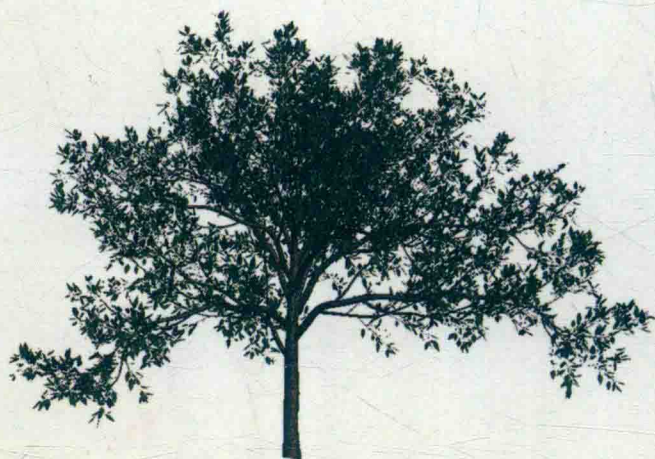
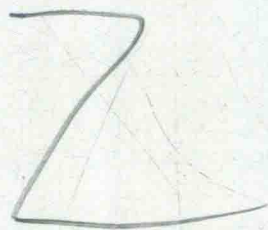


基于点云的真实树木 三维仿真理论与技术

3D Simulation Theory and Technology
of Botanic Tree Based on Scattered Point Cloud

石银涛 著



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

基于点云的真实树木 三维仿真理论与技术

石银涛 著



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

内 容 提 要

随着数字地球、数字城市、数字林业等数字化工作的不断深入,树木作为地球及城市地表最普遍存在的景观之一,构造其三维模型必然成为现实世界三维数字化工作不可或缺的一部分。点云数据与其他类型数据相比具有明显的优势:点位精度高、细节分辨率高、环境干扰小等。本书针对基于点云的真实树木三维仿真问题,分析探讨了与其相关的若干关键技术,如点云数据的压缩、去噪、结构骨架提取和仿真等,为真实树木的三维建模提供一种新方法。本书内容全面,系统性强,结构清晰,从树木点云获取及处理入手,以骨架提取、枝干仿真、树叶仿真的顺序详细介绍了真实树木的三维仿真过程。

本书适合测绘、林业遥感、三维仿真等相关领域的读者阅读。

图书在版编目(CIP)数据

基于点云的真实树木三维仿真实理论与技术 / 石银涛著. —上海:同济大学出版社,2018.8

ISBN 978-7-5608-7691-7

I. ①基… II. ①石… III. ①计算机仿真—技术
IV. ①TP391.92

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 013511 号

基于点云的真实树木三维仿真实理论与技术

石银涛 著

责任编辑 李 杰 责任校对 谢卫奋 封面设计 陈益平

出版发行 同济大学出版社 www.tongjipress.com.cn
(上海市四平路 1239 号 邮编:200092 电话:021-65985622)

经 销 全国各地新华书店
排 版 南京新翰博图文制作有限公司
印 刷 上海安兴汇东纸业有限公司
开 本 787 mm×960 mm 1/16
印 张 11
字 数 220 000
版 次 2018 年 8 月第 1 版 2018 年 8 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5608-7691-7

定 价 58.00 元

本书若有印装质量问题,请向本社发行部调换 版权所有 侵权必究

■ 前 言 ■

FOREWORD

随着数字地球、数字城市、数字林业等数字化工作的不断深入,树木作为地球及城市地表最普遍存在的景观之一,构造其三维模型必然成为现实世界三维数字化工作不可或缺的一部分。此外,真实树木的三维模型在景观设计、树木保护、虚拟现实、林业遥感等领域也有着广阔的应用前景。针对基于点云的真实树木三维仿真问题,本书分析探讨了与其相关的若干关键技术,所进行的研究工作主要包含以下内容。

(1) 点云的准备。概述了利用地面三维激光扫描系统进行树木点云数据采集的流程以及相关的注意事项。分析了基于同名控制点进行多站点云配准的相关理论、点云的典型去噪与压缩方法,并通过实验分析了适用于树木点云优化的有效压缩算法。

(2) 骨架的构建。针对骨架的定义,分别从内切球定义与 GMF 定义两个角度进行了阐述,并分析了曲线骨架的内在特性。基于不同的理论基础,提出了三个有效的骨架提取算法:①基于体素空间的骨架提取算法,将散乱点云转换到体素空间,利用并行细化算法提取一个单体素连通集,并借助 B 样条拟合曲线骨架;②基于点云收缩的骨架提取算法,利用近邻域构建变换矩阵,通过点云收缩变换提取一个离散的近似骨架点集,并借助有权无向图与边折叠算法构建一维曲线骨架;③基于几何特征的骨架提取算法,利用点云的局部属性分割枝干,通过提取骨架节点而构建曲线骨架。同时,选取几棵树木的点云作为样本,通过实验测试了各个算法的可行性、可靠性以及执行效率。

(3) 枝干结构的恢复重建。将树干结构分为轻微遮挡与严重遮挡两类,前者在骨架约束的基础上,利用主动轮廓模型拟合枝干的三维结构;后者以树叶点

云作为吸引因子,通过主骨架的细化扩展而恢复重建那些缺少点云信息的枝干结构。通过相关实验,分析了各个算法的可行性、应用效果等。

(4) 树叶的高效仿真。在对树叶的可见形态结构进行分析的基础上,利用叶片的数字图像构建树叶的三维模型。通过树木的完整三维仿真实验,测试了本书所提出的树木三维仿真技术的可行性,并给出了相应的建模效果。

虽然基于点云进行树木三维仿真比基于其他数据具有一些明显的优势,如点位精度高、细节分辨率高、环境干扰小等,但还有许多相关问题有待进一步深入研究,如海量点云的高效压缩、树木仿真的自动化、多技术的综合应用等。

由于笔者的认识和水平有限,书中难免存在不足及有待商榷之处,希望广大读者和同仁不吝赐教,提出批评、指正和建议。

著 者

2018年3月

■ 目 录 ■

CONTENTS

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景与意义	1
1.2 树木三维仿真的研究现状	3
1.2.1 基于规则的树木仿真	3
1.2.2 基于影像的树木仿真	6
1.2.3 基于点云的树木仿真	9
1.3 研究内容	11
第 2 章 点云的采集与优化	14
2.1 点云的采集	14
2.1.1 场地踏勘	14
2.1.2 靶标布设	15
2.1.3 扫描作业	16
2.2 点云的配准	17
2.3 点云的去噪	20
2.3.1 拉普拉斯滤波算法	21
2.3.2 双边滤波算法	22
2.3.3 均值漂移算法	22
2.4 点云的压缩	23

2.4.1	空间包围盒压缩算法	24
2.4.2	均匀网格压缩算法	25
2.4.3	基于信息量的压缩算法	25
2.4.4	基于曲率的压缩算法	27
2.5	本章小结	29
第3章	树木模型的骨架提取	30
3.1	骨架的定义及特性	30
3.1.1	骨架的定义	32
3.1.2	骨架的特性	36
3.2	基于体素空间的骨架提取	38
3.2.1	算法概述	39
3.2.2	基于体素空间的骨架提取	42
3.3	基于点云收缩的骨架构建	52
3.3.1	算法概述	52
3.3.2	基于点云收缩的骨架构建	55
3.4	基于几何特征的骨架构建	62
3.4.1	算法概述	62
3.4.2	基于几何特征的骨架构建	63
3.5	实验测试与分析	72
3.6	本章小结	79
第4章	树木枝干的三维仿真	80
4.1	树木的枝干结构与模型分类	80
4.1.1	树木的枝干结构	80
4.1.2	树木模型的分类	83
4.2	基于骨架约束的枝干仿真	87
4.2.1	算法概述	88
4.2.2	基于骨架约束的树木三维仿真算法	92
4.2.3	实验分析	101

4.3 基于生长模型的枝干仿真	103
4.3.1 算法概述	103
4.3.2 基于生长模型的枝干仿真	108
4.4 本章小结	120
第5章 树叶仿真与树木仿真测试	121
5.1 树叶的三维仿真	121
5.1.1 算法概述	121
5.1.2 树叶的仿真	129
5.2 树木仿真测试	139
5.3 本章小结	150
第6章 研究成果与发展思考	151
6.1 研究成果	151
6.2 发展思考	152
参考文献	154
后记	167

第1章 绪论

1.1 研究背景与意义

当今数字时代,现实世界的数字化日趋成为一种发展潮流,如数字地球、数字城市、数字林业等数字化工作的开展,已构建的数字模型在社会的建设发展过程中发挥着越来越重要的作用。现实世界的数字化就是将地球表面(或城市)每一点上的固有信息数字化并建立三维几何模型,而树木作为其中最普遍存在的景观之一,构造其三维模型必然成为现实世界三维数字化工作不可或缺的一部分。同时,真实树木的三维模型也引起了景观设计、树木保护、虚拟现实、林业遥感以及农林业应用等领域的广泛关注。例如,在城市景观设计中,常常需要复原周围场景中的物体,其中很大一部分就是建立其中各种树木的三维模型;名树名木保护的一项重要内容是构建树木的数字档案,即对树木进行数字化管理,构建其真实形态的三维模型并永久保存;现有的许多数字三维场景缺乏真实感的原因之一就是场景中的树木模型太简单,与现实世界中的真实树木形态差异较大;遥感领域利用树木的精确三维模型,可以模拟光线的入射、反射和发射,便于验证公式、辅助遥感器的设计等;在林业经营管理中,根据构建的树木三维数字几何模型,不仅可以直接获取林木的许多可测因子,如树高、枝干直径、树木材积等,而且也便于某些重要参数的计算和预测,如树木冠层光强分布、叶面积指数等,这不但能提高林业调查的精度与效率,而且有利于树木生长发育的研究。总之,现实世界中各种树木的三维仿真在计算机图形学、虚拟现实、农林业等领域有着广阔的应用前景。

真实树木的三维仿真是利用数据采集设备获取真实树木的空间数据和表面

纹理图像,在计算机中重建出既与实际树木几何形态吻合又具有真实视觉效果三维树木模型。重建真实树木三维模型的一个重要问题是树木完整几何数据的获取,因为树木的几何形状和拓扑形态普遍比较复杂,树叶与枝干之间存在比较严重的遮挡,而且树木容易受外界风力的影响发生摆动等,这一系列因素都增加了数据获取的难度。机载 LiDAR、星载激光扫描、航空摄影测量等方法提供的都是关于原木或完整森林的概况信息,无法有效地检测林木的详细信息,也不能通过这些数据构建树木的准确三维模型。根据国内外关于此类研究已发表的文献分析,已开展的真实树木三维仿真主要基于数字影像或激光扫描的点云完成,且随着三维激光扫描技术的不断成熟与发展,基于点云的三维仿真逐渐得到越来越多的关注。基于影像的树木三维仿真主要是通过影像对匹配或单幅影像辅助先验知识生成树木的三维模型,但由于受到光照环境、树叶遮挡及影像匹配精度等因素的影响,大部分枝干模型(包括枝干形状、直径信息)多靠植物学知识虚拟生成,与原始树木形态相差较大,最后得到一个似是而非的三维模型,不具备形态结构上的保真性。地面三维激光扫描系统的快速发展,推动了三维数字建模技术的不断进步,也为准确、高效地重建树木提供了可能。地面三维激光扫描系统是一种集成了多种高新技术的新型测绘系统,采用非接触式高速激光测量方式,以点云形式获取物体表面的阵列式几何图形数据。地面三维激光扫描系统在测量过程中不依赖太阳光或其他的人为光源,不易受作业环境的限制;数据获取速度极快,能在极短的时间内采集树木表面的数百万个点的信息;点位精度高,单点定位精度通常在毫米级。这不仅为树木的三维仿真提供了有力的数据源,同时,精度高、细节表达详细的树木空间数据也为林业内部的精准分析提供了可靠的数据支持。

目前,树木可视化虚拟仿真已取得了很大进展,能够表现逼真的树木景观效果。但是,针对真实树木的三维模型重建工作仍然存在许多有待解决的技术难点,主要原因在于树木的结构复杂多变,应用常规的三维建模方法不能有效地表现树木的真实形态。同时,受树叶与枝干之间遮挡、仪器扫描精度、外界环境(如风力、空气湿度等)等因素的影响,采集的树木点云中不可避免地存在重叠与空洞,这也增加了点云数据处理的复杂度。当前,现有的三维建模算法与商用点云处理软件所构建的树木模型大多比较生硬,且有时由于数据缺失严重的点云几乎无法构建树木模型。在此背景下,本书根据实际应用的需要,对真实树木三维

仿真的关键技术进行研究,如树木点云数据的获取方法、点云的预处理(去噪、压缩、配准等)、树木骨架的提取方法、不同树木类型的建模策略等,以期基于地面三维激光扫描系统获取的树木点云而构建出准确的树木三维模型,以解决真实树木三维仿真技术滞后与树木三维模型需求激增之间的矛盾。本书的研究内容属于逆向工程的范畴,在科学计算可视化、曲面造型、模式识别等领域也有着广泛的应用前景。

1.2 树木三维仿真的研究现状

树木的三维仿真研究已有几十年的历史,根据不同领域的实际需要,人们从不同角度构建模型来模拟树木的形态,从而出现了多种树木建模方法。纵观树木三维仿真技术的发展历程,其主要经历了基于规则的仿真、基于影像的仿真、基于点云的仿真三个阶段。其中基于规则的仿真工作主要通过数学模型结合植物学的知识和规则来模拟植物的生长过程和形态特征,属于树木的虚拟仿真,而基于影像或点云的树木三维仿真工作主要侧重于真实树木的逆向建模,属于树木的真实仿真。近年来,由于精准林业、城市规划、数字城市等领域对真实树木三维模型的需求不断增多,基于影像与点云的树木三维建模工作得到了越来越多的关注。

1.2.1 基于规则的树木仿真

基于规则的树木仿真主要遵循树木生长规律,基于一些植物学的规则和程序来模拟树木的生长过程或形态特征,通过参数控制生成不同树木的三维模型。这类工作最早可以追溯到20世纪60年代,Ulam基于细胞自动机构建了第一个树木三维模型,后来Greene将其扩展到体素空间。在随后的发展中,逐渐出现了许多种不同类型的基于规则的树木三维仿真方法,其中比较有代表性的有L系统、粒子系统、AMAP系统等。

L系统是最早的植物建模方法,它最初由Lindenmayer提出,后来经Prusinkiewicz改进,发展成基于文本描述的“改写”规则^[1]。L系统采用字符串重写方式描述植物中广泛存在的自相似性,能够模拟不同类型的植物、同一植物

不同器官间的生长竞争以及周围环境对植物生长的影响。根据不同的应用需求,目前已发展出多种不同的 L 系统,如随机 L 系统、参数 L 系统、开放 L 系统及交互 L 系统等,图 1.1(a)为利用 L 系统进行植物生长仿真的示例。Honda 等利用递归分支结构模型,通过调节分枝角度、分枝比率、母枝条与子枝条的长度等参数而生成一些真实度较高的树木模型^[2]。Prusinkiewicz 利用三次曲面模拟了葵花叶片、花瓣以及玫瑰花瓣,但这种方法不适合用来模拟花瓣的生长过程,只适合模拟某一生长阶段的形态,因为花瓣生长过程中的连续变化需要通过不断调整所有参数来实现,导致形状不易控制且计算量较大。陈昭炯在分析 L 系统表达机制的基础上,探讨了 L 系统的代码实现方法,并给出了模拟实例,在实现 L 系统时,既保留了 L 系统的优点,又改进了植物形态生硬的不足,运用参数 L 系统和随机 L 系统这两种扩展的 L 系统模拟了竹子的形态。游晓明等模拟了三维松树,在实现过程中运用面向对象思想,将自然树木算法封装成类,将树的颜色、高度等 8 个相关属性设为类对应的特征值,通过修改其特征值来逼近现实中的自然树木。

粒子系统是一种随机建模方法,系统由大量粒子组成,粒子之间相互独立且随时间变化动态移动,图 1.1(b)为利用粒子系统所构建的树木模型^[3]。Reeves 提出了结构化粒子系统来模拟作为背景环境的草地、森林。Holton 的方法提供由树根到树叶的任意路径,通过树木分叉的数目、分叉角度的大小、树枝长度和各种扰动来构造模型。Lintermann 和 Deussen 等通过符合树木直观形状的规则形成了无须了解植物特殊知识的便于使用的 Xfrog 系统,它基于一个器官模型库,可以很方便、快速地生成各种植物模型,包括树木、花、灌木丛等,图 1.1(c)为利用 Xfrog 系统所制作的树木模型^[4]。

de Reffye 等建立的 AMAP 系统是植物生长建模方法的另一个典型代表,他们提出用随机过程的方法来模拟植物芽的繁殖、增生、分支、死亡等生长过程,并基于此原理和田间测量数据开发了著名的虚拟植物生长软件 AMAP,能够模拟各种类型的高大植物。

此外,基于规则的树木仿真方法还包括迭代函数系统(Iterated Function System, IFS)、A 系统、逐步生长系统等。

迭代函数系统是分形理论的一个重要分支,在植物的三维仿真领域得到了广泛的应用和研究。该方法通过设置的相关仿射变换,将植物的整体几何形态

变换到局部空间中。1985年, Barnsley等首次利用IFS构建了某蕨类植物的叶片, 随后提出了一种再现迭代函数系统(Recurrent IFS), 不仅在控制操作方面更加灵活, 且能体现植物体局部之间的不同自相似性^[5, 6]。1991年, Prusinkiewicz等在IFS基础上改进设计了一种语言约束式迭代函数系统(Language-restricted IFS), 其通过添加变换顺序约束控制, 能综合地概括各类不同的IFS方法^[7]。对利用IFS进行树木的三维仿真, 国内学者进行了许多研究, 但应用效果并不理想, 因为这类方法缺乏对树木拓扑结构的理解与控制, 仅从树木的几何特征去模拟, 且缺乏对树木生理特征的描述, 生成的树木形态差异性小, 存在千篇一律的缺陷。图1.1(d)是利用IFS所构建的树木三维模型。

A系统是Aono等在树木三维结构模型(GMT1~GMT4)的基础上所提出的一种植物仿真系统^[8]。该系统引入了枝干间的相互吸引、抑制作用及枝干间的夹角等相关几何参量, 对子枝干在母枝干上的空间分布形态作了详细的估算, 并使用统计变化机制, 实现对植物几何结构的控制和修改。该系统基于GMT1~GMT4等四类几何结构模型, 通过添加分枝角度与分枝结构等特征参数, 根据一定的统计规律随机变化, 能够迅速地生成比较直观的植物形态结构, 且利用吸引子算法可以模拟光照、重力及风力等环境因素对植物生长形态的影响。然而, 该系统中的相关参数值由系统设计者预先确定, 容易造成系统依赖于设计者对具体植物几何外观的认识与理解的问题, 并且该系统不能产生与时间相关的生长序列, 反映不了植物的潜在形态。图1.1(e)为利用A系统所构建的三维树木模型。

逐步生长系统是Weber等提出的一种植物建模系统^[9]。该系统根据自然界中树木“边生长, 边修正”的生长特征, 从植物的整体几何结构出发, 用大量参数对树木的几何造型进行变化控制。它首先生成植物的主枝干, 然后根据层次结构逐步生成子枝干, 最后生成叶子。该系统不仅可以模拟单棵树木, 且可以实现森林等复杂场景的仿真, 即通过相应的模型简化, 根据树木距离视点的远近不同而采用多分辨率绘制, 这样构建的整体场景仿真效果比较好, 但远处模型在简化后容易产生模糊或失真等问题。图1.1(f)为利用逐步生长系统所模拟的树木三维形态。

基于规则的树木仿真是以生成视觉上比较真实的三维模型为目的, 构建模型中的树木枝干多用广义圆柱或分段圆台表达, 同时, 侧重于从植物学的角度来

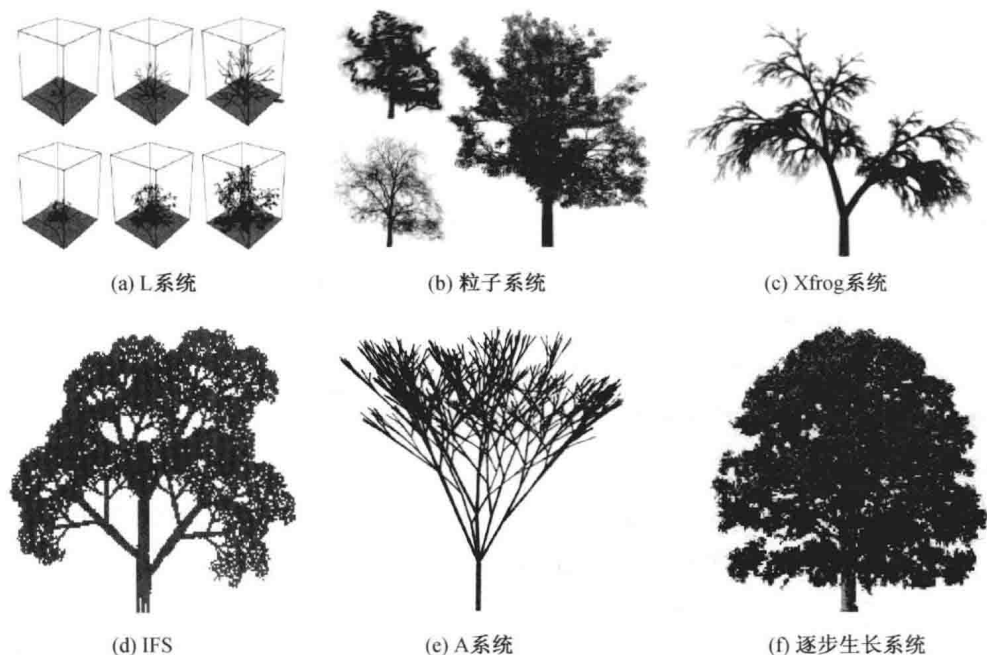


图 1.1 典型的参数化建模方法

了解和掌握树木的生长变化规律,其中融入了大量植物学的知识。模型生成过程中需要调整大量的参数,而且参数调整对输出模型的变化影响并不是很直观,故利用这种方法很难构建现实世界中真实树木或特定形状树木的三维模型。

1.2.2 基于影像的树木仿真

基于规则的树木三维仿真主要侧重于模拟树木的生长过程,形态变化多通过参数控制,这也使得这种方法本身对树木造型的表现力不够,所以用该方法不易或很难确切地构建特定树木的真实形态。基于影像的树木仿真是近景摄影测量技术的应用拓展,它并非严格地遵守植物学规律,而主要是借助树木的单幅或多幅数字影像,根据一些先验知识和规则生成与原始输入图像相似的树木模型。从现有的研究技术来看,该类树木仿真方法通常首先在人工交互辅助下分割出树木的枝干,然后进一步提取每个枝干的“骨架”,再基于“骨架上的点为均匀分布”这一假设,构造出相应枝干上的对应点,最后利用计算机图形学中的三维重建技术恢复枝干的三维几何造型。

基于多幅影像的树木仿真方法主要通过标定的多张树木影像恢复树木的三维信息,并基于此构建树木的三维模型。Shlyakhter 等从绕树木周围拍摄的多幅分割好的轮廓图像中重建树木三维外形轮廓,然后提取骨架,再将骨架作为 L 系统输入,生成树木三维模型^[10];Reche-Martinez 等基于多幅分割好的图像重建树木的体素模型用于绘制,该方法并没有得到真正的树木三维模型^[11];Teng 等基于两幅相近视点图像提取树干及主要树枝的三维骨架^[12];Quan, Tan 等人分别针对大叶片和小叶片树木提出了相应的树木重建方法,首先从多幅图像中基于计算机视觉原理恢复植物表面点的三维空间信息,然后结合恢复的点云和原始图像重建叶片和枝干三维模型。图 1.2 所示是 Tan 等基于多幅影像进行树木三维仿真的大概流程。



图 1.2 基于多幅影像的树木仿真

基于单张影像的树木仿真方法主要利用手工简单绘制树木的主要枝干或外形轮廓,然后基于一些植物学规则或模型库自动生成树木三维模型,这类方法比较直观,需要人工参与。Han 等采用 Bayesian 方法从单幅图像中重建树状物体,该方法只能生成形状比较简单的植物体^[13];Okabe 等通过最大化树枝间的距离从二维草图中得到三维枝干模式,通过交互式界面增加、删除、修剪树木外形,如图 1.3(a)所示^[14];Chen 等也是基于手绘的二维枝干草图重建树木三维模型,该方法将已有的树木模型库作为约束,利用概率模型从二维草图中重建三维信息,如图 1.3(b)所示^[15];谭平等基于一幅树木图像,通过用户手绘笔画的方式指导树木的构建与合成^[16, 17];Neubert 等提出一种用树木图像作为约束,从树叶向树根汇聚的粒子流方法构建不同形态的树木三维模型,该方法不需要恢复出三维点云信息^[18];Wither 等不是手绘树木枝干外形,而是模仿艺术家的创作模式先画出树木的整体外形轮廓,然后根据骨架从整体外形轮廓推出二维树木分

枝结构,进而重建三维结构乃至整棵树,如图 1.3(c)所示^[19]。

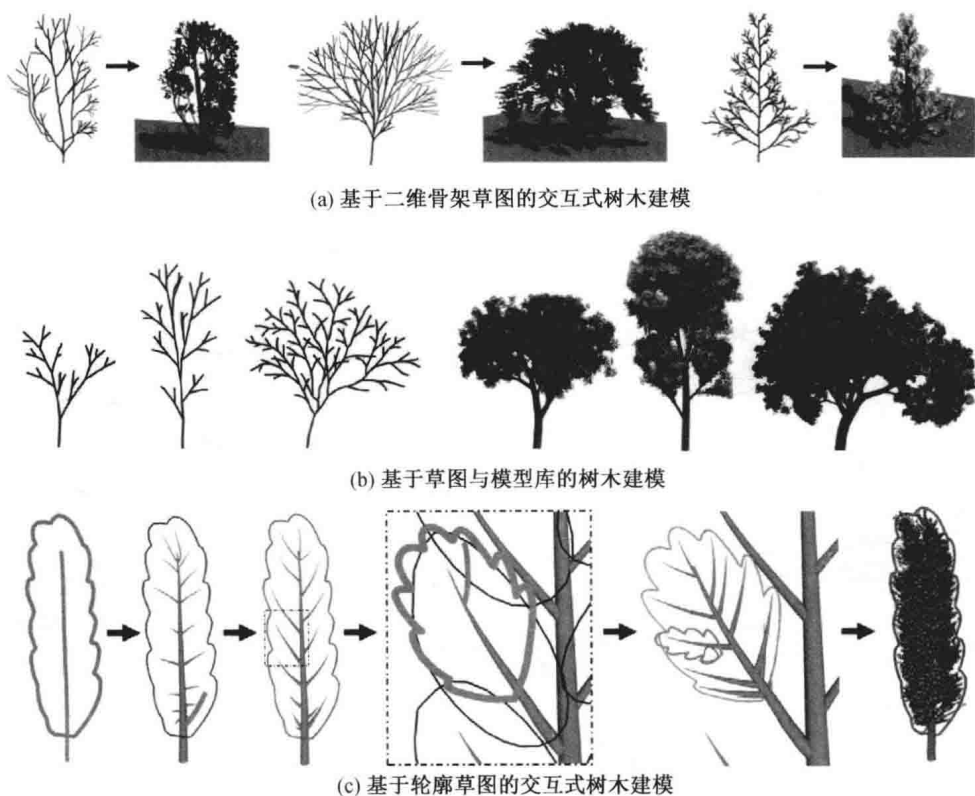


图 1.3 基于单幅影像的树木仿真

与基于规则的树木仿真相比,基于影像的树木仿真以树木的真实图像为建模基础,并非针对具体的树木类别,从而实现了真实树木的三维仿真,具有独立性强、适应范围广、成本低廉等优点。但是,该类方法所建立的树木模型质量主要依赖于所采集的树木图像,而图像又易受光照条件、相机性能、视角等因素的影响,容易造成构建的树木模型精度不高。此外,由图像中提取的三维点的数量与密度会严重地制约树木模型的质量,而为了尽可能恢复关于树木的空间三维信息,通常需要采集较多视角的图像,这在实际中有时容易受到客观环境的限制而无法得到满足。同时,根据现有的技术来看,完全自动地从图像中分离出树木的几何和拓扑结构暂时还无法实现,需要一定的人工干预,这不仅可能引入人工误差,而且也影响建模的效率。

1.2.3 基于点云的树木仿真

随着新兴科学技术的不断引入,三维激光扫描技术取得了快速发展,它在扫描速度、点位精度、稳定性等方面的优势日益显著。新型的地面三维激光扫描系统每秒能获取几万到几十万个测量点,这些海量的三维数据被形象地称为“点云数据”。点云数据以最直观、最简洁的形式有效地表现了模型的几何信息,在三维数字建模领域得到了广泛的应用和研究。点云数据是对实物表面信息的数字化结果,是由实物表面上一系列空间采样点构成的、对实物形体描述的一种边界表示形式。构成点云的基本单位是三维采样点,以及与之相关的表面属性。采样点包含的几何信息包括三维坐标、大小和法向等,而属性信息则包括物体表面的颜色、透明度和纹理特征等。点云数据结构简单,获取方便快捷,能够表现采样实物表面的细节信息。针对真实树木的三维仿真,选择一个合理的模型描述树木的三维结构取决于对嵌入树冠中的细部结构层次的表达,如树冠、树枝、叶簇、树叶等,即选择的模型应能够区分树木的枝干与簇叶。与基于影像的树木仿真技术相比,点云数据更有利于在树叶与树芽级模拟树木结构,因为点云数据在树木特征的细节表达、点位准确性等方面具有明显的优势。

针对基于点云的树木三维仿真研究,当前还多集中在树木的枝干重建方面,如 Preifer 等通过点云估算树木的枝干半径、轴方向、轴的空间方位等参数,利用圆柱分段拟合的方法构建了树木的主要枝干模型^[20, 21]; Xu 等基于树木知识与启发式搜索,利用空间聚类与单源路径最小算法提取树木骨架,然后基于植物生长理论估算树枝的半径,从而构建树木的枝干模型,图 1.4(a)所示为构建的树木模型^[22]; Cheng 等利用点云及树木枝干表面信息,根据轴向估计在枝干各横截面上计算骨架位置及直径,通过深度图像重建树干、树枝的广义圆柱模型,图 1.4(b)所示为构建的树木模型;王剑等通过筛选树木点云中的枝干坐标数据来重建树木枝干的片断模型,然后将这些片断模型拼合得到由一系列圆柱体经过空间叠加而成的完整枝干的三维模型^[23]; Bucksch 等将点云数据利用八叉树进行细胞分割,从而通过连接邻近细胞,局部提取形成弯曲骨架,通过骨架拟合树木模型^[24, 25]; Yan 等将点云分割成小区域,通过圆柱拟合的方式构建树木模型,图 1.4(c)所示为构建的树木模型^[26]; Binney 等首先基于点云生成一个粗略树木模型,然后通过不断地迭代修正各种参数,如树枝的角度、半径、长度及方位等,