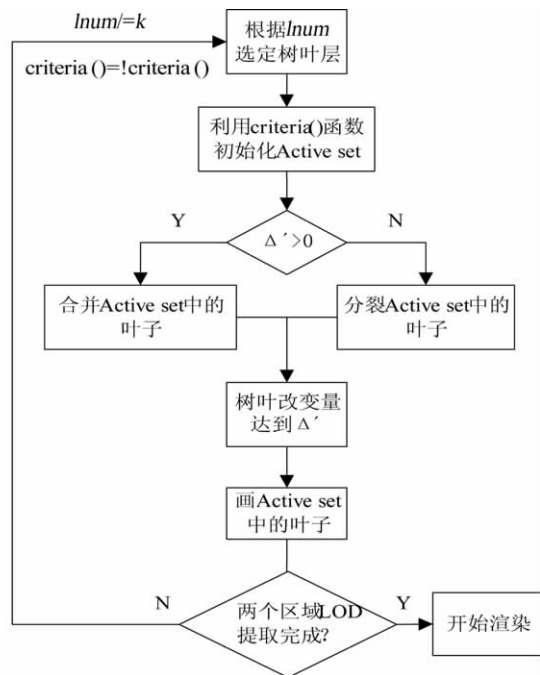


图 5 生成多复杂度 LOD 模型的流程图

Fig 5 Flow chart of canopy LOD model with high complexity

将白桦树 L 系统模型加入场景中，分别用分层提取的方法得到白桦树的单一复杂度模型（图 6）和多复杂度模型（图 7）。

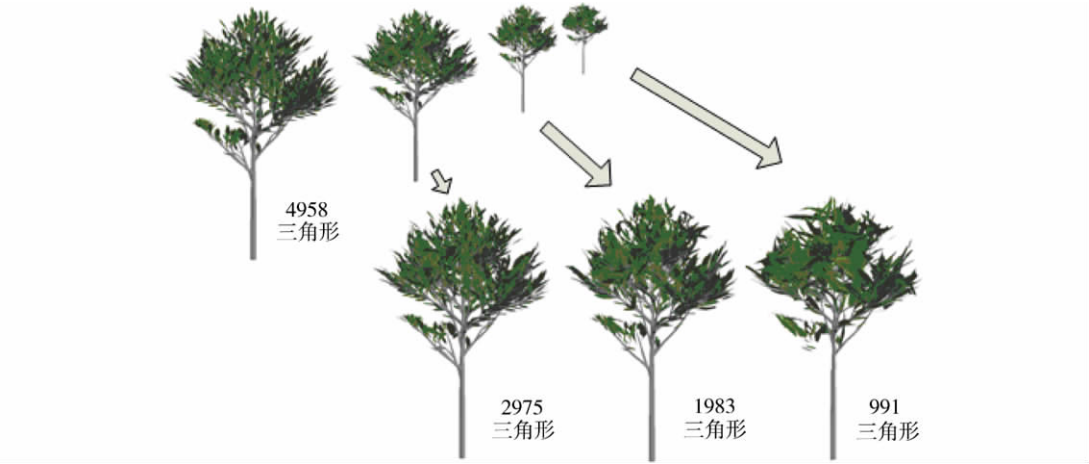


图 6 白桦树冠层单一复杂度简化效果图

Fig. 6 The sketch map of white birch canopy with single complexity

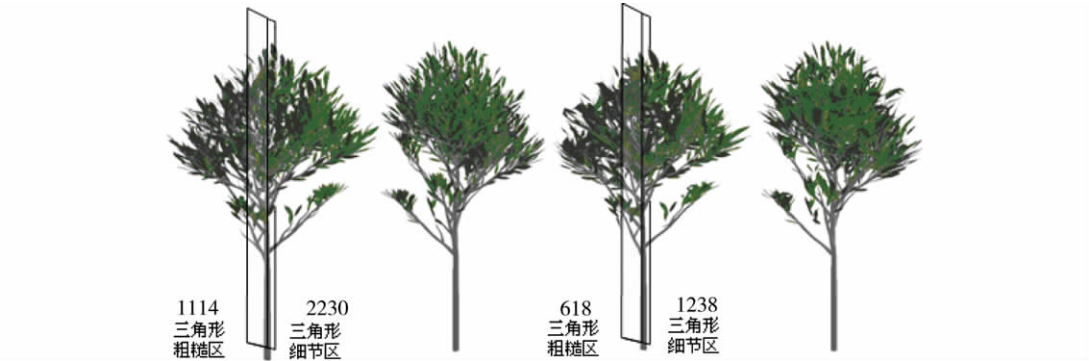


图 7 白桦树冠层分区多复杂度简化效果图

(左边为粗糙区，右边为细节区，细节区的树叶量是粗糙区的 2 倍)

Fig. 7 The chart of white birch canopy division with high complexity

(The left for rough area, the right area for details, the leaves of details is 2 times of rough zone)

本文提出的算法将树叶层中的叶子转化成需要的 LOD 模型，至少需要经过  $\Delta$  次合并或分裂操作，因此时间复杂度为  $O(\Delta)$ 。在树叶层与 LOD 模型差距最大的情况下， $\Delta_{max} = 0.5 \times \frac{\text{maximum} - \text{minnum}}{N}$ ，此时不论是合并还是分裂操作都需要反复  $\Delta_{max}$  次，其中 maximum 与 minnum 为定值，所以决定效率的主要因素就是树叶层的分层数  $N$ 。

对于多复杂度的 LOD 模型提取，粗糙区和复杂区都需要  $\Delta'$  次的合并或分裂操作，因此整个 LOD 模型提取的时间复杂度也是  $O(\Delta)$ 。与单一复杂度 LOD 模型相比多出的操作是，需要将树叶层划分为粗糙区和复杂区。

4.3 纹理贴图



森林场景中某些远处的树木十分模糊不清,为了最大程度上加速渲染,用纹理贴图的方法来表达这部分树木。纹理贴图算法就是用一个简单的四边形和整个树木的纹理贴图来组成最粗糙的一层 LOD 模型,在场景漫游中用公告牌方法实时转动这些贴图,可以满足远距离森林场景的视觉需要。

## 5 多分辨率植被场景可视化

在场景漫游中,树木与视点的位置关系不断发生变化,LOD 模型的细节程度也需要随之动态变化。对于树干部分,LOD 模型的细节程度可以用枝干的总长度来描述;对于树叶部分,可以用叶子总量来表示。将树木与视点的位置关系带来的变化用衰减因子  $I$  来描述,那么:

$$L_{(LOD)} = L_{(0)} \times I \quad N_{(LOD)} = N_{(0)} \times I \quad (2)$$

其中,  $L_{(0)}$  是初始的枝干长度,  $N_{(0)}$  是初始的叶子数量。上式得到的  $L_{(LOD)}$  和  $N_{(LOD)}$  就可以用来调用树干和树叶的 LOD 模型。

植被距离视点越近,可以观察到的细节越多,因此视距是影响  $I$  的主要因素。同时,由于用较粗糙的 LOD 模型来模拟密集的植被,不会影响视觉效果,因此植被密度也是  $I$  的重要影响因素。植被密度可以用两个级别的概念进行描述:总密度和局部密度。总密度是指场景中所有树木总的密集程度;局部密度是指场景中某棵树附近分布的树木密集程度。综上所述,视距越远、植被密度越大,植被的衰减因子越大,LOD 模型越粗糙。衰减因子  $I$  可由下式计算所得:

$$I = 1 - (k_1 D + k_2 R + k_3 P) \quad (3)$$

其中  $D$  是距离衰减因子,  $R$  是总密度衰减因子,  $P$  是局部密度衰减因子,每棵树的  $R$  值都相同,而  $D$  值与  $P$  值各不相同。 $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$  是权重系数,三者之和为 1。 $D$  可由下式所得:

$$D = \frac{distance}{D_0} \quad (4)$$

其中,  $distance$  是实时计算的视距,  $D_0$  是植被在屏幕上显示为一个像素宽时的距离,即植被的可见距离<sup>[17]</sup>。

点群分布模式可以用一个比值来描述,其分子是点群平均最邻近距离的观测值,用  $L_{(obs)}$  表示,分母是点群平均最近距离的估计值,用  $L_{(exp)}$  来表示。这个比值就是  $Rscale$ ,这个值越小,点群分布越密集。 $Rscale$  这个概念由 Kumsap 引入用来描述植被总密度<sup>[17]</sup>。为了描述某一视角人眼所见的植被的分布情况,将位于视景体内的植被投影到屏幕上,取其树冠中心的屏幕坐标,求算  $Rscale$ 。该值越小,植被在屏幕上的分布越密集,取值范围为  $(0, +\infty)$ 。可由下式:

$$R = e^{-Rscale} \quad (5)$$

将  $Rscale$  的取值范围转换为  $(0, 1)$ ,且  $R$  与植被总密度成正比。

chiu<sup>[18]</sup>提出了用于聚类中心初始化的势函数,该函数可以计算点群中每个样本点的势,如果周围分布的样本点多,其势值就高,公式表示为:

$$p_i = \sum_{j=1, i \neq j}^n e^{\frac{-4d_{ij}^2}{r^2}}, i = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

其中,  $d_{ij}$  是样本点  $i$  与  $j$  之间的距离,  $r$  是距离阈值,超出这个距离阈值的样本点对点  $i$

的势影响很小。为了更敏感的探测样本点邻近范围内的分布密集程度, 凸显样本点间的相对差异,  $r$  值应随着点群总密度的增加而减小。

考虑到植被局部密度较大会造成植被的相互遮挡, 这部分树木可以用粗糙的 LOD 模型来表示, 因此本文将势函数应用到描述植被密度的问题上来, 势值就相当于每个植被的局部密度值,  $p_i$  值越大, 表示以植被  $i$  为圆心, 以  $r$  为半径的区域内植被分布越密集。 $L_{obs}$  是植被间最短距离的平均值, 该值随着总密度增大而减小。这个性质符合了区域半径  $r$  的需要, 同时由于在计算总密度时已经算得了该值, 可以避免重复计算, 因此直接将  $r$  值设定为  $L_{obs}$ , 考虑到计算的复杂度, 将上式简化为:

$$p_i = \sum_{j=1, i \neq j}^n \frac{1}{1 + \frac{4d_{ij}^2}{r^2}}, i = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

再经过下式转化,  $P \in (0, 1)$ , 且与局部密度成正比。

$$P = p_i / n \quad (8)$$

## 6 实验验证

在如下配置计算机上对本文提出的方法进行了验证。硬件配置: CPU 为 Inter Core2 at 2.4GHz, 内存大小为 2GB, 显卡型号为 ATI Radeon HD 4650。操作系统为 Microsoft Window XP, 开发语言为 VC++、NET 和 OpenGL。

实验所用的树木模型是基于 L 系统构建的白桦树模型。该模型由 34334 个三角面片组成, 其中 4958 个三角面片组成冠层, 29376 个三角面片组成枝干。将 L 系统树木模型加入到三维地形场景中, 共生成 2722 颗树, 根据衰减因子得出树干和冠层复杂度, 并以此为标准实时提取 LOD 模型。为了比较试验效果, 本文用了三种方法来简化这些树木, 并分别记录帧速率曲线 (图 8)。

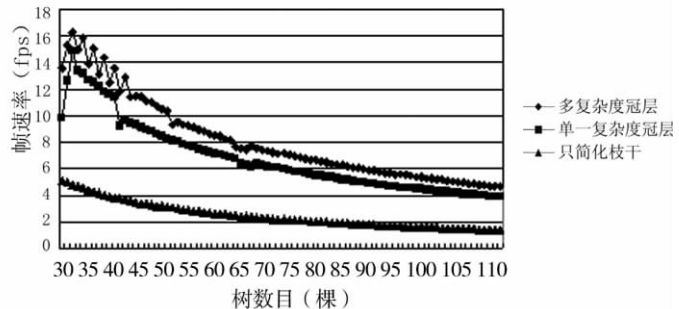


图 8 帧速率曲线图

Fig 8 Graph of frame rate

只简化枝干: 针对 L 系统树木的特点, 用 Procedural multiresolution 方法<sup>[1]</sup>实时简化树干部分。

单一复杂度冠层: 在简化树干的基础上, 用本文提出的方法简化冠层, 直接将树叶层简化为 LOD 模型, 而不考虑冠层的分区问题, 因此整个冠层 LOD 模型具有相同的单一复杂度。

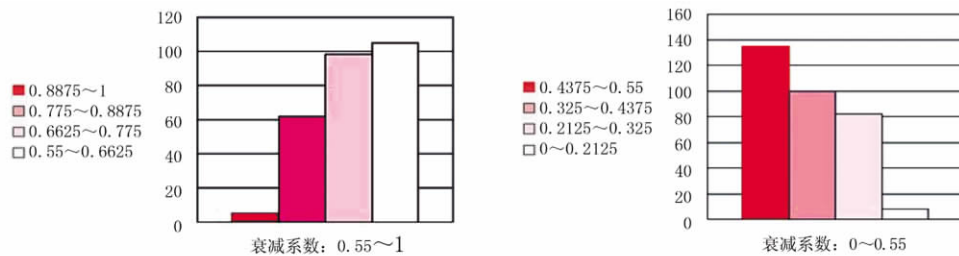
多复杂度冠层: 在简化树干的基础上, 将冠层分区, 用本文提出的方法生成多复杂度 LOD 模型。

由图中可见, 同时简化冠层和枝干可以大大提高场景的渲染效率, 这是由于在不影响显示效果的前提下, 场景中需要绘制的三角面片数量减少了。多复杂度冠层用较少的几何体来绘制对整体视觉效果影响不大的树木的背面, 因此其效率高于一复杂度冠层。可见

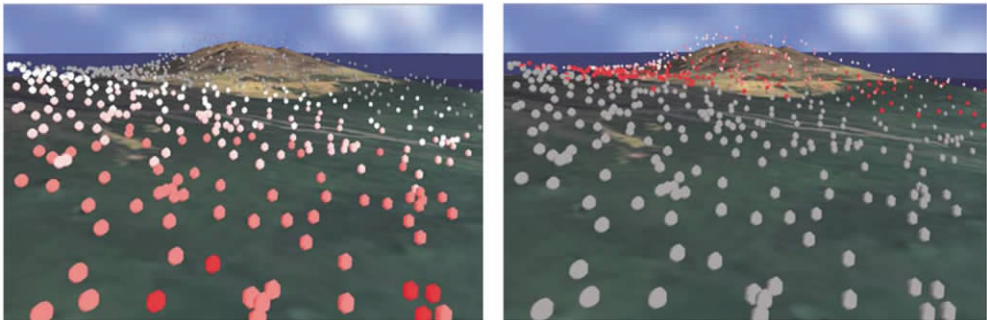
本文提出的动态 LOD 方法可以提高渲染多棵三维树木的效率。

取漫游路径上的一个场景，该场景中有 595 棵树木，用多复杂度冠层的方法来模拟这些树木。为了更加清晰地看出 LOD 模型复杂度的变化，用小球体表示树木冠层，用颜色深浅表达树木的细节程度，如图 9 所示，并附有相应的场景图。

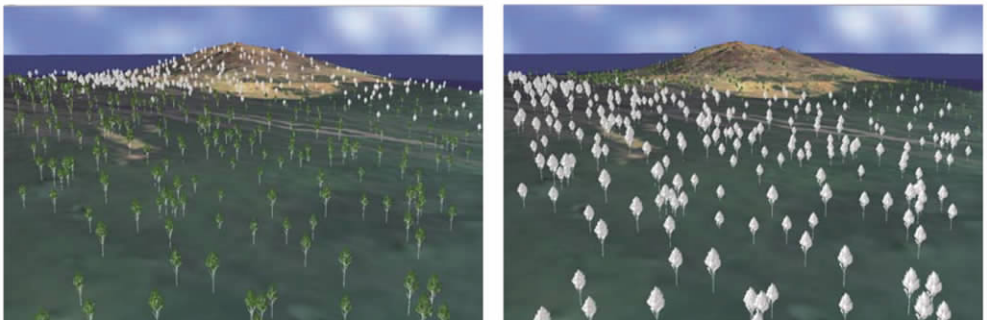
由上图可见，视距是植被复杂度衰减的主要影响因素，植被模型的复杂度基本上由近到远随距离增加而递减。其次植被密度也加速了复杂度的衰减，其中局部密度描述了植被间的遮挡情况，局部分布越密集的那些树木，复杂度衰减越快。由左侧的一组图中可见，视距相同的植被，局部密度越大，LOD 模型的复杂度越低。



(1) 细节程度与颜色的对应图 (The corresponding map of detail level and color)



(2) LOD 模型复杂度示意图 (The sketch map of LOD model complexity)



(3) 场景图 (The scene map)

图 9 LOD 模型复杂度示意图与对应场景图

(灰色的小球表示复杂度不在柱状图所示范围内的 LOD 模型，在场景图中这些模型都用灰色的树木表示)

Fig. 9 The sketch map and corresponding scene map of LOD model (gray ball is the LOD model with the complexity not in the bar chart; the models are gray trees in the scene map)

## 7 结论与讨论

本文提出了一种大规模森林场景实时渲染的动态 LOD 算法, 首先通过 L 系统建模生成三维植被模型, 经过枝干部分和冠层部分的分别简化, 转化成为枝干多分辨率模型和冠层多分辨率模型; 其次用枝干长度和树叶数量量化 LOD 模型复杂度, 用衰减因子实时得到每棵树需要渲染的枝干长度和树叶数量, 然后以这两个数值为标准, 从枝干和冠层多分辨率模型中提取 LOD 模型, 最后进行森林场景的渲染。本文将动态 LOD 方法运用于植被场景的三维模拟, 主要特点是:

为了高效的提取复杂度连续变化的 LOD 模型, 本文为树干系统生成了多分辨率字符串, 为冠层系统建立起了二叉树结构, 两者共同组成了树木的多分辨率模型, 该模型有序的存储了所有细节程度下的几何要素, 可以方便的提取所需要的那部分几何要素以构成树木 LOD 模型。

在冠层 LOD 模型提取中, 本文方法可以高效的提取视相关的多复杂度 LOD 模型, 同时有效保证组成 LOD 模型的每片叶子符合最小化误差方程要求。

本文提出的 LOD 调用标准, 将衰减因子作用于初始模型的枝干总长度和树叶总量, 实时计算出某一植被在三维场景中需要显示的枝干和冠层细节程度。该方法适用于各种植被模型, 具有较强的适普性和实用性。在定义衰减因子的同时考虑了视距和植被密度对植被复杂度衰减的影响, 可以在不影响显示效果的前提下最大限度的降低渲染量。

冠层简化中, 建立多分辨率模型的运算量较大, 虽然这个过程发生在预处理阶段, 不影响场景浏览速度, 但是仍然是一个需要改进的研究方向; 另外针叶林的树叶不是四边形, 不适用树叶合并算法来建立多分辨率模型, 因此怎样对这类树木的冠层进行简化, 也需要进一步研究。今后的工作中还将进一步研究如何将基于几何与基于图像的多种简化方法结合起来应用, 进一步提高绘制的速度和绘制的效果, 实现更大场景模型的实时绘制。

### 参考文献:

- [1] 宋铁英. 一种基于图像的林分三维可视模型. 北京林业大学学报, 1998, 20(4): 93~98.
- [2] Jakulin A. Interactive Vegetation Rendering with Slicing and Blending. Eurographic Short Presentations, Switzerland, Interlaken, 2000. 273~282.
- [3] Lluch J, Camahort E, Viv R. Procedural Multiresolution for Plant and Tree Rendering. 2nd international conference on Computer Graphics, Cape Town: ACM Press, 2003. 31~38.
- [4] Lluch J, Camahort E, Viv R. An image-based multi-resolution model for interactive foliage rendering. Journal of WSCG, 2004, 12: 507~520.
- [5] 陈彦云, 林琚, 孙汉秋, 等. 高度复杂植物场景的构造和真实感绘制. 计算机学报, 2000, 23(9): 917~925.
- [6] Oppenheimer P. Real time design and animation of fractal plants and trees. Computer Graphics, 1986, 22(4): 55~64.
- [7] Levoy M, Whitted T. The use of points as a display primitive. Technical Report, Computer Science Department, University of North Carolina, Chapel Hill, NC 27514, 1985.
- [8] Weber J, Penn J. Creation and Rendering of Realistic Trees. In: Robert Cook. SIGGRAPH 95, 1995. 119~128.
- [9] Deussen O, Colditz C, Stamminger M, et al. Interactive visualization of complex plant ecosystems. IEEE visualization '02, 2002(10), 219~226.
- [10] Remolar I, Chover M, Belmonte O, et al. Geometric Simplification of Foliage. Eurographics'02 Short Presentations, Germany, Saarbrücken, 2002. 397~404.
- [11] Remolar I, Chover M, Ribelles J, et al. View-dependent multiresolution model for foliage. Journal of WSCG, 20003, 11(2): 370~378.
- [12] Zhang X, Blaise F. Progressive polygon foliage simplification. Proceeding of 2003' International Symposium on

- Plant Growth Modeling, Simulation, Visualization and Their Applications. Beijing: Tsinghua University Press and Springer-Verlag, 2003:217~230.
- [13] Zhang X, Blaise F, Jaeger M. Multiresolution plant models with complex organs. Proceedings of ACM SIGGRAPH International Conference on Virtual Reality Continuum and Its Applications VRCIA. Hong Kong: 2006. 331~334.
- [14] Campos C, Quir R, Huerta J, *et al.* A multiresolution model for non-photorealistic rendering of trees. ICCS 2006, Part II, LNCS 3992, 2006. 310~317.
- [15] 过志峰. 基于模型的北方针叶林雷达散射特性分析及生物量反演研究. 北京: 中国科学院遥感应用研究所博士学位论文, 2005.
- [16] 沙从术. lod 技术在三维地形图实时可视化中的应用研究. 价值工程, 2011, (22): 55~61.
- [17] Kumsap C, Borne F, Moss D. The technique of distance decayed visibility for forest landscape visualization. International Journal of Geographical Information Science, 2005, 19(6): 723~744.
- [18] Chiu S L. Fuzzy model identification based on cluster estimation. Journal of Intelligent and Fuzzy Systems, 1994, 2(3): 267~278.

## A real-time visualization method for large 3-D vegetation scenes

HAN Xiu-zhen<sup>1</sup>, TAN Ji-qiang<sup>2</sup>

(1. National Satellite Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China;

2 State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying Mapping and Remote Sensing, Wuhan 430079, China)

**Abstract:** This paper addresses an approach for dynamic and continuous multi-resolution visualization of large forests. Firstly, the approach uses the L-systems to generate 3D tree models, which are composed of two kinds of geometric elements: branches and leaves. The plants are simplified respectively to multi-resolution models of branches and foliage by our method. Secondly, the approach quantifies the resolution of LOD models by the length of branches and the quantity of foliage. The branch length for the branch LOD model and the leaf quantity for the foliage LOD model are obtained by the decay factor. Taking the values as the criterion, we extract LOD models from the multi-resolution models of branches and foliage in real time. Finally, we render the forest scene. This paper presents a continuous LOD rendering for forest landscape, and the main originalities of our method are summarized as follows. (1) To improve the efficiency for extracting the continuous LOD models, the multi-resolution chains and the binary tree structures are established respectively for the branches and the crowns, both of which consist of the preliminary models of the tree. (2) Our method for generating crown LOD models here shows that, they can implement large forest scene real-time visualization. (3) This paper makes new criteria for the LOD models, which use the decay factor to act on the original branch length and the original leaf quantity. In this way, the levels for displaying trunk and branches are calculated. This method is applicable to all kinds of plants with strong universality and practicability. So how to simplify crowns of such kind of trees is another important research subject. In future work, we should combine geometry-based and image-based simplification methods to further speed up visualization of large plant scenes.

**Key words:** L system vegetation; dynamic LOD; geometrical simplification; forest scene