

林木虚拟生长建模方法及建模工具研究综述和展望

焦 祥, 郑加强, 张慧春, 苏朦朦

(南京林业大学 机械电子工程学院, 江苏 南京 210037)

摘要: 林木的形态结构受到树种或林木个体的遗传因素(激素信号、养分竞争等)和立地条件、经营措施以及林木的竞争状态(光照分布、温湿度、农艺措施等)的影响, 因此, 掌握各种因子影响林木生长过程的机制对于林业生产和精准林业研究与实践非常重要, 但如果实时地对实际林木进行生长过程影响因子研究, 则存在很大的时空局限性和很高的测试成本, 因而采用虚拟技术开展林木生长过程研究引起国内外的高度关注。系统地综述了国内外开展林木虚拟生长研究的 7 种建模方法和 10 种建模工具, 然后提出基于林木虚拟动态生长模拟的“林木云”研究展望和基于计算机视觉系统的林木三维建模方法及相关建模工具的研究建议, 并分析了林木 4D 虚拟动态生长模型等, 从而促进林木虚拟动态生长技术研究。图 1 参 54

关键词: 森林测计学; 林木虚拟模型; 动态生长; 林木云; 4D 模型; 综述

中图分类号: S758

文献标志码: A

文章编号: 2095-0756(2015)06-0966-10

Research and perspectives of modeling methods and modeling tools of virtual forest tree growth

JIAO Xiang, ZHENG Jiaqiang, ZHANG Huichun, SU Mengmeng

(College of Mechanical and Electronic Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu, China)

Abstract: The morphological structure of forest trees are affected by tree species or individual tree genetic factors (hormone signal and nutrient competition), site conditions, management measures and competition status of forest (light distribution, temperature, humidity, and agronomic measures). Mastering the mechanism study on the determinants of the forest trees growth process is very important for the forestry production and precision forestry research and practices. The real-time field survey of the determinants of the forest trees growth process is constrained greatly by time and space, and requires high test cost. Therefore, applying virtual technology to conducting the research on the forest trees growth has drawn great attention at home and abroad. This paper systematically reviewed 7 modeling methods and 10 modeling tools for studying the virtual forest tree growth, proposed the research prospect of forest tree cloud based on the simulation of dynamic growth of virtual forest trees, suggested on computer vision system based 3D forest trees modeling and the modeling tools, analyzed the models of forest trees growth in 4D to promote the research on the technology of the virtual dynamic growth of forest trees. [Ch, 1 fig. 54 ref.]

Key words: forest measuring; virtual model of forest trees; dynamic growth; forest tree cloud; 4D model; review

收稿日期: 2014-12-10; 修回日期: 2015-04-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(31371963); 江苏省自然科学基金青年基金资助项目(BK20130965); “十二五”国家科技支撑计划资助项目(2014BAD08B04); 江苏高校优势学科建设工程资助项目; 江苏省杰出青年教师培育聘专项目(2012256); 南京林业大学高学历人才基金资助项目(GXL201208)

作者简介: 焦祥, 博士研究生, 从事农林机械化和植物虚拟生长研究。E-mail: js_jiaox@126.com。通信作者: 郑加强, 教授, 博士生导师, 从事农林信息化、植保机械和智能测控研究。E-mail: jqzheng@njfu.edu.cn

森林是人类赖以生存的复杂生态系统, 需要通过精准林业的实践来实现以最小资源投入、最小环境危害来获得最大林业收益的目标^[1]。林木虚拟生长是以可视化方式虚拟林木在三维空间中的形态结构随时间推移的变化规律及生长发育过程^[2]。国内外学者经过多年的努力, 在林木虚拟生长方面取得了一定的研究成果, 在计算机上虚拟仿真林木的生长, 可以非常直观地对林木的生长过程进行研究, 发现传统研究方法和技术手段难以观察到的规律^[3]。实践证明, 林木虚拟生长研究具有很大的经济、社会和生态效益。本文系统地综述国内外开展林木虚拟生长研究的建模方法及其典型建模工具, 然后结合相关新技术的发展提出林木虚拟生长建模思想及新的建模方法和建模工具等的建议, 促进虚拟林木动态生长技术的研究。

1 林木虚拟生长建模方法研究综述

美国学者 Newham^[4]早在 1964 年就建立了花旗松 *Pseudotsuga menziesii* 模型, 建立该模型后 Newham 又对它进行改善并对黑松 *Pinus thunbergii* 进行分析建模。林木可视化建模的思想起源于 Honda^[5]在 1971 年提出的递归分枝结构建模的思想, 他提出利用少量的林木几何属性(分枝角度、节间的长度比例等)进行林木的模拟。目前虚拟林木生长最常用的方法有 L-系统(L-System), 迭代函数系统(Iterated Function System, IFS), 粒子系统模型方法(Particle System Modeling Technique)和基于图像的林木三维重建方法以及基于激光扫描技术的林木三维建模方法等。

1.1 L-System

1968 年美国生物学家 Lindenmayer 提出了 L-系统理论基础, 为林木形态结构三维可视化奠定了基础, 可用于建立林木从微观细胞发展到整棵树的过程模型^[6-8]。L-系统的本质是一个重写系统, 通过 1 条公理和几条产生式, 一步一步进行迭代, 就能生成形态结构复杂的林木^[9]。L-系统提供了一个便捷的理论和编程框架来建立动态的林木结构模型, 同时可以生成代表林木的拓扑结构、几何特征和图形等^[10]。国内外学者先后又提出了上下文相关 L-系统、随机 L-系统、参数 L-系统、开放式 L-系统、时控 L-系统、环境敏感型 L-系统等^[11], 其中参数 L-系统、开放式 L-系统及时控 L-系统等可用来实现林木的动态生长建模。

Dorr 等^[12]开发基于 L-系统的植物结构模型融入雾滴运动轨迹, 模拟分析了草甘膦在棉花 *Gossypium hirsutum* var. *sicala*, 苣荬草 *Sonchus oleraceus* 和野燕麦 *Avena ludoviciana* 上的沉积, 该耦合模型可使人们对喷施农药的分布情况(如植物表面的沉积量、地面的沉积量或是残留在大气中的农药量等)有更直观的了解, 从而可以提高农药在靶标植物上的有效沉积量, 使农药施用的效益最大化并使农药对环境的影响最小化。Sun 等^[13]提出了基于 L-系统的林木智能建模方法, 并通过实验验证了该方法的可行性, 结果表明: 通过改变一些相关参数便可虚拟林木的生长。Wu 等^[11]以龙眼 *Dimocarpus longan* 为研究对象开发了 LSTD(a tree designer based on L-Systems)系统。刘东平等^[14]基于参数 L-系统, 建立了环境变化的植物动态生长模型, 并建立了简单的植物趋光性、背离性模型, 较为真实地仿真林木生长过程。Hamon 等^[15]提出了实时交互型 L-系统, 该系统可以让用户和所构建的三维植物进行实时互动, 即可进行拉伸植物茎干长度、改变枝茎着生角度和调整枝干弯曲度等操作。

1.2 迭代函数系统方法

迭代函数系统 IFS 是 Hutchison(1981)和 Bamsley(1985)提出并发展起来的一种研究分形集的数学方法^[7], 属于分形构形系统。由于林木形态结构的自相似性, 因此可借助计算机强大的迭代计算能力, 应用分形理论的自相似性、层次的多重性和不同层次的规则的统一性, 并利用纹理、光照等多种已有的多边形几何面构图技术对树体渲染, 生成具有高度真实感的三维分形林木^[16-17]。

Wang^[18]将云模型和分形方法结合在一起得到云分形模型, 并用于植物的模拟。结果表明: 该模型对于不确定性问题的分析非常有效。邹运兰等^[19]利用 IFS 建模方法和双缓冲技术实现了随风摇曳的蕨叶和生长林木的动态模拟。赵鹏飞^[20]基于迭代函数系统, 对林木的组成部分(树枝和树叶)进行受力分析, 实现林木随风摇曳的动态模拟。Xu 等^[21]提出基于分形理论并结合林木形态特征的林木三维模拟方法, 并借助 Visual C++和 OpenGL 的开发平台实现了三维林木的优化建模和可视化虚拟。

1.3 粒子系统模型方法

1983 年, Reeves^[22]提出不规则模糊物体的建模方法, 即粒子系统, 其基本思想是将许多形状简单的微小粒子作为基本元素聚集起来, 形成一个不规则的模糊物体^[23]。林木的形态结构可以用不同的粒子排列组合来模拟, 粒子在生命周期中的变化反映了林木生长发育甚至死亡的过程^[7]。粒子系统被看作是模拟不规则动态物体最成功的方法。Reeves^[22]利用粒子系统模型分别虚拟了阴影林木、近森林场景等。宋万寿等^[24]运用基于粒子系统的方法, 用粒子的诞生、活动和死亡 3 个阶段来描述火焰模型及从植物生长来描述林木模型。雷蕾等^[23]基于粒子系统思想提出了一种基于能量模型的叶片纹理构造算法, 充分发挥了粒子系统在模拟自然界中复杂且有规律事物的优势, 模拟出的叶片具有较高的真实性。

1.4 基于类二叉树的三维林木重构

为了提取自然界分枝植物的生长规则, 方逵等^[25]提出一种基于类二叉树结构的虚拟植物分枝结构三维重构方法, 以克服 L-系统对植物生长规则的描述和定义的不直观性与不确定性, 阐述分枝植物生长规则描述的可操作性。但由于植物生长结构的复杂性, 该方法在建立类二叉树模型时, 还需要人工进行识别, 影响适用性, 还需要研究类二叉树模型的自动化改进, 自动建立正确的类二叉树模型。

1.5 基于图像的林木三维重建

基于图像的虚拟方法是指通过采集林木 2D 图像, 并利用基于图像的林木三维重建技术生成林木的 3D 模型的方法^[26-27]。基于图像的三维重建技术分为基于单幅图像的三维重建技术和基于多幅图像的三维重建技术。其中, 基于多幅图像的三维重建技术已能生成具有强烈真实感的三维图像; 对基于单幅图像的三维重建技术的研究相对来说较少, 但由于其建模效率高, 越来越得到人们的重视^[28]。Quan 等^[27]实现了奈弗台属 *Poinsettia* 植物、鹅掌柴 *Schefflera octophylla* 及 1 株室内树的三维重建。Tang 等^[29]提出最大限度地减少用户干预的图像建模方法, 并分别对盆栽树和大中型林木进行三维重建, 达到了非常逼真的建模效果。Teng 等^[30]提出了用几幅从很窄的可视角度范围捕获的图像来重建林木三维模型系统, 该系统在进行三维重建时仅需少量的几幅图像, 因而在实际应用中具有更大的灵活性。Lopez 等^[31]提出一种新型的基于图像的无叶林木的三维重建技术, 实现了对三维林木的真实还原。颜君萍等^[26]提出基于图像的造型方法, 结合从图像上提取林木枝干的相关信息和实测数据得到林木的分枝信息, 实现了林木形态结构的重建。

1.6 基于激光扫描技术的林木三维建模

激光扫描技术能反映林木实时、动态变化的树冠特征以及对林木结构等信息进行有效捕捉, 有助于构建精准的单木 3D 模型^[32]。在林木的扫描测量过程中, 有 2 种不同的方法: ①单一扫描方法, 即直接将扫描仪固定于样本地中心, 将周围的景物扫描一遍; ②复合扫描方法, 即在样本地中心选择 3 个以上的点, 在每个点各扫描 1 次, 并保证扫描区域有一定的重叠部分^[33]。相比之下, 利用复合扫描方法得到林木的相关数据更加详尽, 但测量时间比较长。激光扫描仪测量林木生成的 3D 点云可用于林木的定量分析和林木的三维重建, 同时可以测量林木的位置、高度、冠层、树种和树干曲线等特征^[34]。然而由于林木形态结构复杂、枝叶遮挡等问题, 造成测量所得的林木点云数据存在一定的误差, 而且激光扫描仪技术在林业上的应用缺少必要的尝试, 将它应用于林木 3D 建模将是林木建模研究中的新的发展趋势。Park 等^[35]利用地面激光扫描仪测量所获取的三维点云数据来对单株林木进行建模, 但由于树叶和枝干不能很好地从背景中分割出来从而使建立的模型具有一定的误差。高士增^[36]基于地面三维激光扫描的点云数据, 构建林木枝干的等值线模型和 Delaunay 三维网模型, 实现林木形态结构参数的自动和人机交互式提取。Kelbe 等^[37]开发了一套激光扫描系统并用该扫描系统自动重建了树干模型, 模型中树干的细节(如锥度、延伸和倾斜度)得以重建再现。王晓辉等^[38]基于三维激光扫描获得的林木离散点云数据, 开发出一个交互式半智能化的单树几何建模系统。

1.7 基于三维数字化仪的林木三维重建

三维数字化仪已经迅速发展成为一种重要的数据获取途径, 该仪器能够快速精确地获取 360°的 X-Y-Z 空间坐标, 并通过配套的软件迅速重建研究对象的三维模型。三维数字化仪在获取林木三维坐标参数时, 同时记录每个枝条的直径, 其值用游标卡尺等测量工具来测量, 从而得到林木的三维拓扑重构模型^[39]。章兰芬等^[40]基于三维数字化仪, 并利用 Pias Digit 和 Vege STAR 软件, 建立了 13 年生高纺锤形苹

果树 *Malus domestica* 的数字化模型。王菲^[41]利用三维数字化仪并结合 Piaf Digit 软件和 Vege STAR 软件构建了苹果树三维模型。

2 林木虚拟生长建模工具综述

要实现林木虚拟生长, 必须有良好的软件开发环境, 目前包括 C, C++, VC++, Java, VB, Matlab 等软件, 但多选用 OpenGL 作为图形编程平台。OpenGL 是一种与硬件、窗口系统和操作系统相独立的一系列应用程序编程接口(Application Programming Interface, API), 提供一种直观的编程环境, 由大量功能强大的图形函数组成, 大大简化三维图形程序, 开发人员可以利用这些函数对整个三维图形进行光色渲染, 从而方便地绘制出客观世界逼真的三维景象^[42]。国内外虚拟植物建模工具包括 AMAP, Vlab/L-Studio, SpeedTree, Xfrog, GreenLab, LSTree, Plantstudio, LMS/SVS, Smart-Forest 等, 其中不少是基于 L-系统开发的, 而也有不少仅用于虚拟游戏场景等中的林木虚拟设计或用于提高虚拟林木生长教学效果。

2.1 AMAPstudio

法国农业发展国际合作研究中心(French Centre for International Cooperation in Agriculture Research for Development, CIRAD)的 de Reffye 等^[43]建立的 AMAPstudio 系列植物结构建模软件具有描述植物生长、死亡、枝条分布情况和三维可视化模拟植物生长过程的功能。AMAPstudio 模型从植物结构角度包括植物重建、探索、分析和研究植物生长的应用程序和模型, 适用于模拟高大植物。

2.2 Vlab/L-Studio 和 TreeSketch

加拿大 Calgary 大学 Prusinkiewicz 等^[44]分别开发了基于 L-系统的虚拟植物模拟软件 Vlab/L-Studio 和 TreeSketch。Vlab/L-Studio 可在 Windows, MAC OSX 和 Linux 系统下, 能生成各种植物的形态结构图, 但使用复杂, 不能很好地虚拟植物和环境间的交互影响, 且不能构建大型、可扩展的植物模型。TreeSketch 可在 iPad 上进行全功能交互式三维林木建模, 即可在平板电脑上进行林木的互动过程建模^[45]。创建 1 株树正如简单地在屏幕上绘画并观察林木生长的过程。TreeSketch 能在数秒内创建各种形式的、复杂而自然的林木模型。该系统将林木生长过程集成于多点触控平板电脑界面, 提供详细的、基于林木自组织概念来控制生成林木形式的程序, 并模拟林木从幼苗生长过程中树枝对空间和光线的竞争。建模人员可以控制林木的生长过程, 即能用程序刷引导生长过程, 随林木生长可改变参数, 实现交错控制和自动生长以及编辑生成林木的形式。

2.3 Xfrog

由德国 Greenworks 公司开发的植物制作软件 Xfrog, 通过改变植物生长的相关参数(生长速度、分枝数量、向地性和趋光性等)来虚拟植物从种子到成年的动态生长过程。从而可以让用户简单快捷、逼真详细地构造复杂林木、灌木、花卉的三维模型, 并能够有效实现林木的生长模拟^[46]。

2.4 SpeedTree

美国 Interactive Data Visualization, Inc. (IDV)的 SpeedTree 软件专门用于三维林木建模, 可快速建立和渲染大片林木, 并且其本身带有强大的林木库^[47]。利用 SpeedTree 建立林木动态生长模型时, 可以在使用极少多边形情况下创造高度逼真的植物, 如果在 SpeedTree 中加入风场, 可以实现林木随风飘动的效果^[48]。熊壮等^[48]基于 SpeedTree 实现了动态三维林木的建模; 吴晓晖^[47]通过对 Virtools 二次开发机制及 SpeedTree 林木开发机制的研究, 验证了林木在虚拟森林场景中绘制、运行效率及风效效果。

2.5 GreenLab

以中法实验室(Laboratoire Sino'Européend'Informatique, d'Automatique et de MathématiquesAppliquées/Sino French Lab in Computer Science, Automation and Applied Mathematics, LIAMA)为代表, 建立了 GreenLab 模型, 并在可控环境下用西红柿 *Lycopersicon esculentum*, 小麦 *Triticum aestivum*, 菊花 *Chrysanthemum morifolium* 对 GreenLab 模型进行标定和验证^[49], 对棉花和玉米 *Zea mays* 地上部分和根系的三维数字化和可视化进行了研究, 但虚拟林木的研究相对较少^[42]。利用数学、自动化、软件工程、机器学习、计算机图形学和渲染技术, GreenLab 可以进行不同类型的应用实践, 如促进植物建模及其可视化以及植物生长相关技术、促进植物建模及其可视化技术转移到农业、林业和生物科学领域^[49]。2009 年, 国红等^[50]以油松 *Pinus tabulaeformis* 为对象, 首次将 GreenLab 模型应用于林业, 实现了油松幼树动

态三维可视化的模拟。2011 年, 国红等^[51]基于 GreenLab 模型建立了 18 年生和 41 年生油松形态的动态三维可视化模型。

2.6 LSTree

林郁欣等^[52]基于植物形态结构特征、生长发育的生理生态过程, 提出由器官尺度上升单树尺度的 L-系统文法规则组合拼接方法, 设计了单株植物建模工具软件的功能和体系结构, 在 VC++ 开发环境下采用 Open GL 图形标准、VRML 虚拟现实建模语言开发完成单树建模工具软件 LSTree。系统具有单树三维建模、生长过程模拟、林木与环境交互模拟、三维可视化交互等功能, 支持通用三维模型格式。

2.7 PlantStudio

Plantstudio 植物图形软件(Botanical Illustration Software), 基于参数驱动模拟建立草本植物(非木质), 如野花、鲜花、蔬菜、杂草、牧草等的 3D 植物模型。在使用 Plantstudio 植物图形软件进行植物 3D 建模时, 可直接调用植物库里相应的植物 3D 模型, 也可对已有的植物进行变异得到新植物品种, 甚至可以创建多植物成分的植物群, 因此可用于林区杂草的虚拟生长模型研究。

2.8 LMS/SVS

美国农业部林务局 Pacific Northwest Research Station 开发了集成软件 LMS(Landscape Management System)和可视化软件工具 SVS(Software Virtualization Solution), 应用生长预测模型和可视化工具相结合, 进行植物的生长模拟, 建立起虚拟植物的通用模型, 最终实现对不同类型植物的模拟。LMS 由许多独立的程序组成, 进行生长预测、生成表格和图形显示、存储库存信息和将这些不同程序连接到一个统一的系统。

2.9 Smart-Forest

美国 University of Illinois 空间成像实验室开发的 Smart-Forest 森林模型引入虚拟现实技术, 将巨大的森林数据库和模拟结果用虚拟陆地森林图像在景观水平直观地展示出来^[53]。几何建模方法通常展示单株林木, Smart-Forest 提供的方法能有效地展示不同景观场景的区域, 特别适用于林木茂密但其邻近观测点已失去有效性的区域。

2.10 GFMSM

贡嘎山森林演替模型(GFMSM: Gongga Forest Succession Model)是以林窗模型为基础的单木模拟模型, 以多个小面积(斑块、patch)上的林分表现作平均, 描述林地斑块中单木的萌发、生长、死亡过程、树种更替及与环境因子(水分、光照、热量、养分)的关系, 并按随机过程方式模拟环境条件的变化, 仿真模拟林木的更新与死亡中的外在和内禀不确定性^[54]。模型基本上代表了中国西南山区生长的 36 种主要建群树种类型, 可分析优选各树种的生态学参数以反映中国南方山区林地演替和物种的基本特性。

3 林木虚拟生长建模研究展望

3.1 创建基于林木虚拟生长模拟的林木云

单纯林木结构的虚拟已发展较成熟并取得较理想的虚拟效果, 结构模型可以实现利用较少的参数虚拟出漂亮的林木结构图形。但对于农林生产领域, 相对于林木的形态结构, 开展林木功能(生长过程)模型特征的相关模型耦合的研究将更有意义。为结合前面分析的国内外有关林木虚拟生长建模方法、建模工具等, 提出如图 1 所示的林木虚拟生长模拟的林木云的构建框图。即通过先进的传感技术测试与分析林木生长因子, 利用“大智移云(大数据、智能化、移动互联网、云计算)”平台创建“林木云”, 同时利用和创新林木生长虚拟建模方法与工具建立林木虚拟生长三维模型, 更能真实地反映林木生长过程及周围环境对其的影响, 为林业生产提供高效可行的管理措施, 推动中国精准林业研究及林业生产可持续发展。

随着“大智移云”技术的进一步发展以及智能科学和认知科学的技术创新, 所有作业设备可能具有识别、语言、运算、控制甚至意识、精神等生物特性, 而林木就是有生命的生物体, 则作业设备的智能化与生物体之间的信息交换和虚拟现实技术研究, 将极大地促进“大智移云”在农林业的应用, 农林动态参数实时监测与信息化的水平和程度将得到极大的提高。利用大数据对获取的数据进行整合挖掘, 可将枯燥的数据转换成动态变化的三维模型, 能够形象直观地研究林木生长规律和周围环境对其生长的影

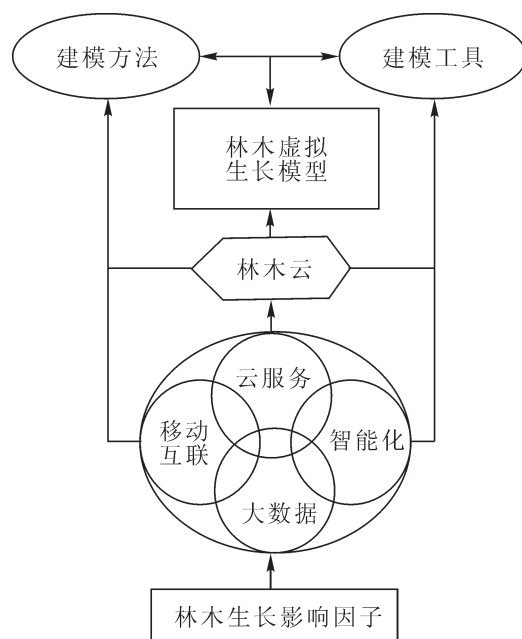


图 1 林木虚拟生长模拟的林木云构建

Figure 1 Forest tree cloud construction for virtual forest tree growth model

响以及对其采取相应的管理措施后林木发生的种种变化等。

云计算作为一种新的技术趋势得到快速发展。在林业生产实践中，可通过搭建一个林木生长云计算平台，来构建基于云计算的林木生长过程中各类数据信息的资源共享系统。也就是，利用传感与智能化、大数据、移动互联网和云计算等技术，建设“林木云”，融合林木生长历史数据、林木生长发育实时数据、林木生长环境调控数据，以及挖掘森林资源信息元数据、林木新品种图像描述数据、林分树高立地分级、植物生长调节物质等调控因子与林木胁迫因子及其危害预测与预报和森林火灾信息数据等，并将其接入林木生长云计算平台，从而可让不同林业部门和科研单位的科研人员能方便快捷地共享“林木云”。利用“林木云”对林木进行三维模型构建时，可方便地利用其提供的林木生长参数，解决费时、费力且误差较大的人工实地测量。

3.2 林木虚拟生长模型建模方法和建模工具的创新研究建议

目前，基于计算机视觉系统的三维建模在工业方面应用较多，技术也较成熟，如：考古学及文物保护领域，即“数字遗产”；建筑物三维建模；人头部和脸的三维重建，并能够实现人脸部动画。但该建模方法在农林方面缺少必要的尝试。德国 MVTec 公司开发的 HALCON 软件支持 C, C++, C#, Visual Basic 和 Delphi 等多种编程语言进行开发。HALCON 11 具有三维表面比较功能，即将一个三维物体的表面形状测量结果与预期形状进行比较。HALCON 提供的所有三维技术(如多目立体视觉或片光即 sheet of light)，都可用于表面重构；同时也可通过三维硬件扫描仪进行三维重构。而且 HALCON 还支持多种三维目标处理的方法，如点云的计算和三角测量、形状和体积等特征计算、通过切面进行点云分割等。因此可以考虑应用 HALCON 研究虚拟林木生长模型。用 HALCON 软件建立林木生长三维模型时，可采用三维激光-扫描仪从不同的角度对林木进行扫描，然后用三维激光扫描仪自带的拼接软件将从不同角度扫描获取的林木点云数据进行拼接得到林木的三维点云数据，再将林木的三维点云数据导入到 HALCON 软件中，用 HALCON 软件的三维目标处理功能，计算林木生长参数(树干高度、直径，树枝长度、直径和着生夹角等)，最后利用 HALCON 软件的三维数据快速可视化功能将获取的林木生长参数进行三维可视化处理，从而实现林木生长三维模型的重构。利用 HALCON 对林木进行三维重建的优点是可以利用其三维表面比较功能对重建的三维模型与测量结果进行比较，验证林木三维模型的精确度。同时可以利用 HALCON 的三维目标处理，对所建的林木三维模型计算其形状和体积等特征，从而可以对林木的形态结构进行优化，为园林工作提供最佳的管理措施；同时对林木三维模型体积的计算，可以实现对成材量估量，为木材的生产实践提供理论依据。

3.3 林木 4D 虚拟动态生长模型研究

目前,国内外已经开展了大量的林木虚拟生长模型研究,但均是在 2D 平面、3D 空间研究林木的形态结构特征及动态生长信息。在 3D 空间对林木进行虚拟时,只能研究林木的空间结构特征,无法便捷地研究林木形态结构的变化和时间的关系,林木真实感和动态性能还相对较差。在 3D 空间坐标系中引入和耦合时间维度,即可变为在 4D 空间建立林木动态生长模型,这样便可以将林木的空间结构特征的变化和时间关系实时地联系在一起,由此得到的数据更有利于建立林木的动态生长模型,因此 4D 可视化将携带更多信息量,并提高信息密度。特别地,当林木 4D 虚拟生长将以实际林木为基础,获取真实林木图像,对实际林木的细节(如同叶位的叶长、叶宽、叶形、叶片空中伸展曲线、叶色、叶片衰亡、不同节间的节间长、不同叶位的叶鞘长度和颜色)进行尽可能 100%还原,然后定制融入一系列随时间轴变化的参数和生长因子(如光合作用等),强化胁迫因子的逆境记忆,不断采取逆境锻炼,就可以更加真实地模拟林木生长动态过程。甚至可以通过虚拟基因信息对林木 3D 结构生成工作机理,优化树种,为选育新品种提供理论依据,可缩短培育周期。

4 结束语

林木虚拟生长从简单的 2D 字符串重写,发展到具有动态效果的 3D 虚拟,乃至 4D 虚拟动态生长,从简单的林木结构模型,发展到考虑林木生理生态功能的结构-功能模型以及随机模型。本文综述了林木虚拟生长建模方法和建模工具,结合“大智移云(大数据、智能化、移动互联网、云计算)”技术,分析探讨了基于林木虚拟动态生长模拟的“林木云”,提出了基于计算机视觉系统的建模方法和林木 4D 虚拟动态生长模型等。今后,随着相关技术及精准林业研究的进一步发展,对林木虚拟动态生长模型的研究必将成为精准林业的研究热点,由试验研究转向生产应用,由技术形成产业,推动中国林业建设开创崭新的局面。

5 参考文献

- [1] 郑加强,徐幼林.可持续发展的精确林业思想研究[J].南京林业大学学报:人文社会科学版,2004,4(3):26-30.
ZHENG Jiaqiang, XU Youlin. Study on precision forestry from sustainable development's perspective [J]. *J Nanjing For Univ Hum Soc Sci Ed*, 2004, 4(3): 26-30.
- [2] GUO Yan, LI Baoguo. New advances in virtual plant research [J]. *Chin Sci Bull*, 2001, 46(4): 273-280.
- [3] 欧中斌,廖桂平,喻飞.虚拟植物生长建模[J].系统仿真学报,2006,18(增刊1):291-294.
OU Zhongbin, LIAO Guiping, YU Fei. Modeling of crop growth virtual plant [J]. *J Syst Simulation*, 2006, 18(supp 1): 291-294.
- [4] NEWHAM R M, SMITH J H G. Development and testing of stand models for Douglas fir and Lodgepole pine [J]. *For Chron*, 1964, 40(4): 494-504.
- [5] 王春华,杨克俭,韩栋.基于分枝类型和空间点的三维树木建模方法[J].计算机应用研究,2009,26(4):1591-1592,1597.
WANG Chunhua, YANG Kejian, HAN Dong. Trees' 3D modeling based on branching type and space points [J]. *Appl Res Comput*, 2009, 26(4): 1591-1592, 1597.
- [6] LINDENMAYER A. Mathematical models for cellular interactions in development [J]. *J Theor Biol*, 1968, 18(3): 300-315.
- [7] 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.
LONG Jie, SU Xiyu. Research and progress of arboreous plant 3D visualization in China [J]. *For Mach & Wood-working Equip*, 2007, 35(6): 4-7.
- [8] WILSON P A, CHAKRABARTY S. The virtual plant: a new tool for the study and management of plant diseases [J]. *Crop Prot*, 1998, 17(3): 231-239.
- [9] OMEL'KO A M. L-System-based model of growth of dark coniferous tree species [J]. *Contemp Problem Ecol*, 2008, 1(2): 272-277.

- [10] RENTON M, KAITANIEMI P, HANAN J. Functional-structural plant modelling using a combination of architectural analysis, L-Systems and a Canonical Model of Function [J]. *Ecol Modeling*, 2005, **184**(2/4): 277 – 298.
- [11] WU R J, CHEN C C, TANG L Y, *et al.* Simulation on Longan tree morphology and growth based on L-Systems [J]. *Acta Hortic*, 2010, **863**(1): 659 – 664.
- [12] DORR G, HANAN J, ADKINS S, *et al.* Spray deposition on plant surfaces: a modelling approach [J]. *Funct Plant Biol*, 2008, **35**(10): 988 – 996.
- [13] SUN Suoxi, JIA Jinyuan, JAEGER M. Intelligent tree modelling based on L-system [C]//CAID & CD 2009. *IEEE 10th International Conference on Computer-Aided Industrial Design & Conceptual Design*. Wenzhou: IEEE, 2009: 1096 – 1100. doi: 10.1109/CAIDCD. 2009. 5375256.
- [14] 刘东平, 张文俊, 田超, 等. 一种基于环境变化的树木动态生长仿真模型[J]. 计算机仿真, 2010, **27**(9): 278 – 280, 290.
- LIU Dongping, ZHANG Wenjun, TIAN Chao, *et al.* A dynamic growth simulation model of trees based on environmental changes [J]. *Comput Simul*, 2010, **27**(9): 278 – 280, 290.
- [15] HAMON L, RICHARD E, RICHARD P, *et al.* RTIL-system: a real-time interactive L-system for 3D interactions with virtual plants [J]. *Virtu Real*, 2012, **16**(2): 151 – 160.
- [16] 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 – 88, 92.
- LI Qingzhong, HAN Jinshu. Study of realistic tree simulation based on IFS [J]. *Microcomput Dev*, 2005, **15**(7): 86 – 88, 92.
- [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.
- ZHONG Lanfen, WANG Yan, CHENG Lei, *et al.* IFS Generation algorithm of 3D fractal trees [J]. *Trans Shenyang Ligong Univ*, 2005, **24**(1): 28 – 31.
- [18] WANG Zhaohong. Cloud theory and fractal application in virtual plants [J]. *Int J Int Syst Appl*, 2011, **3**(2): 17 – 23.
- [19] 邹运兰, 杨志红, 王仁芳. 基于迭代函数系统 IFS 的动态树木模拟[J]. 计算机应用与软件, 2012, **29**(3): 118 – 121.
- ZOU Yunlan, YANG Zhihong, WANG Renfang. Dynamic tree simulation based on iterated function system [J]. *Comput Appl Software*, 2012, **29**(3): 118 – 121.
- [20] 赵鹏飞. 基于 IFS 的树木摇曳的动态模拟方法研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2013.
- ZHAO Pengfei. *Research on Dynamic Simulation of Trees Swaying Based on Iterated Function System* [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2013.
- [21] XU Xudong, YE Jingqing, LÜ Guanfeng. 3D tree modeling and visualization simulation based on fractal [J]. *Appl Mech & Mat*, 2013, **347/350**: 2869 – 2873.
- [22] REEVES W T. Particle systems—a technique for modeling a class of fuzzy objects [J]. *Comput Graphics*, 1983, **17**(3): 359 – 376.
- [23] 雷蕾, 郭新宇, 周淑秋. 基于粒子系统思想的叶片纹理构造[J]. 计算机工程与应用, 2004, **40**(36): 218 – 219.
- LEI Lei, GUO Xinyu, ZHOU Shuqiu. Construction of leaf veins based particle system [J]. *Comput Eng Appl*, 2004, **40**(36): 218 – 219.
- [24] 宋万寿, 赖建伟. 基于粒子系统方法的焰火及树木模拟[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 1996, **8**(4): 254 – 258.
- SONG Wanshou, LAI Jianwei. Fire works and trees modeling based on the approach of particle system [J]. *China J CAD&CG*, 1996, **8**(4): 254 – 258.
- [25] 方遼, 敬松, 沈陆明, 等. 基于类二叉树的虚拟植物分枝结构三维重构[J]. 农业工程学报, 2011, **27**(11): 151 – 154.
- FANG Kui, JING Song, SHEN Luming, *et al.* Three dimensional reconstruction of virtual plants branch structure based on quasi binary-tree [J]. *Trans CSAE*, 2011, **27**(11): 151 – 154.
- [26] 颜君萍, 陈宇拓. 基于图像的树木三维建模[J]. 电脑编程技巧与维护, 2013(2): 74 – 75.
- YAN Junping, CHEN Yutuo. Three-dimensional modeling of trees based on images [J]. *Comput Program Skills & Maint*, 2013(2): 74 – 75.
- [27] QUAN Long, TAN Ping, ZENG Gang, *et al.* Image-based plant modeling [J]. *ACM Trans Graphics*, 2006, **25**

- (3): 599 – 604.
- [28] 孙宇阳. 基于单幅图像的三维重建技术综述[J]. 北方工业大学学报, 2011, **23**(1): 9 – 13.
SUN Yuyang. A survey of 3D reconstruction based on single image [J]. *J North China Univ Technol*, 2011, **23**(1): 9 – 13.
- [29] TAN Ping, ZENG Gang, WANG Jingdong, *et al.* Image-based tree modeling [J]. *ACM Trans Graph*, 2007, **25**(3): 599 – 604.
- [30] TENG Chinhung, CHEN Yungsheng. Image-based tree modeling from a few images with very narrow viewing range [J]. *Visual Comput*, 2009, **25**(4): 297 – 307.
- [31] LOPEZ L D, DING Yuanyuan, YU Jingyi. Modeling complex unfoliated trees from a sparse set of images [J]. *Comput Graphics Forum*, 2010, **29**(7): 2075 – 2082.
- [32] 赵阳, 余新晓, 信忠保, 等. 地面三维激光扫描技术在林业中的应用与展望[J]. 世界林业研究, 2010, **23**(4): 41 – 45.
ZHAO Yang, YU Xinxiao, XIN Zhongbao, *et al.* Application and outlook of terrestrial 3D laser scanning technology in forestry [J]. *World For Res*, 2010, **23**(4): 41 – 45.
- [33] THIES M, PFEIFER N, WINTERHALDER D, *et al.* Three-dimensional reconstruction of stems for assessment of taper, sweep and lean based on laser scanning of standing trees [J]. *Scand J For Res*, 2004, **19**(6): 571 – 581.
- [34] RAUMONEN P, KAASALAINEN M, KAASALAINEN S, *et al.* Fast automatic precision tree models from terrestrial laser scanner data [J]. *Remote Sens*, 2013, **5**(2): 491 – 520.
- [35] PARK H, LIM S, TRINDER J, *et al.* 3D surface reconstruction of terrestrial laser scanner data for forestry[C]// I-GARSS. 2010 *IEEE International Geoscience & Remote Sensing Symposium*. Honolulu: IEEE, 2010: 4366 – 4369. doi: 1109/IGARSS. 2010. 5652550.
- [36] 高士曾. 基于地面三维激光扫描仪的树木枝干建模与参数提取技术[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2013.
GAO Shizeng. *Branches Modeling and Morphological Parameters Extraction Technology Based on 3D Laser Scanning Technology* [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2013.
- [37] KELBE D, ROMANCZYK P, van AARDT J, *et al.* Reconstruction of 3D tree stem models from low-cost terrestrial laser scanner data [C]//TURNER M D, KAMERMAN G W. *Proc SPIE 8783, Laser Radar Technol Appl XVIII*, 873106. Baltimore: SPIE, 2013: 507 – 522. doi: 10.1117/12.2015963.
- [38] 王晓辉, 黄洪宇, 陈崇成, 等. 基于激光点云的树木三维几何建模系统的设计与实现[J]. 福州大学学报: 自然科学版, 2014, **42**(5): 705 – 712.
WANG Xiaohui, HUANG Hongyu, CHEN Chongcheng, *et al.* Design and Implementation of 3D geometrical tree modeling system based on terrestrial laser scanned point cloud data [J]. *J Fuzhou Univ Nat Sci Ed*, 2014, **42**(5): 705 – 712.
- [39] 刘刚, 司永胜, 冯娟. 农林作物三维重建方法研究进展[J]. 农业机械学报, 2014, **45**(6): 38 – 46, 19.
LIU Gang, SI Yongsheng, FENG Juan. 3D reconstruction of agriculture and forestry crops [J]. *Trans Chin Soc Agric Mach*, 2014, **45**(6): 38 – 46, 19.
- [40] 章兰芬, 李丙智, 张社奇, 等. 基于三维数字化仪的高纺锤形苹果树光截获率测定[J]. 北方园艺, 2012(7): 9 – 12.
ZHANG Lanfen, LI Bingzhi, ZHANG Sheqi, *et al.* Light interception measurement of apple trees trained to tall spindle shape based on three-dimensional digitizer [J]. *North Hortic*, 2012(7): 9 – 12.
- [41] 王菲. 高纺锤形富士苹果树分形维数及三维数字化建模和 STAR 值的研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2012.
WANG Fei. *Research on the Fractal Dimension and Three-Dimensional Digitized Modeling and Star Value of 'FUJI' Apple Trees trained to Tall Spindle Shape* [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2012.
- [42] 雷相东, 常敏, 陆元昌, 等. 虚拟树木生长建模及可视化研究综述[J]. 林业科学, 2006, **42**(11): 123 – 131.
LEI Xiangdong, CHANG Min, LU Yuanchang, *et al.* A Review on growth modeling and visualization for virtual trees [J]. *Sci Silv Sin*, 2006, **42**(11): 123 – 131.
- [43] UMR AMAP. *Botany and Computational Plant Architecture* [EB/OL]. [2014-09-25]. <http://amap.cirad.fr/en/>.
- [44] PRUSINKIEWICZ P, ROLLAND-LAGAN A. Modeling plant morphogenesis [J]. *Curr Opin Plant Biol*, 2006, **9**(1):

83 – 88.

- [45] LONGAY S, RUNIONS A, BOUDON F, *et al.* TreeSketch: Interactive procedural modeling of trees on a tablet [C]//LONGAY S, RUNIONS A, FRÉDÉRIC B, *et al.* *Proc Eurographics Symp Sketch-Based Interfaces and Modeling*, Switzerland: Eurographic Association Aire-la-ville, 2012: 107 – 120.
- [46] 王忠芝, 胡逊之. 基于 Xfrog 的树木建模及生长模拟[J]. 北京林业大学学报, 2009, **31**(2): 64 – 68.
WANG Zhongzhi, HU Xunzhi. Tree modeling and growth simulation based on Xfrog [J]. *J Beijing For Univ*, 2009, **31**(2): 64 – 68.
- [47] 吴晓晖. SpeedTree 与 Virtools 模型转换的研究与实现[D]. 北京: 北京林业大学, 2012.
WU Xiaohui. *Research and Implementation on Model Converting between SpeedTree and Virtools* [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2012.
- [48] 熊壮, 王润杰, 陈蕾, 等. 动态三维树实时仿真设计与实现[J]. 计算机工程与设计, 2009, **30**(8): 2004 – 2007.
XIONG Zhuang, WANG Runjie, CHEN Lei, *et al.* Design and Realization of 3D dynamic tree simulation [J]. *Comput Eng Design*, 2009, **30**(8): 2004 – 2007.
- [49] LIAMA Projects. *cPlant: Computational Plants* [EB/OL]. [2014-09-25]. <http://liama.ia.ac.cn/research/liama-projects/261-cplant-project-description-and-achievements.html>.
- [50] 国红, 雷相东, LETORT V, 等. 基于 GreenLab 的油松结构-功能模型[J]. 植物生态学报, 2009, **33**(5): 950 – 957.
GUO Hong, LEI Xiangdong, LETORT V, *et al.* A functional-structural model GreenLab for *Pinus tabulaeformis* [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2009, **33**(5): 950 – 957.
- [51] 国红, 雷相东, LETORT V, 等. 基于 GreenLab 原理构建油松成年树的结构-功能模型[J]. 植物生态学报, 2011, **35**(4): 422 – 430.
GUO Hong, LEI Xiangdong, LETORT V, *et al.* A functional-structural model for adults of *Pinus tabulaeformis* based on GreenLab [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2011, **35**(4): 422 – 430.
- [52] 林郁欣, 唐丽玉, 陈崇成, 等. 基于组合型 L-系统的单树建模工具的设计与实现[J]. 农业工程学报, 2011, **27**(3): 185 – 190.
LIN Yuxin, TANG Liyu, CHEN Chongcheng, *et al.* Design and implementation of tree individual modeling tool based on compounded L-System [J]. *Trans CSAE*, 2011, **27**(3): 185 – 190.
- [53] BERRY J K, BUCKLEY D J, ULBRICHT C. Visualize realistic Landscapes 3-D modeling helps GIS users envision natural resources [J]. *Geo World*, 1998, **11**(8): 42 – 47.
- [54] 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所. 贡嘎山森林演替模型(GFSM_V3.0) [EB/OL]. 2012-08-24 [2014-10-12]. http://www.imde.ac.cn/kxcb/kpdt/201208/t20120824_3631979.html.