

中国图形学象报

2013
11
VOL.18

ISSN1006-8961
CN11-3758 /TB



图像色彩视觉研究 P1536

中国图象图形学报

刊名题字：宋健 | 月刊（1996年创刊）



第18卷第11期（总第211期）

2013年11月16日

中国精品科技期刊
中国国际影响力优秀学术期刊
中国科技核心期刊

版权声明

凡向《中国图象图形学报》投稿，均视为同意在本刊网站及CNKI等全文数据库出版，所刊载论文已获得著作权人的授权。本刊所有图片均为非商业目的使用，所有内容，未经许可，不得转载或以其他方式使用。

Copyright

2013 all rights reserved by Journal of Image and Graphics, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS. The content (including but not limited text, photo, etc) published in this journal is for non-commercial use.

主管单位 中国科学院

主办单位 中国科学院遥感与数字地球研究所

中国图象图形学学会

北京应用物理与计算数学研究所

主 编 李小文

编辑出版《中国图象图形学报》编辑出版委员会

邮政信箱 北京9718信箱

邮 编 100101

电子信箱 jig@irsa.ac.cn

电 话 010-64807995 010-82614429

网 址 www.cjig.cn

广告经营许可证 京朝工商广字第0361号

总 发 行 北京报刊发行局

订 购 全国各地邮局

海外发行 中国国际图书贸易集团有限公司

（邮政信箱：北京399信箱 邮编：100048）

印刷装订 北京科信印刷有限公司

Journal of Image and Graphics

Title inscription: Song Jian | Monthly, Started in 1996

Superintended by Chinese Academy of Sciences

Sponsored by Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS

China Society of Image and Graphics

Institute of Applied Physics and Computational Mathematics

Editor-in-Chief LI Xiaowen

Editor, Publisher Editorial and Publishing Board of Journal of
Image and Graphics

P.O.Box 9718, Beijing, P.R.China

Zip code 100101

E-mail jig@irsa.ac.cn

Telephone 010-64807995 010-82614429

Website www.cjig.cn

Distributed by Beijing Bureau for Distribution of Newspapers and Journals

Domestic All Local Post Offices in China

Overseas China International Book Trading Corporation

(P.O.Box 399, Beijing 100048, P.R.China)

Printed by Beijing Kexin Printing Co., Ltd.

CN 11-3758/TB

ISSN 1006-8961

CODEN ZTTXFZ

国外发行代号 M1406

国内邮发代号 82-831

国内定价 50.00元

综述

- 多媒体技术研究: 2012——多媒体数据索引与检索技术研究进展
中国计算机学会多媒体专业委员会 1383

图像处理和编码

- 热扩散和整体变分模型自适应调整的图像放大模型
王相海, 艾新南 1398
- 椒盐图像的方向加权均值滤波算法
李佐勇, 汤可宗, 胡锦涛, 林亚明 1407
- 3维自适应最小误差阈值分割法
刘金, 金炜东 1416
- 结构约束和样本稀疏表示的图像修复
康佳伦, 唐向宏, 任澍 1425
- 结合小波变换和自适应分块的多聚焦图像快速融合
刘羽, 汪增福 1435

图像分析和识别

- 飞行时间3维相机的多视角散乱点云优化配准
张旭东, 吴国松, 胡良梅, 王竹萌, 邱维巍 1445
- 采用独立色素浓度分布分割皮损图像
徐舒畅 1452
- 基于CUDA的并行加速渲染算法
刘镇, 郝冬宁, 梅向东 1457
- 连续最大流图像分割模型及算法
杨晓艺, 王小欢, 宋锦萍 1462
- 词袋特征压缩算法比较研究
杨赛, 赵春霞 1468

图像理解和计算机视觉

- 融合对象性和视觉显著度的单目图像2D转3D
袁红星, 吴少群, 朱仁祥, 安鹏 1478

计算机图形学

- 多风格融合的复杂森林场景自适应可视化
董天阳, 夏佳佳, 范菁 1486

遥感图像处理

- 保留结构细节的遥感海表温度图像的采样与重构
崔雪森, 杨胜龙, 伍玉梅, 戴阳, 范秀梅 1497
- 组合四相机拼接影像的颜色平衡
任超锋, 姚娜, 林宗坚 1504
- 复杂背景下多样水体遥感自动解译
夏列钢, 沈占锋, 李均力, 骆剑承 1513

“第十届全国智能CAD与数字娱乐会议”专栏

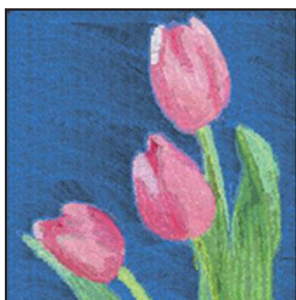
- 3D树木建模技术研究进展
谭云兰, 贾金原, 张晨, 李光耀 1520
- 网格分割的3维网格模型非盲水印算法
杜顺, 詹永照, 王新宇 1529
- 基于放缩系数和均值的多参数颜色迁移
王世亮, 徐岗, 储清林, 胡维华, 汪国昭 1536
- 基于参考图像的色粉画模拟
郑智斌, 张岩, 孙正兴, 杨克微 1542



融合对象性和视觉显著度的单目图像2D转3D(第1478页)



网格分割的3维网格模型非盲水印算法(第1529页)



基于参考图像的色粉画模拟(第1542页)

CONTENTS

JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS



Single-view image 2D-to-3D conversion based on objectness and visual saliency(P1478)



Non-blind watermarking algorithm for 3D mesh models based on mesh segmentation(P1529)



Color transfer with multiple parameters by combining the scaling and mean values(P1542)

Review

- Researches on multimedia technology, 2012
Multimedia data indexing and retrieval technology: a review
CCF Multimedia Technology Committee 1383

Image Processing and Coding

- Image magnification model based on adaptive adjustment of thermal diffusion and TV model
Wang Xianghai, Ai Xinnan 1398
Directional weighted mean filter for image with salt & pepper noise
Li Zuoyong, Tang Kezong, Hu Jinmei, Lin Yaming 1407
Three-dimensional adaptive minimum error thresholding segmentation algorithm
Liu Jin, Jin Weidong 1416
Image inpainting by structural constraints and sample sparse representation
Kang Jialun, Tang Xianghong, Ren Shu 1425
Multi-focus image fusion based on wavelet transform and adaptive block
Liu Yu, Wang Zengfu 1435

Image Analysis and Recognition

- Multi-view scattered point cloud optimization registration using a TOF camera
Zhang Xudong, Wu Guosong, Hu Liangmei, Wang Zhumeng, Di Weiwei 1445
Skin lesion segmentation by using independent pigment concentration distribution
Xu Shuchang 1452
Based on the parallel rendering algorithm in CUDA
Liu Zhen, Hao Dongning, Mei Xiangdong 1457
Image segmentation model and algorithm based on continuous max-flow approach
Yang Xiaoyi, Wang Xiaohuan, Song Jinping 1462
Comparative research on compression algorithms of bag-of-features
Yang Sai, Zhao Chunxia 1468

Image Understanding and Computer Vision

- Single-view image 2D-to-3D conversion based on objectness and visual saliency
Yuan Hongxing, Wu Shaoqun, Zhu Renxiang, An Peng 1478

Computer Graphics

- Adaptive visualization of multi-style composition for complex forest scene
Dong Tianyang, Xia Jiajia, Fan Jing 1486

Remote Sensing Image Processing

- Structural detail-reserving method of sampling and reconstruction of remote sensing SST image
Cui Xuesen, Yang Shenglong, Wu Yumei, Dai Yang, Fan Xiumei 1497
Color balancing of the stitched images of a combined four-head camera
Ren Chaofeng, Yao Na, Lin Zongjian 1504
Automatic interpretation of diverse water bodies from remotely sensed images in complex background
Xia Liegang, Shen Zhanfeng, Li Junli, Luo Jiancheng 1513

Issum of CIDE' 2013

- Survey on Virtual 3D Tree Modeling Technologies
Tan Yunlan, Jia Jinyuan, Zhang Chen, Li Guangyao 1520
Non-blind watermarking algorithm for 3D mesh models based on mesh segmentation
Du Shun, Zhan Yongzhao, Wang Xinyu 1529
Color transfer with multiple parameters by combining the scaling and mean values
Wang Shiliang, Xu Gang, Chu Qinglin, Hu Weihua, Wang Guozhao 1536
Image-based pastel simulation
Zheng Zhibin, Zhang Yan, Sun Zhengxing, Yang Kewei 1542

中图法分类号: TP391 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2013)11-1520-09

论文引用格式: 谭云兰, 贾金原, 张晨, 李光耀. 3D 树木建模技术研究进展[J]. 中国图象图形学报, 2013, 18(11): 1520-1528. [DOI:10.11834/jig.20131117]

3D 树木建模技术研究进展

谭云兰^{1,3}, 贾金原², 张晨², 李光耀³

1. 井冈山大学电子与信息工程学院, 吉安 343009; 2. 同济大学软件学院, 上海 201804;
3. 同济大学电子与信息工程学院, 上海 201804

摘要: 3D 树木建模一直都是计算机图形学、计算机视觉、虚拟现实等领域最具有挑战性的研究方向之一, 国外学者在该领域做了大量研究工作, 但 3D 树木建模综述性文章的缺乏成为其发展的制约因素。侧重从计算机视觉的角度, 将当前国内外经典的 3D 树木建模方法分为基于图像、基于规则和基于草图等 3 类, 并跟踪了最新的 3D 树木建模技术进展, 对他们的成果进行了深入剖析, 重点阐述 3D 树木建模关键技术。最后, 分析和比较了几种主要的 3D 树木建模技术, 提出轻量化 3D 树木建模技术是今后虚拟场景中的交互应用的发展趋势。此外, 根据当前研究的难点提出了基于单张图像的轻量化混合建模的研究思路。

关键词: 3D 树木建模; 基于图像建模; 基于规则建模; 基于草图建模; 轻量化建模; 树木骨架

Survey on virtual 3D tree modeling technologies

Tan Yunlan^{1,3}, Jia Jinyuan², Zhang Chen², Li Guangyao³

1. School of Electronic Information and Engineering, Jinggangshan University, Ji'an 343009, China;
2. College of software, Tongji University, Shanghai 201804, China;
3. College of Electronic Information and Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China

Abstract: Realistic and immersive 3D tree modeling is an important and challenging research topic in computer graphics, computer vision, and virtual reality. Furthermore, it is highly valuable in various applications such as virtual tourism, virtual city, virtual agriculture, ecological landscape, and so on. Many researchers in this field used various approaches of 3D tree modeling. However, a review work is not available on this topic, which has obviously blocked the development of image based modeling research. Different methods are classified and analyzed based on the visual clues used in modeling from a computer vision perspective. In this paper, all advanced 3D tree modeling technologies are surveyed, which are categorized as image-based, rule-based, and sketch-based methods. After analyzing and comparing several main 3D modeling methods and newly key modeling technologies, Such as approximate image-based tree-modeling using particle flows, single image tree modeling, sketch-based tree modeling using Markov random field, texture-lobes for tree modeling, image-based lightweight tree modeling, we draw several conclusions. Rule-based tree modeling is based on the assumption that the branch shapes and phyllotaxis of the tree follow a predictable pattern, but it is difficult to reconstruct the unpredictable part of branches such as stunted growth or suffered external environment influence. Therefore people should master large professional knowledge of botany to reconstruct realistic rule-based tree model. When it comes to sketch-based tree modeling, the users usually stretch the outline from the tree images to obtain the seeds, which guide the growth of trees or morphological characteristics. Tree modeling is relatively simple and intuitive and even can be realized by automatic or semi-automatic

收稿日期: 2013-04-05; 修回日期: 2013-06-25

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAC11B01-04)

第一作者简介: 谭云兰(1972—), 女, 副教授, 同济大学计算机应用专业在读博士研究生, 研究方向为虚拟现实、图像美学计算、Web3D。

E-mail: tanyunlan@163.com

way. Image-based tree modeling is a method that 3D space geometry information of the tree is built from two or more than two images. It can be built intelligently and the model is realistic. But the model data is too large to meet 3D visualization display of the large-scale virtual scene on the Internet. In addition, a research idea about hybrid lightweight tree modeling for lightweight, low cost, high efficiency, which is proposed according to the current research emphasis and difficulties. At last, the future of lightweight 3D tree modeling applied in the interactive virtual scene is presented.

Key words: 3D tree modeling; image-based tree modeling; rule-based tree modeling; sketch-based tree modeling; lightweight modeling; tree skeleton

0 引言

3D 树木模型是虚拟世界场景中具有相当普遍性和代表性的自然景观模型,具有真实感的虚拟 3D 树木模型可广泛应用于虚拟旅游、虚拟城市、虚拟农业、虚拟生态景观等,但因其种类繁多、几何形态与结构差异很大,异常复杂,因此是自然景观可视化模拟中最难构建的场景之一。3D 树木建模的研究无论从科学还是技术的角度一直是计算机图形学、计算机视觉、虚拟现实等领域具有挑战性的研究方向之一。自 20 世纪 60 年代起,国内外研究人员开始从不同角度构建模型来模拟树木的形态,有了长足的发展,产生了大量的研究成果。这些建模方法互相借鉴和融合以提高建模效果真实感及效率。目

前,主流的 3D 树木建模方法主要有 3 种:基于规则(rule-based),基于草图(sketch-based)和基于图像(image-based)。

自 20 世纪六七十年代开始,国外学者在该领域做了大量研究工作,但缺乏对 3D 树木建模方法进行全面的总结、分析和比较,尤其是在轻量化建模技术方面,国内外对此相关研究工作鲜有介绍,从而制约了 3D 树木轻量化建模的 WEB 应用。

1 主要 3D 树木建模分类

对已有的文献资料和研究成果进行对比分析,将当前主要 3D 树木建模方法划分为 3 类:基于规则、基于草图和基于图像的建模方法,各建模方法的建模过程归纳如图 1 所示。

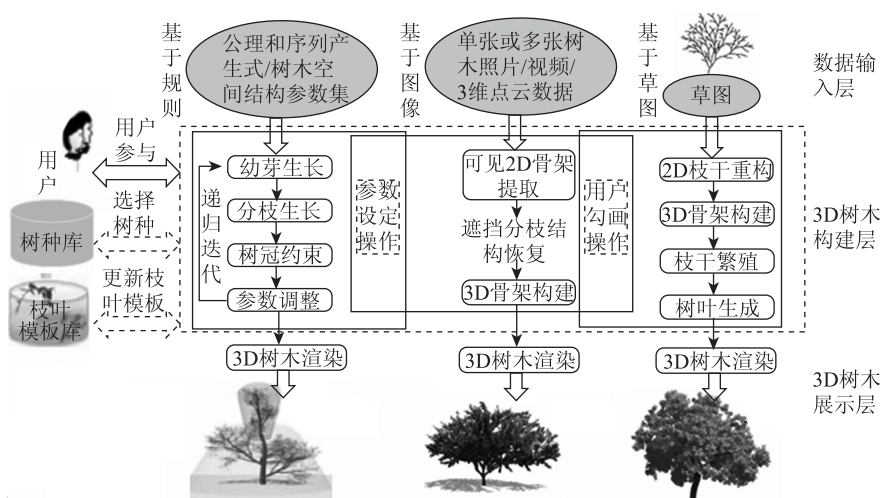


图 1 3D 树木构建一般流程

Fig. 1 General process of 3D tree modeling

从图 1 可以看出,各 3D 建模方法的整个构建过程分为 3 个层次:数据输入层、3D 树木骨架构建层、3D 树木渲染显示层。随着建模技术的发展,大部分建模方法是在用户的交互参与下结合了两种或者两种以上的建模方法,以提高建模的真实感和

效率。

1.1 基于规则的树木建模

基于规则的建模方法有着较为悠久的历史与深厚的理论背景,取得了丰硕的成果。从 20 世纪 60 年代开始,国外学者便尝试引入参数集结合规则来

模拟树木结构形态,目前比较成熟的建模方法有 L-System 和参数集方法。L-System 系统首先由 Lindenmayer 于 1968 年提出^[1],Prusinkiewicz 等人^[2]在 90 年代初与之开发了一套成熟的 L-System 规则系统,将植物形态规律用语法方式描述其生长规则,并添加了分枝角度、分枝长度比例等信息,使植物表示成为可能。Oppenheimer^[3]提出了对植物使用分形理论进行建模的理论,使用遗传参数来控制树木的几何信息和拓扑信息。Karwowski 等人^[4]又进一步地完善了基于 L-System 的树木建模理论,并开发了一套 L-System 的研究工具 L-Studio,为基于规则的树木建模理论做出了重要的贡献。Shlyakhter 等人^[5]将 L-System 与 3 维重建方法相结合,从图像中抽取出树木的立体外壳作为约束条件,然后在壳内利用 L-system 生长枝干。Anastacio 等人^[6]提出了通过勾画设定 L-System 参数的植物模型构造方法,在较为便捷的操作下获得了逼真度较高的模型。

此外,基于参数集的建模方法,也有不少的研究成果。Lintermann 等人^[7]提出了用不同图元表示植物的几何结构,结合基于规则和几何元素建模各种植物,并允许用户对植物模型的几何参数、向性和外形等进行修改以控制植物的形状。Palubicki 等人^[8]在显式层次化植物几何拓扑结构基础上,采用自组织方式构建树木模型。

L-System 方法根据给定的公理和一系列产生式,对产生式多次迭代后得到最终的植物形态。这种方法产生的树种比较生硬单一,树木形态不容易控制,若产生式迭代控制不好,容易生成形状怪异的树木。此外,用户还要理解产生式中各符号的含义,需要较多的植物学专业知识;参数集方法是从空间关系出发,给定约束植物体各组成部分空间关系的一组参数集^[9],通过交互式地调节参数来实现对模型的灵活操控,直到生成满足参数集的植物形态结构为止,此方法简单、快捷,但需要用户过多参与。总之,基于规则的建模方法需要专业的植物学知识,通常是对分枝形状和叶序遵循可预测模式的假设基础上,而对不可预测部分枝的修改,比如生长萎缩或者受外界环境影响,需要做相当的努力才可复制构建,因此构建的树木种类和形状受到较大限制。

1.2 基于草图的树木建模

近年来,基于用户草图或用户勾画的树木建模方法发展迅速,这种方法允许用户对树木图像进行一定的勾画操作从而获取“种子”信息,进而引导树

木的生长过程或形态特征。Okabe 等人^[10]首先提出根据用户手绘的枝干轮廓以及枝干均匀分布的假设进行推理并自动生成 3 维树木枝干,且建模过程中允许用户编辑;之后 2005 年他们又通过用户勾画出树木的完整枝干和树叶的轮廓来约束树木的形态,并结合相关的植物学知识自动地生成树木的模型^[11]。Tan 等人^[12]从单张图像中,通过简单的用户勾画,构建出与图像相似的 3 维树木枝干结构。Chen 等人^[13]采用统计学的方法通过勾画构建出效果不错的 3D 树木模型。Wither 等人^[14]提出了从勾画树木的轮廓信息中重建树木模型的方法,提出了勾画的新思路。liu 等人^[15]提出了在树木的两张照片处于正交角度的基础上分别勾画出主要枝干和树冠轮廓,然后利用分布控制理论恢复枝干的深度信息或者以用户的草图生成枝干的 3 维点云数据来引导生成 3 维树木枝干。然而该方法要求两幅拍摄的树木照片正交角度,限制太死,且拍摄起来存在很多困难。

基于草图的建模方法对用户来说操作相对简单直观,并且建模过程可以自动或半自动的方式完成,在学术研究和工程应用上都有较大的价值和潜力。该方法在建模过程中需要用户的大量干预,而要构建真实感强的 3D 树木模型,需要专业的用户勾画出具有真实感的树木草图,因此对参与建模的用户提出了专业性要求。

1.3 基于图像(序列)的树木建模

树木图像具有丰富的信息,而且图像数据易采集、成本低,因此成为众多研究人员青睐的建模素材,为树木的 3 维重建奠定了坚实的基础。在计算机视觉理论中,场景的空间几何信息可以用两幅或两幅以上图像恢复。依据这个理论,利用摄像机的参数可以计算出其图像坐标和世界坐标的关系,进而进行立体视觉的双目或多目融合,重建出多幅图像的 3 维信息^[16]。针对稀疏的特征点难以恢复出场景的空间几何信息的缺点,Lhuillier 等人^[17]提出了一种新的“准密集”匹配方法,能够大幅度提高场景中准确匹配的特征点数量,并将这一方法成功运用在了对植物和树木的 3 维重建中。Reche 等人^[18]对多幅图像采用容积方法捕捉和渲染 3D 树木模型,构建了较好的模型效果。另外,Teng 等人^[19]利用未定标的方法实现了对树木骨架的 3 维重建工作,并于 2009 年对谭平的方法进行了改进和优化,使得树木的 3 维重建可以在小视角范围内采集的少数图像上进行^[20]。为了避免计算机视觉重建方法

中的特征点的匹配跟踪以及定标等繁琐步骤, Neubert 等人^[21]对输入图像采用了粒子系统的方法对树木进行3维重建。为了提高3D树木模型的构建效率, Ma 等人^[22]引入隐贝叶斯网络描述3D结构, 使用了元件复用机制, 通过一对图像来还原枝干的3D结构。从技术角度来说, 单张照片比系列多张照片恢复树木的3D结构难度要大得多, 为了减少多角度树木拍摄和图像分割等计算, Tan^[12], Zeng 等人^[23]实现了单张图像的3D树木建模。

此外, 3维激光扫描仪可以精确获取树木尺寸信息及冠幅结构信息, 对细部(枝干、树叶等)的表达也十分精细, 直接拟合激光扫描而来的点云数据即可获取树木的骨架形态信息^[24], Xu 等人^[25]采用激光扫描技术得到稀疏点云实现了半自动的多边形模型重建。Zhu 等人^[26]提出了增强的 Alpha Shape 建模方法, 能够根据点云数据构建出树冠模型。Wang 等人^[27]采用 LiDAR 系统实现了单株3维树木的全自动建模。Dai 等人^[28]采用直接拟合的一般做法是根据数据构造一个基面, 再利用基面设计相应的参数, 使拟合曲面尽可能最优化。这类方法更符合“准确还原”的本意, 缺点是只能处理简单的平面、圆柱面等拓扑结构。为了解决这个问题, Livny 等人^[29]提出了从激光扫描的3D点云数据中自动构建树木3D骨架的方法, 并同时能对相互重叠的树木分别建模, 在此基础上, 又于2011年提出了基于 Lobe 的快速轻量化建模^[30]。Bucksch 等人^[31]利用空间分割的方法对扫描的顶点数据进行聚类, 然后连接相邻聚类来恢复树木的3维骨架。

从以上分析来看, 基于图像的3D树木建模发展迅速, 已成为当前树木建模研究的重要发展方向之一。其主要优点在于: 第一、树木图像拥有丰富的信息; 第二、基于图像的树木重建具有更高的真实感; 第三、树木图像的数据容易采集, 避免了复杂的树木测量过程。但是, 该方法的局限性体现在:

1) 这些基于图像的树木建模工作仅着重于如何从“图像”中恢复出一个用“点云”表示或者“三角网格”的模型。为了提高3D树木的真实感, 正确地恢复出树木的3D信息, 在采集照片时需要覆盖大范围角度, 甚至要求进行360°覆盖环拍多张照片^[32], 严重限制了户外树木的采集。尽管 Tan 等人^[33]对这一局限作了改进, 通过获取相机参数和抽取3D点云数据后, 构建可见主骨架部分, 再运用局部自相似生长规则恢复遮挡的骨架部分, 将覆盖范

围缩小到120°~200°之间, 约减少了一半的图像采集量。但这些方法仍然需要对图像逐幅地处理与背景分割, 建模过程冗长耗时。

2) 树木对象所特有的树叶和枝干等树木结构因相互遮挡, 使得难以获取树木的完整信息, 不完整的3维重建信息将最终直接影响3维树木建模的真实感与视觉效果, 这应成为下一步需要解决的问题。

3) 这种基于图像的建模方法虽具有真实感强和智能化的优点, 但所得到的模型数据量相当大, 不适于互联网上大规模虚拟场景中的树木3D可视化展示需要, 要实现即时下载与显示是一件较困难的事情。因此, 对3D树木的建模提出了轻量化、低成本、高效率的新要求。

2 3D 树木建模关键技术

在3D树木建模的研究历程中, 出现了很多经典的建模方法和关键技术, 这些技术的出现推动了的建模技术发展与应用。

2.1 基于粒子系统的3D树木建模

为了避免计算机视觉重建方法中特征点的匹配跟踪以及定标等繁琐步骤, Neubert 等人^[21]设计了基于图像的3D树木建模新方法——粒子系统方法, 对树木3D骨架进行重建。首先对输入图像进行背景分割, 采用 Livewire 方法^[34]计算出2D骨架吸引子图(attractor graph)。然后对同一树木不同角度采集的多幅图像进行空间穿插投影, 分析出树木在空间中的体素密度值, 得到体素模型(voxel model)。再根据2D骨架吸引子图构建一个方向场, 同时置粒子系统于该方向场中, 使粒子系统受之指引进行运动, 粒子流的运动方向是自顶向下, 直到树木根基为止, 运动轨迹便构成了树木的主要骨架。最后应用植物快速生长规则将3D骨架转换成3D几何模型, 运用组件复用技术从枝叶模板库中选择相应的小树枝和树叶便构成了真实感强的3D树木模型。与其他构建系统耗时几个小时相比, 该系统只要数十秒内就可以完成3D树木模型的构建, 但在构建的过程中, 需要考虑几个关键问题: 1) 种子点的正确设置。如果种子点设置不当, 会生成任意形状的2D骨架吸引子图。2) 粒子流初始位置和数量的恰当设置。粒子流的初始位置不同, 也会导致最后的3D骨架形态不同。3) 扰动函数的选择。合适的扰动函数能使3D骨架分枝曲线更加平滑。对于

物体被别的物体局部遮挡以及因外部自然界因素导致分枝曲率很大的情况,在粒子流进行模拟时需要频繁的交互,以正确引导粒子流向。该建模方法对现实环境中的树木图像拍摄有较严格的限制,树木的背景不能太复杂,也限制了复杂树种的 3D 模型构建,而且粒子初始位置和粒子数量不同,得到的粒子流动轨迹也不一样,也只能大致近似地拟合出原图像,因此构建的 3D 树木相似度不高。

2.2 基于单张图像的树木 3D 骨架构建

从技术上讲,单幅图像比系列多幅图像恢复树木的 3D 结构难度要大得多,为了突破树木图像采集过程中连续多张环拍的限制以及建模过程中图像处理的复杂性,Zeng 等人^[23]从单张图像中提取树木的 2D 枝干,再进行基于规则地旋转变换成 3 维空间中的枝干,近似地模拟出树木的外观模型,实现了从单幅图像中恢复树木几何模型,而 Tan 等人^[12]提出了最为典型基于单幅图像的 3D 树木构建方法。该方法 3D 骨架的构建,主要采用了可视分枝跟踪技术识别可见主分枝,以及非参数化合成技术生成不可见子分枝。在可视分枝跟踪过程中,使用一跟踪圆沿着树枝描边自底向上移动,在移动过程中,跟踪圆定位的每一个位置,使用极大似然估计(MLE)方法将圆周上的像素划分为分枝像素和非分枝像素。对于分枝像素,使用高斯混合模型(GMM)识别分枝外观,将每次移动位置的圆心点连接起来构成可见主分枝的 2D 轮廓,然后再转化成 3D 主骨架模型;而不可见子分枝部分的生成,则采用非参数化合成方法,从现有分枝子树库中挑选一个适合置换的子分枝,在启发式 3D 点的引导下,以最小的代价约束子分枝在轮廓区域内生长。该方法是典型的融合了基于图像、基于草图和基于规则等建模方法的建模技术,但不同于基于参数规则^[3-4]生成分枝,而是使用子树库中现有局部分枝形状合成新分枝;也不同于基于图像^[18]恢复树木的 3D 结构,而是使用图像作为非参数树木生长的引导图;更不同于纯粹的草图方法^[11],该方法只需用户简单勾画几笔,运用图像统计学方法在勾画引导下恢复更多的树木分枝。

2.3 基于草图的 Markov 随机场 3D 树木建模

在基于草图的 3D 树木建模方法中,Okabe 等人^[10-11]提出的建模方法需要用户绘制出树木详细的分枝结构,还要从不同的视角运用分枝最大距离法构建 3D 树木骨架。为了解决这个问题,Chen 等

人^[13]采用基于草图的 Markov 随机场 3D 树木建模方法,用户仅需徒手绘制少数几笔分枝,就可构建出复杂度高且真实感强的 3D 树木模型。该建模方法先将草图划分成一序列的枝段节点集合,每个枝段分成 K 个子枝段($b_1, b_2, \dots, b_K$),但每个子分枝段只有一个父枝段,在父子分枝段之间引入额外的节点(条件联合概率 P_{pci} 和子分枝类别标识 l_{ci}),按照以上数据结构将草图映射成 Markov 因素图(Markov factor graph)。在基于正交投影的假设之上,系统从树木原型模板库中搜索出与草图外观相匹配的 2D 轮廓以及投影分枝形状全局参数 $\Theta = \{\mu_s, \sigma_s, \mu_\alpha, \sigma_\alpha, \mu_\beta, \sigma_\beta, \mu_\lambda, \sigma_\lambda\}$,运用极大似然估计(MLE)方法将已有的先验信息(2D 草图坐标 (X, Y) 及树木全局参数 Θ)结合 ICM(iterated conditional mode)条件迭代方式自底向上推理树木的深度 Z_i 和标识 l_{ci} ,并采用 EM 算法推理分枝间的旋转角度及树木参数,从而构建出近似用户草图的 3D 树木骨架。运用树木的自相似(self-similarity)生物规律,从模板中选择父子分枝重用块繁殖分枝,再进一步利用已有树叶模板进行树叶生长,构建整个 3D 树木模型。在构建过程中,父、子分枝节点之间只设一条通路,有利于控制子分枝段和父枝段之间的空间旋转角和伸缩比例的几何变换。每个分枝都局部依赖于邻近分枝,而树木的整体形状取决于全局树木参数,这种利用局部互联信息和全局参数作为先验数据,适合使用 Markov 随机场来构建树木分枝形状,因此构建速度比较快。同时,在进行 3D 可视壳计算时不像其他系统需要多幅图像,该系统只需要一条 2D 曲线,而且可以根据不同的草图生成不同复杂度的树种模型。

2.4 基于 Lobes 的 3D 树木轻量化建模

Livny^[30]和程章林等人^[35]提出了基于 Lobes 的 3D 树木快速轻量化建模方法。Lobes 是基于人对树木主枝干结构和树冠的整体形状视觉认知基础上的,将树冠形状划分成一个个树枝构成的外轮廓几何结构。该方法对 LiDAR 点云数据进行聚类分析,识别稠密部分为主干,树冠稀疏点云部分为 Lobe 的不规则立体区块,以区块为界限在区块内模拟树木的生长,最终合成了输入照片相似的树木模型。整个过程可以分为编码和解码部分,编码主要任务是将输入的树木 3D 点云数据表示成主骨架结构和 Lobes 结构,从 3D 点云数据中区分出主枝干和小枝叶,设定所有半径大于邻域点集平均距离的点视为主枝干,剥离出树木的主枝干骨架之后,其余的点数

据视为 Lobe 中的小枝叶,再采用 α -shape 方法求取各 Lobes 的形状。解码时根据 Lobes 的形状从已有的枝叶模板库生成 Lobes 内部的 3D 结构,最后经过 LOD 动态渲染生成 3D 树木模型。

基于 Lobe 的树木 3D 骨架构建的新颖之处在于对 Lobes 的轻量化处理上。Lobes 表示保留了树木枝端的整体轮廓,而单个 Lobe 内部不同小枝的枝叶结构具有很强的相似性和重复性,消除了大量无用信息,可以进行轻量级存储封装,在很大程度上提高了大规模树木模型存储和传输效率。部分构建的树木模型体积较小,甚至达到 3 kB,可应用于网络环境下的大规模虚拟交互场景中。该建模方法的不足之处是依赖于已有的树种模板库,如果没有匹配到对应的树种,则使用缺省值,可能出现生成的树种与现实采集的树种严重不符,导致相似度不高。

2.5 基于 L-System 和图像的 3D 树木建模

Sun 等人^[36]提出了新颖的大规模 Web 在线虚拟场景轻量化 3D 树木建模方法,该方法是一种集基于图像和基于规则两种优势的智能化建模方法。采用双目视觉机理从现实图像中抽取树木主干和分

枝的 3D 骨架,并运用参数化的 L-System 产生式系统智能化抽取 3D 骨架,再将参数化的 L-System 解析成轻量化的 Web3D 文件,完成对复杂形态树木的逼真模拟。该建模方法解决了 2 个问题,一个是用 L-System 对复杂树木形态有效地进行参数化控制,另一个是将构建的树木 L-System 模型到 Web 3D 文件的高效轻量化解析,从而实现 3D 树木模型真正在 Web 上流畅地显示。该成果因建立了更适于网络传输的高度轻量化的树木模型,突破了 Web VR (virtual reality) 的“传输瓶颈”,适用于 Web VR 的互联网实时传输,可直接应用于构建网上大规模森林 Web VR 虚拟场景的实时互动漫游系统。

3 建模方法比较

从国内外 3D 树木建模技术现状来看,已有的建模方法可分为基于规则、基于草图、基于图像(序列)、基于扫描数据和手工建模等,从建模成本、效率、真实感、轻量化以及易用性等方面对建模方法的综述评价如表 1 所示。

表 1 各种树木建模方法的综合对比

Table 1 Comprehensive comparison of different methods of 3D tree modeling

建模类型	制作成本	数据成本	真实感	建模效率	轻量化	存储代价	模型绘制效率	应用领域、适用环境、限制条件
基于规则	低	数学规则 + 树木参数	一般	较高	较高	低	快	可应用于植物生长过程动态快速的模拟、电子游戏中的虚拟生态场景实时绘制、园林的景物布局设计、3 维数字城市场景的动态漫游绘制,但真实感差。目前比较成熟的建模系统有 Xfrog、L-Studio 和 GreenLab,用于虚拟树木的生成。
基于草图	较低	图片 + 草图	较低	高	高	高	一般	只需少量的用户操作即可构建形态复杂的植物模型,但其模型构建的算法复杂,实现困难,基于草图的 3 维树木建模方法将成为今后虚拟植物建模的发展主流。
基于图像(序列)	一般	图片(环拍)	较高	较低	较低	较高	较慢	这类方法由于涉及大量的图像识别和分割工作,模型生成速度慢、体积大,但真实感强,利用现有个人计算机是很难在实际工作场景中实现的,应用受到严重限制。
基于扫描数据	较高	扫描数据	高	较低	低	高	一般	能够获取大范围树种的细节信息,生成接近原始扫描的树种 ^[29] ,3 维点云数据量大,处理时间较长,因此需要较高配置的计算机。可应用于 3D 场景,不能实时渲染。这种建模方法严重依赖于扫描数据,对于冠幅大、遮挡严重的树种,这种方法不能精确建模。
手工建模	高	几何模型	较高	低	一般	较高	慢	建模人员常借助 3DS MAX、Maya、MilkShape 等建模软件对复杂的树木进行手工建模,常采用几何建模、广告牌或十字贴图相结合的树木建模方法 ^[37] 。可应用于当今的游戏及虚拟现实场景中,真实感相对于基于图像的建模方法也要逊色一筹。

从表1来看,各种虚拟3D树木建模方法各有其优缺点。基于规则的建模方法致力于构建一套规则化和参数化的模型,需要相关的植物学知识作基础,通常是基于分枝形状和叶序遵循可预测模式的假设基础上。该方法的一个重要优势就是所建的模型非常轻量化,它不必记录大量甚至海量的顶点数据,而仅需记录公理,产生式规则和一组参数值而已。虽然最终生成的树木模型数据量较小,符合轻量化的要求,但是常常只有专业人员才能给出树木构造感强、效果逼真的规则参数,因而建模仍有困难。基于草图的建模方法,因用户直接勾画对模型有较好的引导作用且操作直观形象,在建模过程中使用组建复用技术,因此效率高。但该建模方法需要用户的大量干预参与,模型效果真实感较差,要得到真实感的3D树木模型,需要专业的用户勾绘出具有真实感的树木草图。基于图像(序列)的建模方法运用计算机视觉理论将两幅或两幅以上图像重建图像的3维信息,其计算量大(特征点匹配、摄像机定标、恢复点坐标等),且对输入图像的拍摄角度和质量有很高的要求,所得到的模型数据量也相当大,根本不适合Web VR应用的轻量化建模的需要。基于扫描数据的建模方法成本较高(需要3维扫描仪的辅助),而且扫描数据的后期处理也增加了建模的工作量。手工建模的方法是一种将几何建模、广告牌或十字贴图相结合的树木建模方法,可以得到较为真实的几何模型,但需要专业人员的参与,人工成本高,且所需的开发周期很长,开发效率低。基于规则和手工建模方法可用于电子游戏中的虚拟生态场景实时绘制、虚拟园林的景物布局设计、3维数字城市生态场景的动态漫游绘制等领域,应用十分广泛。基于草图和基于图像,以及基于扫描数据的建模方法,因建模复杂,模型体积大,应用受到严重限制。以上建模方法构建的3D树木模型体积较大,不适于网络大规模存储和传输,因此探索轻量化的3D树木建模就显得尤其迫切。

4 进一步研究的趋势

4.1 基于图像、规则和勾画的轻量化混合建模

树木图像具有丰富的信息,容易采集且成本低,通常仅需要少量的用户参与,受到众多研究人员的青睐。尽管有学者尝试融合3种建模方法进行混合建模,但所用方法需要进行大量的图像识别与分

割计算,因而模型生成速度体积大、效率低,且在虚拟场景中不可解析,无法应用于Web 3D虚拟场景。要想在3D虚拟场景中应用3D树木模型,融合基于图像、规则和勾画等建模技术的轻量化混合建模是今后树木建模的一种趋势。本团队正在研究突破这一瓶颈的思路,提出一种基于单幅图像的低成本、高效率、真实感强且轻量易用的3D树木建模方法:用户在输入图片中勾画出树木枝干和树冠,系统自动地识别可见枝干的2维骨架和树冠轮廓,然后依据植物学知识和经验观察对2维骨架进行3维重建,并从3维骨架中提取L-system生长规则产生式和相关参数;在此基础上,利用提取的树冠轮廓约束,对重建的骨架用L-system的自适应生长来恢复被遮挡部分的拓扑结构,最后通过对枝干和树叶的渲染构建完整的树木模型。

4.2 虚拟生态系统的轻量化构建与应用

现有的3D树木建模构建的树木因为体积庞大,难以直接应用于Web 3D虚拟场景中,而用广告牌或十字贴图相结合的树木建模方法构建的树木群应用在虚拟场景中则表现较为僵硬,缺乏自然生机。如何结合树木的层次化递归分级结构和规则构建轻量化的虚拟生态系统,在3D树木建模时考虑光照、物体遮挡等外部因素对分枝生长的影响,控制树木生长过程中幼芽的着生位置和分枝的生长方向,逼真地模拟自然界外力挤压的现象^[38],从而直观、高效地构建树种多样性的虚拟生态系统,满足虚拟场景中生态系统的快速轻量化构建是今后的一种研究趋势。

4.3 基于图像的3D树木模型相似度度量

一直以来,基于图像的3D树木建模方法输入数据是在自然环境下拍摄的2D树木图像或图像序列,输出是1~2个角度的3D树木模型渲染结果,如何判定构建的3D模型和拍摄2D图像的相似程度是判断构建的3D模型是否逼真的重要依据。从视觉上看,这些3D模型与输入2D图像相比确有相似之处,但凭肉眼主观上去判断相似度具有很强的主观性,无法客观地验证所用算法的相似程度。据我们所知,虽有学者^[39-40]对两个3维模型之间相似度评价的研究,但目前为止还没有关于3D树木模型的相似度度量客观量化评价的研究。究其原因,主要在于3D树木模型的3维信息和输入树木图像间的2维信息是无法直接比较的,更困难的是,在自然环境中拍摄树木图像时环境光照对图像影响很

大,而在树木 3D 建模时,仅从输入图像数据上是对这部分光源信息无法完全获取的,现有的模型渲染技术也无法真实还原自然环境下复杂的全局光照效果,因此从纹理和颜色信息方面很难进行两者相似度的度量。因此如何给出令人信服的客观量化评价指标来综合考察 3D 树木模型与 2D 输入图像的匹配程度,以便比较各种 3D 建模方法的优劣,是今后树木建模要解决的一个难题。

5 结 语

3D 树木模型在 Web VR 虚拟环境中占据了重要的地位和份量,尤其是虚拟旅游、虚拟林业、虚拟农业景观的绝大部分场景都是森林、树木和各式各样的树木。比起建筑物来,树木往往占有海量的多边形面片数及纹理贴图,这些都给 Web 下载传输绘制带来了非常沉重的负担,因此 Web VR 急需轻量化的树木建模技术。树木形态的复杂性造成了 3D 树木构建在计算时间和占据空间的矛盾,减少用户的参与,自动修复因大规模遮挡导致大量数据缺失区域的骨架,智能地构建种类繁多的轻量化 3D 树木模型,是未来 3D 树木的构建和应用趋势。本文介绍的 3D 树木建模最新轻量化成果,能有效地利用树木本身固有的特性,降低树木渲染的复杂性、改进渲染算法,比较高效地解决虚拟场景中交互可视化的问题。该成果提供了 Web 3D 场景轻量级建模的新型研究框架,可节省大量树木建模的时间和人力成本,对研究网上大规模森林 Web VR 虚拟场景的实时互动漫游的应用具有促进作用。

参考文献 (References)

- [1] Lindenmayer A. Mathematical models for cellular interaction in development-parts I and II [J]. *Journal of Theoretical Biology*, 1968, 18(3): 280-315. [DOI: 10.1016/0022-5193(68)90079-9]
- [2] Prusinkiewicz P, Lindenmayer A, Hanan J. Development models of herbaceous plants for computer imagery purposes [C]// *Proceedings of the 15th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*. New York, USA: ACM Press, 1988: 141-150. [DOI: 10.1145/54852.378503]
- [3] Oppenheimer P E. Real time design and animation of fractal plants and trees [C]// *Proceedings of the 13th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*. New York, USA: ACM Press, 1986, 20(4): 55-64. [DOI: 10.1145/15922.15892]
- [4] Karwowski R, Prusinkiewicz P. The L-system-based plant-modeling environment L-studio4.0 [C]// *Proceedings of the 4th International Workshop on Functional-Structural Plant Models*. Montpellier, France: S. n. 2004: 403-405.
- [5] Shlyakhter I, Rozenoer M, Dorsey J, et al. Reconstructing 3d tree models from instrumented photographs [J]. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 2001, 21(3): 53-61. [DOI: 10.1109/38.920627]
- [6] Anastacio F, Prusinkiewicz P, Sousa M C. Sketch-based parameterization of L-systems using illustration-inspired construction lines and depth modulation [J]. *Computers & Graphics*, 2009, 33(4): 440-451. [DOI: 10.1016/j.cag.2009.05.001]
- [7] Lintermann B, Deussen O. Interactive modeling of plants [J]. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 1999, 19(1): 56-65. [DOI: 10.1109/38.736469]
- [8] Palubicki W, Horel K, Longay S, et al. Self-organizing tree models for image synthesis [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2009, 28(3): 58(1-8). [DOI: 10.1145/1576246.1531364]
- [9] Shi Y T, Cheng X J, Zhang H F. Three dimensional trees emulation based on parametric L-system [J]. *Journal of Tongji University: Natural Science*, 2011, 39(12): 1871-1876. [石银涛, 程效军, 张鸿飞. 基于参数 L-系统的 3 维树木仿真 [J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2011, 39(12): 1871-1876.]
- [10] Okabe M, Igarashi T. 3D modeling of trees from freehand sketches [C]// *Proceedings of ACM SIGGRAPH 2003 Sketches & Applications*. New York, USA: ACM Press, 2003: 1-1. [DOI: 10.1145/965400.965565]
- [11] Okabe M, Owada S, Igarashi T. Interactive design of botanical trees using freehand sketches and example-based editing [J]. *Computer Graphics Forum*, 2005, 24(3): 487-496. [DOI: 10.1111/j.1467-8659.2005.00874.x]
- [12] Tan P, Fang T, Xiao J X, et al. Single image tree modeling [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2008, 27(5): 108(1-8). [DOI: 10.1145/1457515.1409061]
- [13] Chen X J, Neubert B, Xu Y Q, et al. Sketch-based tree modeling using Markov random field [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2008, 27(5): 109-1: 109-10. [DOI: 10.1145/1457515.1409062]
- [14] Wither J, Boudon F, Cani M, et al. Structure from silhouettes: a new paradigm for fast sketch-based design of trees [J]. *Computer Graphics Forum*, 2009, 28: 541-550.
- [15] Liu J, Zhang X P, Li H J. Sketch-based tree modeling by distribution control on planes [C]// *Proceedings of the 9th ACM SIGGRAPH Conference on Virtual-Reality Continuum and its Applications in Industry*. New York, USA: ACM Press, 2010: 185-190. [DOI: 10.1145/1900179.1900219]
- [16] Liu Y H, Wang H B, Du W, et al. Image-based 3D reconstruction of tree-like objects [J]. *Chinese Journal of Computers*, 2002, 25(9): 1-6. [刘彦宏, 王洪斌, 杜威, 等. 基于图象的树类物体的 3 维重建 [J]. 计算机学报, 2002, 25(9): 1-6.]
- [17] Lhuillier M, Quan L. A quasi-dense approach to surface recon-

- struction from uncalibrated images[J]. *Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2005, 27(3): 418-433. [DOI: 10.1109/TPAMI.2005.44]
- [18] Reche A, Martin I, Drettakis G. Volumetric reconstruction and interactive rendering of trees from photographs[J]. *ACM Transactions of Graphics*, 2004, 23(3): 720-727. [DOI: 10.1145/1186562.1015785]
- [19] Teng C H, Chen Y S, Hsu W H. Constructing a 3D trunk model from two images[J]. *Graphical Models*, 2007, 69(1): 33-56. [DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.gmod.2006.06.001]
- [20] Teng C H, Chen Y S. Image-based tree modeling from a few images with very narrow viewing range[J]. *Visual Computer*, 2009, 25(4): 297-307. [DOI: 10.1007/s00371-008-0269-1]
- [21] Neubert B, Franken T, Deussen O. Approximate image-based tree-modeling using particle flows[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2007, 26(3): 88(1-8). [DOI: 10.1145/1275808.1276487]
- [22] Ma W, Wang Y Z, Zha H B, et al. Modeling of tree branches by Bayesian network structure inference[C]//Fifth International Symposium on 3D Data Processing, Visualization and Transmission. France: IEEE, 2010, 1: 10.
- [23] Zeng J G, Zhang Y, Zhan S Y. 3D tree models reconstruction from a single image[C]//Proceedings of 6th IEEE International Conference on Intelligent Systems Design and Applications, New Jersey, USA: IEEE Press, 2006: 445-450. [DOI: 10.1109/HLK.2003.1240854]
- [24] Cheng Z L, Zhang X P, Chen B Q. Simple reconstruction of tree branches from a single range image[J]. *Journal of Computer Science and Technology*, 2007, 22(6): 846-858. [DOI: 10.1007/s11390-007-9095-6]
- [25] Xu H, Gossett N, Chen B. Knowledge and heuristic-based modeling of laser-scanned trees[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2007, 26(4): 19. [DOI: 10.1145/1289603.1289610]
- [26] Zhu C, Zhang X P, Hu B G, et al. Reconstruction of tree crown shape from scanned data[J]. *Technologies for E-Learning and Digital Entertainment Lecture Notes in Computer Science*, 2008, 5093: 745-756. [DOI: 10.1007/978-3-540-69736-7_79]
- [27] Wang Y, Weinacker H, Koch B. Lidar point cloud based procedure for vertical canopy structure analysis and 3D single tree modelling in forest[J]. *Sensors*, 2008, 8(6): 3938-3951. [DOI: 10.1184.1853]
- [28] Dai M R, Li H J, Zhang X P. Tree modeling through range image segmentation and 3D shape analysis[J]. *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 2010, 67(5): 413-422. [DOI: 10.1007/978-3-642-12990-2_47]
- [29] Livny Y, Yan F L, Olson M, et al. Automatic reconstruction of tree skeletal structures from point clouds[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2010, 29(6): 151(1-8). [DOI: 10.1145/1866158.1866177]
- [30] Livny Y, Pirk S, Cheng Z L, et al. Texture-lobes for tree modeling[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2011, 30(4): 53(1-10). [DOI: 10.1145/2010324.1964948]
- [31] Bucksch A, Lindner R C, Menenti M. Skeltre-fast skeletonization for imperfect point cloud data of botanic trees[C]//Proceedings of the 2nd Eurographics Conference on 3D Object Retrieval, Eurographics Association Aire-la-Ville. Switzerland: Eurographics, 2009, 13-27. [DOI: 10.2312/3DOR/3DOR09/013-020]
- [32] Quan L, Wang J D, Tan P, et al. Image-based modeling by joint segmentation[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2007, 75(1): 135-150. [DOI: 10.1007/s11263-007-0044-1]
- [33] Tan P, Zeng G, Wang J D, et al. Image-based tree modeling[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2007, 26(3): 87(1-7). [DOI: 10.1145/1275808.1276486]
- [34] Chodorowski A, Mattsson U, Langille Mo, et al. Color lesion boundary detection using live wire[C]//Proceedings of SPIE Medical Imaging: Image Processing. San Diego, CA: SPIE, 2005, 5747: 1589-1596. [DOI: 10.1117/12.594944]
- [35] Cheng Z L, Yan F L, Chen B Q. Texture-lobes for tree modeling[J]. *Journal of Computer-Sided Design & Computer Graphics*, 2012, 24(1): 2-4. [程章林, 燕飞龙, 陈宝权. 基于Lobe表示的树木快速3D建模[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2012, 24(1): 2-4.]
- [36] Sun R X, Jia J Y, Li H Y. Image-based lightweight tree modeling[C]//Proceedings of the 8th International Conference on Virtual Reality Continuum and its Applications in Industry. New York, USA: ACM Press, 2009: 17-22. [DOI: 10.1145/1670252.1670258]
- [37] Zhang H S, Hua W, Wang Q, et al. LDM-pack: a new method for rendering trees rapidly[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2004, 9(10): 1216-1222. [张淮声, 华炜, 王青, 等. 层次深度拼图集: 一种新的树木快速绘制方法[J]. 中国图象图形学报, 2004, 9(10): 1216-1222.]
- [38] Kim J, Cho H. Efficient modeling of numerous trees by introducing growth volume for real-time virtual ecosystems[J]. *Computer Animation and Virtual Worlds*, 2012, 23: 155-165. [DOI: 10.1002/cav.1438]
- [39] Chen D Y, Tian X P, Shen Y T, et al. On visual similarity based 3D model retrieval[J]. *Computer Graphics Forum*, 2003, 22(3): 223-232. [DOI: 10.1111/1467-8659.00669]
- [40] Liu W, He Y J. 3D model retrieval based on orthogonal projections[C]//Proceeding of Ninth International Conference on Computer Aided Design and Computer Graphics. New Jersey, USA: IEEE Press, 2005, 1. [DOI: 10.1109/CAD-CG.2005.1]