

8-7-2020

Algorithm for Modeling of Large-scale Realistic Chinese Rose Based on Morphological Characteristics

Yang Meng

1. School of Information Science and Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;;2. The State Key Laboratory of Computer Science, Institute of Software, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

Wanghui Guo

1. School of Information Science and Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;;

Xiaoyu He

1. School of Information Science and Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;;

Lin Lin

1. School of Information Science and Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;;

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Algorithm for Modeling of Large-scale Realistic Chinese Rose Based on Morphological Characteristics

Abstract

Abstract: An algorithm of modeling individual plant and simulating large-scale garden scene of Chinese rose seasons was proposed based on morphological characteristics of plants. Real morphological data were accurately captured for the main organs of individual plant; These data should be deeply analyzed to gain the morphological properties, such as golden section; Topological relationships were established among the main stem and different high-order branches, branches and leaves. Meanwhile the main organs such as stem, leaves, flowers and thorns were simulated to complete the whole plant; The large-scale garden scene of Chinese rose were simulated based on the algorithm of Poisson Disk Tiles with corner strategy. Experimental results validate that the proposed method could realistically and efficiently simulate individual plants and large-scale garden scene of Chinese rose in different patterns, with its comprehensive application and development perspectives.

Keywords

modeling of Chinese rose, morphological characteristics, golden section, large-scale

Authors

Yang Meng, Wanghui Guo, Xiaoyu He, Lin Lin, and Yang Gang

Recommended Citation

Yang Meng, Guo Wanghui, He Xiaoyu, Lin Lin, Yang Gang. Algorithm for Modeling of Large-scale Realistic Chinese Rose Based on Morphological Characteristics[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(10): 2328-2336.

基于形态特征真实感月季大规模建模算法

杨猛^{1,2}, 郭王翠¹, 贺晓宇¹, 林琳¹, 杨刚¹

(1. 北京林业大学信息学院, 北京 100083; 2. 中国科学院软件研究所计算机科学国家重点实验室, 北京 100190)

摘要: 提出一种基于形态特征的月季单株植株建模及大规模园林场景模拟方法。精确采集月季植株各主要器官的真实形态数据; 对这些数据特征进行深入分析, 获取诸如黄金分割等形态特性; 以这些特性为基础建立单株植株主枝与各层分枝间、枝与叶间的拓扑关系, 同时模拟茎、叶、花、刺等各器官以生成完整的植株; 通过基于角策略的 Poisson Disk Tiles 分布模型生成大规模园林月季场景。实验结果表明: 算法能够真实、有效地生成多种不同形态的单株月季植株并模拟大规模园林月季场景, 具有广泛应用价值和广阔发展前景。

关键词: 月季建模; 形态特征; 黄金分割; 大规模

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2015) 10-2328-09

Algorithm for Modeling of Large-scale Realistic Chinese Rose Based on Morphological Characteristics

Yang Meng^{1,2}, Guo Wanghui¹, He Xiaoyu¹, Lin Lin¹, Yang Gang¹

(1. School of Information Science and Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2. The State Key Laboratory of Computer Science, Institute of Software, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: An algorithm of modeling individual plant and simulating large-scale garden scene of Chinese rose seasons was proposed based on morphological characteristics of plants. Real morphological data were accurately captured for the main organs of individual plant; These data should be deeply analyzed to gain the morphological properties, such as golden section; Topological relationships were established among the main stem and different high-order branches, branches and leaves. Meanwhile the main organs such as stem, leaves, flowers and thorns were simulated to complete the whole plant; The large-scale garden scene of Chinese rose were simulated based on the algorithm of Poisson Disk Tiles with corner strategy. Experimental results validate that the proposed method could realistically and efficiently simulate individual plants and large-scale garden scene of Chinese rose in different patterns, with its comprehensive application and development perspectives.

Keywords: modeling of Chinese rose; morphological characteristics; golden section; large-scale

引言

众所周知, 植物是自然场景的重要组成元素之一, 也是人们日常生活中最常见的自然景观之一。



收稿日期: 2015-06-14 修回日期: 2015-07-22;
基金项目: 国家自然科学基金(61402038); 中央高校基本科研业务费专项资金(BLX2012049);
作者简介: 杨猛(1982-), 男, 河北, 博士生, 讲师, 研究方向为计算机图形学; 郭王翠(1993-), 女, 山西, 学士, 研究方向为计算机图形学; 贺晓宇(1993-), 男, 河南, 学士, 研究方向为计算机图形学。

目前, 基于形态特征的景观植物真实感模型单株建模与大场景仿真研究已成为计算机图形学中的热点与难点问题之一。

自然界中的植物往往拥有非常特殊的几何形态和表观属性, 通过对植物外形特征的分析与总结, 人们发现植物界中一个很有趣的现象: 植物中很多器官具有黄金分割的特性。以叶子为例, 叶子的排列是建立在能充分获得光合作用面积和采集

更多阳光这一基础上的。如蓟草, 有着轮生排列的叶片, 叶片与叶片之间的夹角为 $137^{\circ}30'$, 这是圆的黄金分割的比例^[1]。

景观植物具有较强的可观赏性, 常见于影视作品中衬托丰富人物的形象, 应用于游戏场景中构建真实环境, 在虚拟现实的研究实践中也扮演着极其重要的角色。根据形态特征对景观植物模型构建过程和大规模园林场景的模拟, 一方面可以探索植物结构规律, 深化对农学、植物学的研究; 另一方面, 植物建模与动画技术已在艺术设计、动画制作等领域得到广泛地应用。除此之外, 它还广泛应用于不同尺度的农田虚拟实验; 教学、科普与农业技术推广的虚拟农场; 园林场景的规划、娱乐影视场景的规划等其他领域。可见, 根据形态特征对景观植物模型构建过程和大规模园林场景的模拟, 在计算机图形学、农林学研究、计算机游戏、影视动画等诸多领域有着极为重要的研究意义与广泛的应用前景, 已逐渐成为诸多交叉领域研究的一个热点。

然而, 景观植物种类繁多, 长势千姿百态, 往往由很多具有不同外形特征的器官组成, 具有复杂的三维结构。景观植物与大部分人造物体最大的区别在于: 人造物体往往按照人们的审美和应用需求, 在制造过程中, 其表面纹理特征是可控的, 并且易于描述; 但由于植物本身较强的结构特征和复杂的三维结构等原因, 其生理形态受到阳光、土壤、水分和病虫害等多种自然因素的综合影响^[2], 因此很难人为地控制和表现其真实的形态特征。而大规模场景下植物的分布情况, 受到地形、人为因素等的影响, 很难模拟较为自然的分布效果。可见, 景观植物的单株建模与大规模场景仿真是计算机图形学领域研究的一个难点。

月季作为中国最常见的园林景观花卉植物, 具有一定的代表性, 又不失一般性, 与树木的自相生长规则的提取和定义十分困难, 因此本文将重点研究符合形态特征的月季花的单株建模与大规模植株分布仿真算法。

1 相关工作

目前, 植物建模仿真研究主要着眼于两个方向: (1)对植物形态特征的研究, (2)对植物静态模型仿真算法研究。

1.1 植物形态特征研究

13 世纪初, 意大利数学家斐波那契(Fibonacci)发现, 在 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21……这一数字序列(即 F 数列)中, 任何一个数字与后一个数字的比都接近 0.618, 而且越往后数字就越接近。这个神奇的数字被称为“黄金比率”, 古希腊美学家柏拉图(Plato)将其美誉为“黄金分割率”^[1]。稍加留意能发现生活中常见植物所体现出的黄金分割。

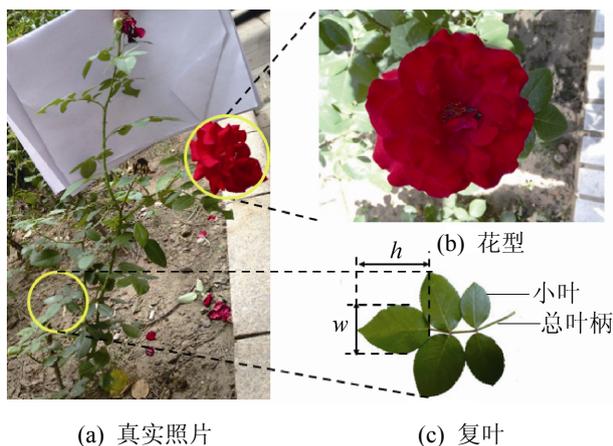
英国 T·W·汤姆森爵士指出, 树长高和长粗的最佳比例为 0.618^[3], 而树枝分叉的叉点通常就是黄金分割点^[4]。观赏性花卉如牡丹、荷花、菊花等, 其花蕾通常呈垂直椭球型, 其长短轴的比例大致接近于黄金比率^[5]。再如车前草, 其叶片轮生排列, 相邻叶片的夹角为黄金分割角 $137^{\circ}30'$ ^[1], 这样可以使叶片采集更多的阳光并获取更大的光合作用面积。更为奇异的是, 向日葵的葵盘上有一左一右两条黄金螺线, 每套螺线总数都符合 F 数列: 如有 21 条左旋, 则必有 13 条右旋, 其总数必为 34 条。事实上, 任何菊科植物花盘都呈这样的形态特征^[3]。

1.2 植物静态模型仿真

在植物仿真领域, 计算式植物模型(Computational plant models)与虚拟植物(Virtual plants)越来越被认为是理解植物生理学、植物生长与最终植物形态之间复杂关系的重要工具^[6]。目前, 国内外对于植物建模的研究方法大致可分为 3 种: 基于法则的方法、基于图像方法和基于草图方法。

基于法则方法, 人们曾提出过生长模拟或生长模型的概念, 如 Reffye^[7]的生长模型等, 主要用途是基于规则的建模, 实质上就是一组生成规则的演

变序列。Oppenheimer 等^[8]人则利用分形及其自相似性的概念创建植物模型。关于基于图像方法, Neubert 等^[9]提出了一个通过输入图像来生产 3 D 树木模型的方法, 并可使用图像信息来估计一个以三维像素为基础的树的体积, Tan 等^[10]则提出一个由图像生成自然界中真实存在的植物的 3 D 模型的系统, 该系统可以通过源图像分割技术来重建整个植物的形态。基于草图的方法, Okabe 等^[11]提出一个通过徒手绘制草图及基于实例的编辑操作快速轻松地设计三维植物模型的系统。该系统允许用户使用基于手势的编辑操作来构建三维植物模型。Anastacio 等^[12]提出一种基于草图的利用参数来控制规则模型的构造方法, 可以利用 L 系统直观地说明和创建植物结构。



(a) 真实照片 (c) 复叶
图 1 真实月季植株模型

上述工作大多基于植物的物理或几何特征, 未考虑植物形态特征这一影响植物形态的最关键因素。本文则从月季形态特征出发, 将月季植株的模型构造定义树形生长结构, 以主枝为根结点, 各分级侧枝为各层子结点, 以其形态学数据为基础快速生成形态多样的单株月季和大规模月季场景。

就我们所知, 目前还没有单就月季进行大规模建模的算法研究。

2 月季植株表观形态学特征

月季(如图 1(a)所示)品类繁多, 形态各异, 但各类月季在形态特征上却均保持高度统一, 其植株

主要由茎、花、叶、刺、根等五部分组成。

月季的茎细长状, 上生有钩刺或无刺, 刺的疏密因品种而异, 着生位置呈随机排列规律。初生茎呈紫红色, 嫩茎呈绿色, 老茎呈灰褐色。

月季的花(图 1(b))生于茎顶, 多数花瓣层数在 4 到 6 层之间, 每层花瓣数约为 5 片。景观植株花卉, 按照花瓣与花萼或其裂片在花芽中的排列方式可大致分为 3 种(如图 2 所示): (a)镊合状: 花瓣或萼片各片的边缘彼此相接触, 但不覆盖; (b)旋转状: 花瓣或萼片每一片的一边既覆盖着相邻片的边缘, 另一边又被另一相邻片的边缘所覆盖; (c)复瓦状: 与旋转状类似, 区别在于各片中有一片或两片完全在外, 另一片完全在内。月季花瓣排列属于复瓦状^[13]。月季花色彩艳丽而丰富, 不仅有红、粉黄、白等单色, 还有混色、银边等品种^[14]。



图 2 常见花瓣排列方式

月季的叶为互生的奇数羽状复叶(如图 1(c)所示), 总叶柄长 10~15 cm, 通常具有 3, 5, 7 枚小叶, 分别称为三出、五出、七出复叶。每片小叶呈卵或长圆形, 叶缘有锯齿, 两面均无毛, 多数品种初展叶时为紫红色, 后逐渐变绿。

月季的根生长于地下, 通常情况下不易被人们所见, 故不作为我们的建模对象。

3 基于形态特征月季静态模型仿真

3.1 植株形态学数据的获取与分析

3.1.1 植株结构定义与形态学数据获取

按照月季的形态拓扑结构的特点, 我们采用分级的方式表示主枝、次枝、再次枝、.....的结构。本文以丰花月季为例, 对其进行单株建模与大规模场景仿真。如图 3(b)所示, 月季的层次结构分别表示为主枝 M 、1 级分枝 D_1 和 D_2 、2 级分枝等, 各

自根结点分别为 R_0, R_1, R_2 。定义枝长度(又称株高) L 为茎根部至茎顶端的长度, 将枝曲线离散成 5 截圆柱, 定义每截圆柱称为一个茎单元, 设茎单元长为 l_i , 半径为 r_i , 其中 $i=1, 2, 3, 4, 5$, 如图 3(c)所示。那么, 主枝 M 的长度可以表示为 H , 其大小即为主枝曲线 R_0A_5 的长度。如图 3(c)所示, 在一个茎单元的局部坐标系($o'x_1y_1z_1$)中, 定义茎单元偏移角 α 为圆柱中轴线与 y_1 轴正方向的夹角, 定义旋转角 β 为茎单元在 $x_1o'z_1$ 平面内的投影与 x_1 轴

正方向的夹角, 如果 α 与 β 的值已知, 那么茎单元空间位置即可确定。如图 3(b)所示, 设 D_1 与其相邻分枝 D_2 在 $x_0o'z_0$ 平面内的投影 d_1, d_2 的夹角为 θ (规定逆时针方向为正方向), 其外角用 γ 表示(即 $\theta+\gamma=2\pi$)。定义着生点百分比为 P , 以 D_1 为例, D_1 在 M 上的着生点百分比 P_0 的含义是 $P_0= R_0R_1/R_0A_5$, 其中 R_0R_1 为 D_1 在 M 上的生长位置 R_1 与 M 根结点间曲线长度, 以此可以确定 R_1 所在 M 上的茎单元序号 i_{th} 。

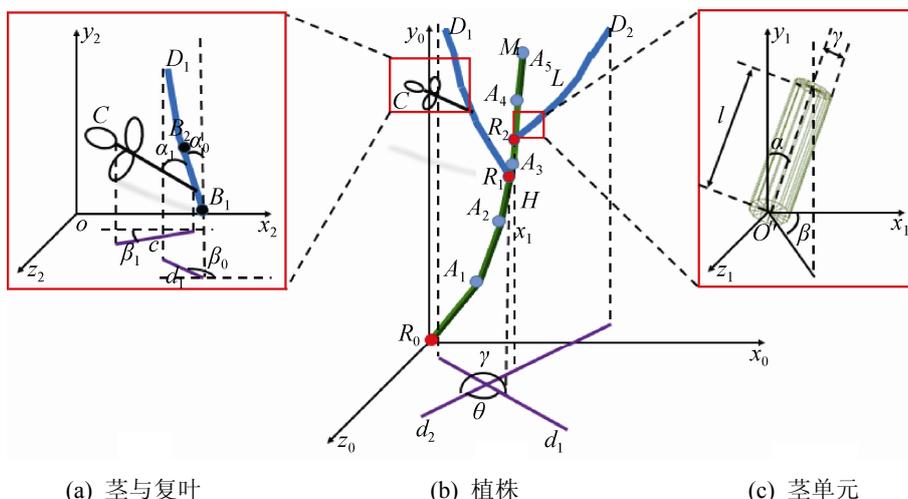


图 3 植株结构示意图

如图 1(c)所示, 定义复叶中各小叶的叶长 h 、叶宽 w , 并定义每组复叶样本的平均叶长为 w_0 、平均叶宽为 h_0 。如图 4 所示, 定义花的花瓣层数 i 及各层花瓣数 T 、花开直径 F 、各层花瓣与花心的距离 S_i , 该层花瓣的高度 p_i (其中 i 为花瓣序号)。

在实际执行中, 选取十株盛花期月季作为样本, 对上述影响单株形态的关键性器官进行观察与测量。表 1 为某单株月季样本(记为 S)的茎数据。

从表 1 的数据结果可以看出, 样本 S 的株高 H 为 $78cm$, 分枝级数 D 为 2。同时也记录了各级分枝的长度 L 、偏移角 α 、旋转角 β 。由附件文件二可以得到单株月季的叶数据测量结果, 该数据按照复叶的幼、中、老三个不同生长期分别进行统计, 每个生长期内分别选取三组复叶, 使用游标卡尺分别测量这三组复叶中各小叶的叶长 h 、叶宽 w 。同时, 分别统计样本中三出复叶、五出复叶和七出复

叶的数量。由附件文件三可以得到单株月季花朵相关数据, 记录花朵各自的花瓣层数及各层花瓣数、花开直径、各层花瓣与花心的距离 s 、所属的茎级别和长度 L (如图 3(b))。

表 1 单株月季样本的茎相关数据

样本序号		1					
分枝序号		1	2	3	4	5	6
分枝级别							
株高 $H(cm)$		78					
分枝级数 D		2					
一 级 分 枝	长度 $L(cm)$	26	40	33			
	偏移角 $\alpha(度)$	57	63	66			
	旋转角 $\beta(度)$	13	14	13			
二 级 分 枝	长度 $L(cm)$	5	1	8			
	长度 $L(cm)$	23	18	31	15	27	
	偏移角 $\alpha(度)$	53	63	47	59	63	
分 枝	旋转角 $\beta(度)$	13	13	14	12	10	
	长度 $L(cm)$	0	9	5	1	8	
	上级分枝序号	2	1	2	2	3	

在实际执行中，茎单元采用 16 棱柱来表示，整个茎由这些茎单元圆柱对应顶点顺次连接得到。

3.1.2 单株月季形态学数据分析与归纳

我们对获得单株月季各主要器官的数据进行系统化分析和归纳，以便分析其结构形态所具有的特征。

茎的形态和分布是月季植株整体布局的基础，首先按照表 1 及附件文件中数据对茎的特征进行分析。根据数据可以看出，丰花月季株高 H 在 [50cm,70cm] 范围内，分枝等级 D 有 1 与 2 两种可能值，着生点百分比 P 处于区间 [0.2, 0.6]，分枝偏移角 α 在 $[5\pi/36, 7\pi/36]$ 范围内。定义相邻分枝投影角 θ 与其外角 γ 的比值为 k ，即

$$k = \frac{\theta}{\gamma} = \frac{\theta}{2\pi - \theta} \quad (1)$$

图 4 分别显示了 3 个样本比例参数 k 的走势曲线，定义误差 $\delta = k - 0.618$ ，最大误差系数 $\varepsilon (> 0)$ ，其中 0.618 为黄金分割点；当误差 $|\delta| \leq \varepsilon$ 时，我们认为 k 满足黄金分割特性；反之，当 $|\delta| > \varepsilon$ 则称这样的点为奇异点。实际计算中，我们取 $\varepsilon = 0.05$ ，通过计算 δ 我们发现这 3 条曲线除了极少数点(如点 Q)偏离黄金分割点 0.618 较远外，其他均分布于黄金分割点附近。鉴于奇异点数目非常少，并且不至于影响 k 值的总体分布规律，所以在分析 k 的总体走势曲线时，我们忽略掉奇异点。对于不同样本间存在个体差异性，在拟合 k 的总体走势曲线时，通过随机加入 $< \varepsilon$ 值的扰动来拟合误差 $|\delta|$ ，最终拟合参数 k 的变化曲线。对于奇异点情况，我们可以允许有 1~2 个扰动的值大于 ε 来实现。

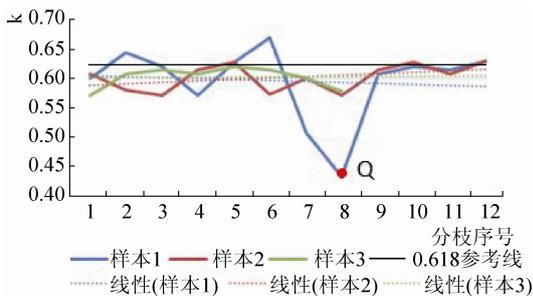


图 4 数据 k 走势图

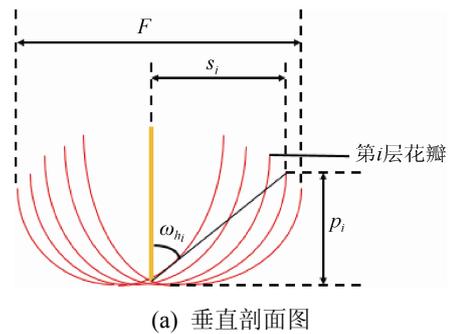
月季的茎半径非是均一大小，一般情况下随着其长度的增加而变化。根据经验，定义半径增量 ΔR 如式(2):

$$\Delta R = -i \times R_0^{i+1} \quad (2)$$

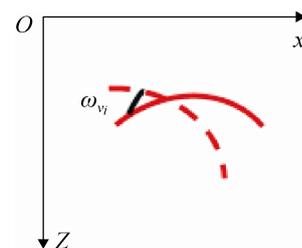
其中 R_0 为初始半径， i 为茎单元序号， $i \in \{1, 2, 3, 4\}$ 。

叶的形态和分布是月季植株空间表现结构之一。通过附件文件二的数据统计得出，五出复叶约占复叶总数的 54%，三出复叶、七出复叶共约占 46%，五出复叶数目约占总数的一半，为月季主要的复叶类型。单株月季中期小叶平均叶长 $h_0 \in [2.5\text{cm}, 6\text{cm}]$ ，平均叶宽 $w_0 \in [1.5\text{cm}, 3.5\text{cm}]$ ，定义叶宽 w 与叶长 h 的比值为 q ，我们同样发现 q 大致接近于黄金分割点 0.618。我们按照相同原理得知夹角 θ' 同样也是大致符合黄金分割特性。

花的形态与分布是月季的重要表现结构之一。月季花瓣按照复瓦状几何分布模型排列，花瓣几何结构复杂，与花中轴的夹角测量实际操作的难度较大，故本文采用一种近似方法。我们根据各层花瓣距花心的距离 s 与该层花瓣的高度 p ，利用勾股定理，得到第 i 层花瓣的开放角度 ω_{hi} (如图 5(a)所示)。根据文献[5]方法，定义处于花蕾期月季花呈竖直的椭球型，且其长短轴比例接近黄金分割。



(a) 垂直剖面图



(b) 单花瓣俯视图

图 5 花结构示意图

数据分析显示绕茎旋转生长的刺较为密集, 且并未呈现出明显分布规律, 故采用随机分布模拟。

3.2 基于形态特征的单株月季的静态模型构造

由上述数据分析可以看出, 月季的茎、叶等主要器官在某些参数上表现出近似的黄金分割特性以及刺结构的随机性特性等, 为月季模型的构建提供了形态学基础。依据上述这些特性, 本文提出一种权重生长点算法来构造单株月季植株骨架, 并最终实现花、叶等各主要器官的构建。

3.2.1 权重生长点算法

如第 2.2.1 节所述, 数据结果显示单株月季植株各分枝生长位置具有一定的随机性, 且多数分枝着生点百分比 P 处于区间 $[0.2, 0.6]$ 内。为此, 我们引入生长点权重的概念, 定义某一茎单元所对应的权重为 W_i , 其中 i 为茎单元序号。例如图 3(b) 中茎单元 A_3A_4 的权重为 W_4 。而后, 我们根据随机分布原理, 由系统产生一定范围内随机数 N , 并据此计算下一级茎的着生点所在的父级茎单元的序号 i , 并获取其坐标。命名此算法为权重生长点算法。

以图 3(b) 为例, 设茎 M 的 5 个茎单元 $R_0A_1, A_1A_2, A_2A_3, A_3A_4, A_4A_5$ 的权重依次为 $W_i (i=1, 2, 3, 4, 5)$, 且满足 $\sum_{i=1}^5 W_i = 100$ 。由系统产生一个 $[0, 100]$ 范围内的随机数 N_0 , 记 $N_1 = W_0 - N_0$, 依次循环, 即 $N_i = W_i - N_{i-1}$, 直至 $N_i \leq 0$, 此时的 i 即为 1 级分枝 D_2 的生长点 R_2 所在的茎单元序号 i 。之后对该序号 i 所对应的茎单元 A_3A_4 上下底面中心点坐标 A_4 和 A_3 进行线性插值即得到枝 D_2 生长点的坐标 R_2 , 表示为公式(3)如下:

$$R_2 = (1 - P)A_3 + P'A_4 \tag{3}$$

其中 $P' = (N_i + W_i) / W_i$ 。根据上述算法可模拟符合分枝生长位置分布规律的月季各级茎的拓扑结构。

3.2.2 茎的构造

如图 2(b) 所示, 设主枝 M 第一截茎单元 R_0A_1 的底面中心点 R_0 初值为坐标系原点, 底面半径 r_0

为 0.8, 偏移角 α_0 取值在区间 $[\pi/72, \pi/24]$ 内, 旋转角 β_0 在 $[-\pi/72, \pi/72]$ 内, 茎单元长 $l=L/5$ 。定义各茎单元连接点坐标 $A_i (i=1,2,3,4)$ 递推公式为式(4):

$$A_i = A_{i-1} + \Delta A \tag{4}$$

其中: $\Delta A = l \times [\sin \alpha_{i-1} \times \cos \beta_{i-1}, \cos \beta_{i-1}, \sin \alpha_{i-1} \times \sin \beta_{i-1}]'$ 。

茎单元半径 r_i 可由式(2)得到。根据茎半径数值与茎单元的链接关系, 可以很容易地计算得到单株月季三维几何模型。

3.2.3 叶的构造

月季的叶可以用一个曲面来模拟, 本文采用双三次贝塞尔(Bezier)曲面构造小叶几何模型。给定三维空间的 $(m+1) \times (n+1)$ 个控制点 $\{P_{i,j}\}_{i,j=0}^{m,n}$ 所形成的 $m \times n$ 次 Bezier 曲面方程表示为式(5):

$$P(u, v) = \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n P_{ij} B_{i,m}(u) B_{j,n}(v), (u, v) \in [0, 1] \times [0, 1] \tag{5}$$

其中: P_{ij} 为 $P(u, v)$ 的控制顶点, 通过调整这些控制顶点的坐标就可以得到叶的平滑曲面。

对小叶建模时, 如图 6 所示, 首先选取处于不同生长期的真实月季小叶, 以主叶脉长度(即 V 方向)为基准将整个叶片的长度横向(即 U 方向)切分为 4 等份, 从而得到 4 条控制曲线 $L_i (i=0, 1, 2, 3)$, 其中 L_0 和 L_3 控制小叶叶尖及叶底的形态, L_1 和 L_2 控制小叶的空间弯曲程度, 其中, 每条控制曲线用 4 个控制点 $P_{i,j} (j=0, 1, 2, 3)$ 来操纵。

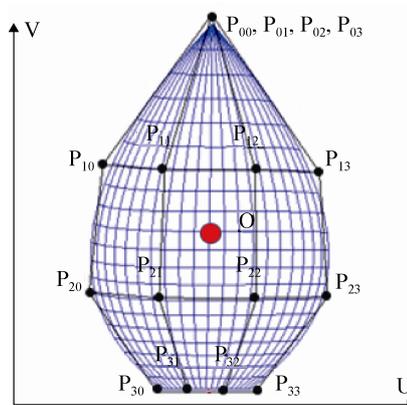


图 6 小叶 Bezier 曲面示意图

现实世界中，复叶与茎的夹角总是锐角或直角，这说明复叶的空间位置与其所属茎的空间位置是相关的，换言之，复叶的偏移角和旋转角与其所属茎的偏移角、旋转角存在一定的数量关系。如图 3(a)所示，复叶 C 着生在茎 D_1 的茎单元 B_1B_2 上，则根据茎单元 B_1B_2 的偏移角 α_0 与旋转角 β_0 可计算出总叶柄偏移角 α_1 (公式(6))及旋转角 β_1 (公式(7)):

$$\alpha_1 = \arccos \theta(\cos(\pi/3) \times \cos \alpha_0) \quad (6)$$

$$\beta_1 = \arccos \theta(\cos \alpha_1 / \cos(\pi/3)) + \beta_0 \quad (7)$$

通过公式(6)和公式(7)，可以得到复叶的空间位置。除此以外，小叶的生长也遵循一定的自然生长规律。为保证同一复叶上的各小叶处在同一平面内，且叶尖的指向自然，设左侧小叶初始坐标为 N_L ，右侧小叶初始坐标为 N_R ，且绕 x 轴、 y 轴、 z 轴的旋转矩阵分别为 R_x ， R_y ， R_z ，则左侧小叶最终坐标 N_L' 和 N_R' 为如式(8)，

$$\begin{cases} N_L' = R_x \times R_y \times R_z \times N_L \\ N_R' = -R_x \times R_y \times R_z \times N_R \end{cases} \quad (8)$$

根据第 2.2.2 节中数据分析结果可知，五出复叶数目约占总数的一半。最终，我们在设计复叶在茎上的分布时，根据随机分布原理来控制五出复叶约占 50%的数目，其他三出、七出复叶数目约占另外 50%。

3.2.4 花的构造

与叶模型构造法类似，本文同样采用 4×4 共 16 个控制点的 Bezier 曲面对月季花瓣进行建模。

在构建花朵模型时，同一层花瓣通过 w_{vi} (如图 5(a))控制相邻花瓣间位置关系，不同层花瓣间通过 w_{hi} 控制花朵开放程度，即花直径 F 。根据文献[13]，同层相邻花瓣间存在着相互覆盖现象，可以用花瓣自身的纵向旋转角度 $w_{vi}^{[15]}$ 表示，如图 5(b)所示，实线表示第 i 层某花瓣仅旋转开放角度 w_{hi} 的位置，虚线表示在此基础上自身纵向旋转 w_{vi} 后的位置。根据经验，定义 w_{vi} 为等差数列 $w_{vi} = a_0 + d * i$ ，其中 $a_0 = \pi/72$ ， $d = -1$ ， i 为花瓣层数且 $i \in \{1, 2, 3, 4, 5\}$ 。

3.2.5 刺的构造

茎上的刺采用缩放的圆锥来模拟。在圆锥底面所在平面上，沿两个相互垂直的方向以不等的缩放比例对底面半径进行缩放，如图 7 所示。在实验过程中，两个方向上的缩放比控制在区间 $[0.2, 0.4]$ 内。

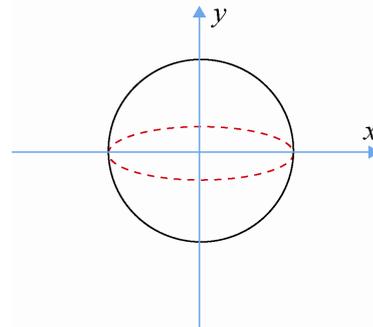


图 7 刺结构示意图

3.3 大规模月季场景的构建

现实中的月季通常是以成片的形态出现的。单植株模型是大规模月季场景构建的基础，本文借助于角匹配策略的 Poisson Disk Tile 方法^[16]来构建大规模月季场景，完成大量形态各异单植株模型在某种地形上的自然分布。

基于角匹配策略的 Poisson Disk Tiles 方法^[16]将 Wang Tile^[17]分成角区、边区、内区 3 个子区域(如图 8(a)所示)，而后采用基于 Relaxation Dark Throwing 算法^[17-18]的 Poisson Disk 分布方法依次约束生成角区、边区、内区各区域内部的 Poisson Disk 分布，最终生成整个样本块的分布信息。之后通过直接随机拼接方法^[17]以及哈希函数映射法快速拼接并合成大面积 Poisson Disk 分布信息，进而生成大规模月季分布数据。

现实中大规模分布的月季的分布密度是多边的。本文采用^[16]中的分离策略来生成多密度样本集，如图 8(b)所示。获得了多种密度的样本集后，采用前述的直接随机拼铺方法生成最终的大规模不同密度月季分布数据。

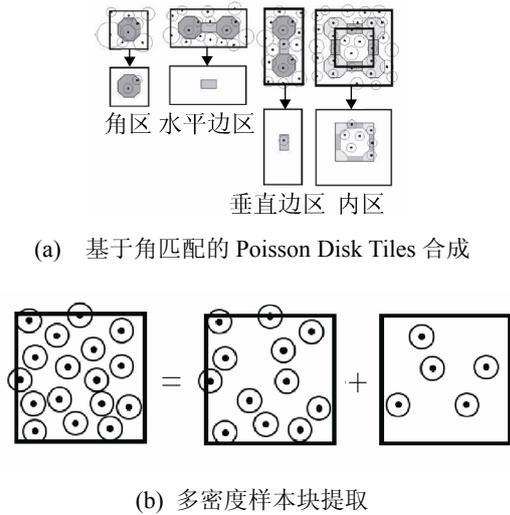


图 8 大规模月季建模算法

4 实验结果及分析

本文系统运行于在配置条件为第三代酷睿

i5-3317U@1.70GHz CPU, 6G 内存的 PC 机上。植株各器官模拟结果如图 9 所示, (a)(c)(e)分别为茎、叶、花的网格(Mesh)结构图, (b)(d)(f)分别为贴纹理后的效果图。月季植株绘制效果图如图 10 所示, 其中(a)(b)(c)为单株绘制效果, (d)为大规模植株绘制效果。图 10(a)的建模参数为株高 $H=55cm$, 茎级数 $D=0$; 图 10 (b)的建模参数为株高 $H=58cm$, 茎级数 $D=1$, 1 级枝数量为 3; 图 10 (c)的建模参数为株高 $H=60cm$, 茎级数 $D=2$, 1 级枝数量为 3, 2 级枝数量为 4, 相应模型的顶点和面片数见表 4, 图 10 (d)的植株数量为 25。图 11 显示为绘制后的大场景月季结果。图 12 为不同密度分布大规模月季场景效果图。

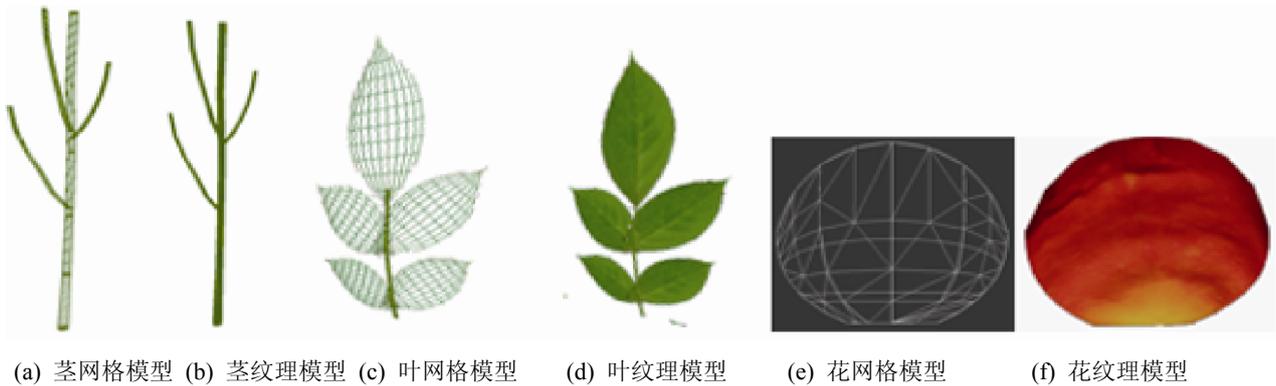


图 9 植株各器官模拟结果图

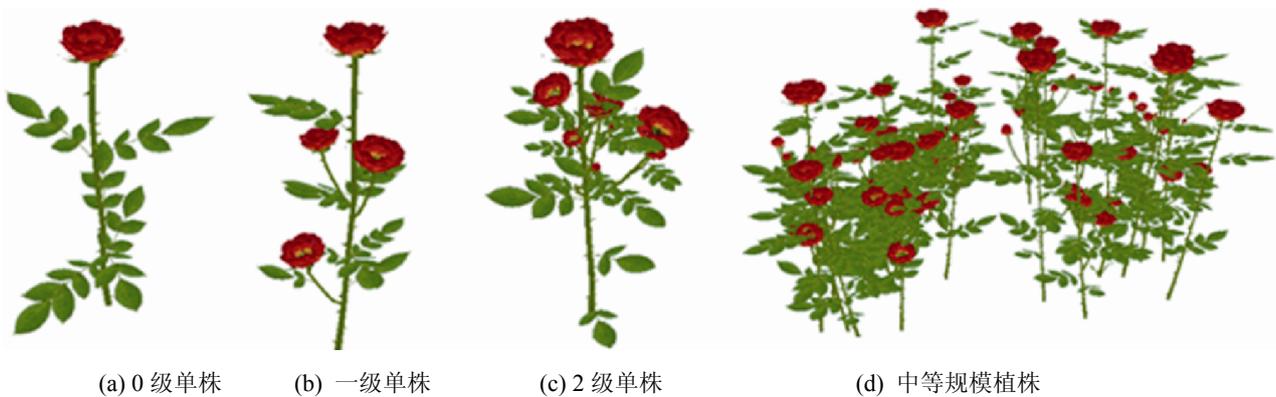


图 10 月季植株绘制效果图



图 11 中等规模月季绘制效果图



图 12 大场景月季绘制效果图

5 结论

本文在对月季形态学特性进行系统分析的基础上,提出一种基于形态特征的月季植株快速建模算法。该算法从以黄金分割点为代表的形态学特性出发,高真实感地模拟了月季的茎、花、叶、刺等形态器官,同时在单一植株的绘制基础上实现了大规模植株的建模与绘制。适用于园林场景中单株月季三维建模和大规模景观性月季场景的构建。值得强调的是,虽然本文以月季建模为例讲解单株与大规模植物建模算法,但是该算法适合所有形态特征具有一定规律的植物。月季花瓣随着季节时变模拟是未来工作。

参考文献:

- [1] 李忠东. 自然界神奇的黄金分割率 [J]. 小学生之友·智力探索版(中旬), 2010, 5(3): 8-9.
- [2] 迟小羽, 盛斌, 杨猛, 等. 秋季植物叶子表观的模拟 [J]. 软件学报, 2009, 20(3): 702-712.
- [3] 陈仁政. 生物与黄金分割 [J]. 科学世界, 1994 (11): 35.

- [4] 龚林霞. 自然界的黄金分割 [J]. 良师, 2002 (Z2): 79.
- [5] 吴月梅. 植物中的黄金分割 [J]. 科学大众(中学版), 2008 (5): 21-22.
- [6] 宋成芳. 动态植物场景的建模与仿真研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
- [7] de Reffye P, Edelin C, Françon J, *et al.* Plant models faithful to botanical structure and development [C]// ACM SIGGRAPH Computer Graphics. USA: ACM, 1988, 22(4): 151-158.
- [8] Oppenheimer P E. Real time design and animation of fractal plants and trees [C]// ACM SIGGRAPH Computer Graphics. USA: ACM, 1986, 20(4): 55-64.
- [9] Neubert B, Franken T, Deussen O. Approximate image-based tree-modeling using particle flows [C]// ACM Transactions on Graphics (TOG). USA: ACM, 2007, 26(3): 88.
- [10] Tan P, Zeng G, Wang J, *et al.* Image-based tree modeling [J]. ACM Transactions on Graphics (TOG)(S0730-0301), 2007, 26(3): 87-92.
- [11] Okabe M, Owada S, Igarash T. Interactive Design of Botanical Trees using Freehand Sketches and Example-based diting [C]// Computer Graphics Forum. USA: Blackwell Publishing, Inc, 2005, 24(3): 487-496.
- [12] Anastacio F, Prusinkiewicz P, Sousa M C. Sketch-based parameterization of l-systems using illustration-inspired construction lines [C]// Proceedings of the Fifth Eurographics Workshop on Sketch-Based Interfaces and Modeling. Annecy, France: The Eurographics Association, 2008: 119-126.
- [13] 曾兰玲. 树木花卉形态建模研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2009.
- [14] 佚名. 月季_百度百科 [EB/OL]. (2014-04-30) [2014-04-30]. <http://baike.baidu.com/subview/4272/8040606.htm?fr=aladdin>.
- [15] 曾茜. 花卉植物形态与生长可视化仿真研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2011.
- [16] 林琳, 杨刚, 杨猛. 拼铺法快速合成大规模植物分布 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2015, 27(2): 337-343.
- [17] Lagae A, Dutré P. An alternative for Wang tiles: colored edges versus colored corners [J]. ACM Transactions on Graphics (S0730-0301), 2006, 25(4): 1442-1459.
- [18] McCool M, Fiume E. Hierarchical Poisson disk sampling distributions [C]// Proceedings of the Conference on Graphics Interface. San Francisco, USA: Morgan Kaufmann, 1992: 94-105.