

# 兰花开花过程三维模拟系统研究

许艳凰<sup>1</sup>, 姚俊峰<sup>2</sup>, 杨宝容<sup>2</sup>, 王其棣<sup>1</sup>, 孙玉珍<sup>1</sup>

(1.漳州城市职业学院, 福建 漳州 363000; 2.厦门大学软件学院, 福建 厦门 361005)

**摘要:** 我国的国花——兰花类属繁多, 形态各异, 目前尚未有人对其进行花开仿真研究。通过研究兰花植物学知识, 以几种不同形态特征的兰花为虚拟建模对象, 分析其器官形态特点, 提出基于器官模型库的带随机值参数变换算法, 建立器官模型库, 并通过适当的变换, 得到形态各异的兰花器官, 根据兰花生长规律, 采用不同的分段参数控制各器官生长, 通过项目实践, 证明了此方法能逼真地模拟兰花动态生长。同时加入了良好的交互功能, 使用户能体验兰花的不同形态及在不同场景中摆放的效果。系统对 7 种兰花进行了模拟, 在展会中通过该系统, 销售额增加了 10%。

**关键词:** 兰花; 生长模拟; 虚拟现实; 展示系统

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2015) 10-2546-08

DOI:10.16182/j.cnki.joss.2015.10.047

## Research on Simulation System of 3D Orchid Flower Blossoming Process

Xu Yanhuang<sup>1</sup>, Yao Junfeng<sup>2</sup>, Yang Baorong<sup>2</sup>, Wang Qidi<sup>1</sup>, Sun Yuzhen<sup>1</sup>

(1. Zhangzhou City College, Zhangzhou 363000, China; 2. Software School of Xiamen University, Xiamen 361005, China)

**Abstract:** As the national flower of China, orchid has various kinds of types and shapes, and its bloom process has never been simulated before. A model library of orchid organs was established and a transformation algorithm with random-valued parameters was proposed based on the model library of orchid organs by studying botanical knowledge of orchids and taking orchids with different morphological characteristics as research subjects for virtual modeling. Different segmental transformations were respectively performed on each organ of orchids to simulate growth of the organs according to the growth law of orchids. Different examples for simulating different type of orchids were provided to illustrate the realistic of dynamic growth of orchid by using the transformation algorithm. Meanwhile, the positive user interactive function of the simulation system enabled users to experience different orchids in different scenarios. Seven species of orchids were simulated in the system, and sales volume of orchids increased by 10% at the exhibition by using the system.

**Keywords:** orchids; growth simulation; virtual reality; display system

## 引言

兰花是我国十大传统名花之一, 自古受到国人的喜爱, 如今也逐渐走向世界。特别是南方的花博

会, 兰花的销售更占了绝大部分。展会中主要以实物花卉进行展示, 人们无法全程观赏兰花的生长及花开过程, 通过兰花开花过程三维模拟系统的开发可弥补这一缺憾, 填补展会中没有电子交互平台的空白, 这正是当前所迫切需要的, 可使虚拟现实技术在实际中得到应用, 提高展会的成交率。在虚拟植物方面, 作物生长模拟研究创立于 20 世纪 60 年代<sup>[1]</sup>, 国内外研究得较多的是仿真植物的形态拓扑<sup>[2-3]</sup>、生长模型<sup>[4-5]</sup>及生长过程, 从植物类型来说



收稿日期: 2015-06-08 修回日期: 2015-07-24;  
基金项目: 福建省中青年骨干教师教育科研项目 (JB14210); 福建省科技重大专项 (2013HZ0004-1);  
作者简介: 许艳凰(1982-), 女, 福建泉州, 硕士, 讲师, 研究方向为计算机图形学, 虚拟现实技术; 姚俊峰(通讯作者 1973-), 男, 山西代县, 博导, 教授, 研究方向为计算机图形学, 虚拟现实技术。

<http://www.china-simulation.com>

• 2546 •

树木<sup>[4,6-7]</sup>及经济作物<sup>[3,5,8-10]</sup>研究较为广泛。欧洲和美国等一些国家率先对观赏植物生长模拟模型进行了研究,随后瑞典、荷兰、美国、以色列和日本等国家对于观赏植物生长模拟也进行了研究,涉及的观赏植物主要有菊花、月季、水仙、百合、一品红等<sup>[1]</sup>。而我国花卉的仿真研究尚且薄弱,主要是花瓣较为规则的荷花<sup>[11-13]</sup>、梅花<sup>[7]</sup>、苹果花<sup>[14]</sup>、郁金香、石竹、茉莉花<sup>[15-16]</sup>等。对于兰花类的花开过程,由于其花型的不规则性,国内外目前尚无人研究,故该研究具有一定的创新意义。此研究成果主要运用于展会中与用户的交互展示,亦可应用于植物学研究、农业生产、园艺展示、植物教学交互方面。

## 1 系统设计

本系统将利用虚拟现实技术<sup>[17]</sup>实现一个与用户交互<sup>[18]</sup>良好的三维兰花花开展示系统。为实现用户与系统展示区各部分的交互,将展示区所展示的各部分进行归类,设计相应的控制函数,并通过系统主程序对各部分模块进行调用。可将系统功能划分为如图 1 所示的 5 个功能模块:

- 1、绘制前的准备工作模块,包括为减少用户等待时的烦躁感而设计的兰花诗词 Loading 界面。
- 2、界面框架的绘制模块,绘制界面和各种按钮、菜单。
- 3、场景绘制模块,即默认的兰花摆放场景。
- 4、兰花的绘制模块,这是本系统研究的最主要部分:该模块包含不同的兰花花朵的绘制模块,花轴的绘制模块,叶片的绘制模块,花盆绘制模块。将兰花各部分器官根据植物学知识进行分类,建立相应的模型,根据用户选择的兰花类型,调用该兰花各器官模型,并做适当的变换及纹理贴图,最终完成兰花的绘制工作。此外,还需要在各部分加入生长控制参数以模拟兰花各器官的生长顺序与生长特点。
- 5、用户交互模块,包括鼠标、键盘和按钮的响应模块。实现视点的移动以及响应各种按钮事

件,包括更换花盆、叶艺、场景,视点的改变,音乐的控制和退出系统。

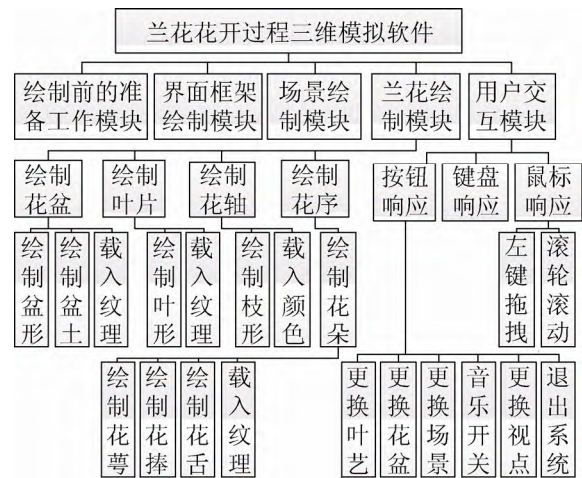


图 1 系统功能模块

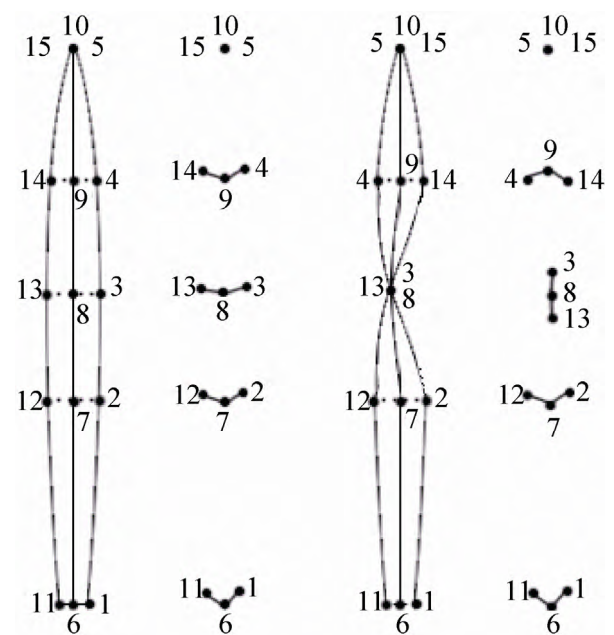
## 2 核心算法研究

在虚拟植物的形态模拟方面,植物弯曲的枝条、结构各异的花序、叶片和花瓣高度复杂的表面纹理特征信息等复杂植物器官的表现是一个永恒的优化课题。除此,还应考虑模型复杂度和场景渲染效率之间的均衡问题。通过研究兰花的植物学知识,将兰花的不同器官进行分类研究,提出基于器官模型库的参数变换算法构建模型。再根据兰花生长的生理过程进行可视化模拟研究。

### 2.1 叶形模拟

兰花的叶片多为带状或线形,上下几乎等宽,叶基部稍窄,叶先端渐尖,没有明显的叶柄。叶脉是平行脉,叶面横切面略呈“v”形。兰叶在生长过程中有立叶、半立叶、旋转叶、垂叶、半垂叶等多种不同的姿态。单片叶片不同部分的曲率不同,发生弯曲或旋转的部位常在中上部。对于兰叶的特点,可将其进行分段,再通过贝塞尔曲面来描述,可用 15 个点来描述兰花的叶片信息,其中点 5, 10, 15 的坐标应一致。权衡复用性与仿真性,最终决定使用两个模型来对叶姿进行模拟描述。其中一个作为兰花叶片的常态,通过加入一个参数对叶

姿形态进行调节以呈现叶子的立到垂卷的形态,如图 2(a)为兰花叶片常态的曲面控制顶点示意图,图 2(b)为对应顶点处垂直于叶片中轴的剖面图。而对于旋转叶的叶姿,由于其较为特殊,不能单靠垂直面的参数进行简单调节,而需要引入水平及纵深面上的控制参数,可见通过参数控制会较为麻烦,故新引入一个模型来进行描述,如图 2(c)为旋转叶的曲面控制顶点示意图,图 2(d)为对应顶点处垂直于叶片中轴的剖面图。调用时,只进行位置及大小的参数控制,以达到复用的目的。



(a) 兰叶常态曲面控制顶点示意图 (b) 兰叶常态曲面剖面图 (c) 旋转叶曲面控制顶点示意图 (d) 旋转叶曲面剖面图

图 2 叶片分段描述点

## 2.2 花朵模拟

兰花花朵由花萼、花瓣、蕊柱构成。单个花萼及花瓣可分别用一个贝塞尔曲面来描述,通过花萼、花瓣的不同瓣型特点,抽取特征描述点建立矩阵,如以典型的荷瓣花春兰为例,可建立 20 个特征点的坐标矩阵  $p1[4][5][3]$ ,而建兰的花瓣则需要 35 个特征点的矩阵  $p[7][5][3]$ 才能完美的描述。如图 3 兰花花朵结构分布模型图所示,多数兰花的三片萼片形状自相同,可根据植物学中兰花的副瓣生

长形态的不同,在系统中将萼片进行旋转一定角度  $r1$  得到相应形态的三片兰花萼片。生长于萼片内侧的两片花瓣也是用此方法,即旋转角度  $r2$  得到。多数兰花在中央下方的唇瓣(舌),都呈向下反转状,并在下部有向内卷曲的形态出现,同时,有凹凸质感,呈现绚丽的图案。因而,只能采用基于图像的建模方式,在三维软件中绘制,然后抽取特征描述点,再用这些点坐标转换成矩阵,从而建立模型。最中间部分的蕊柱(鼻)呈圆柱状,生长于唇瓣上方,可用圆柱函数进行变形得到。

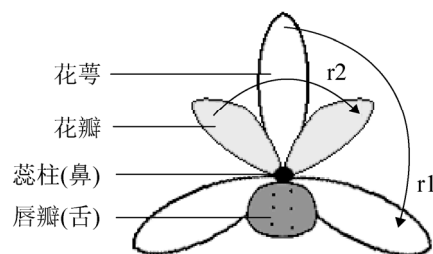


图 3 兰花花朵结构分布模型图

## 2.3 花开过程模拟

仅对于兰花花朵来讲,花瓣在停止增加其长度,并已达到最大厚度时,花的开放就会发生。兰花在开放时发生的变化大致有:花萼及花瓣与花的中轴的倾角随着花的开放而变大;花萼及花瓣的长度和宽度也在花开过程中变大,但变宽的程度小于或等于变长的程度;花萼及花瓣自身的弯曲程度随兰花的开放而变小,但变化的程度不大。以上变化中最明显最需要体现的变化就是花萼及花瓣与花的中轴的倾角随着花开放而变大,这是花开放最明显的视觉特征,且该变化并不是一个线性过程,植物学资料中提出,花瓣的倾角前期先以较快速度变大,一段时间后,增大的速度会减慢。如图 4 所示,设定一个变量  $g$  表示倾角的大小,  $angle$  表示最大倾角,最大倾角值根据不同的兰花花瓣而不同。那么  $g$  先是快速增大,而后又慢速增大,最后停止增大。所以设置一个变量  $dg$  用于控制倾角的变化加

速度, *state* 作为生长状态标志, 开始为 true。根据这一特性可用以下算法得到:

- Step1: 设定 *g* 开始为最小的倾角值  $0+\text{rand}()\%2$ ;
- Step2: 设定 *angle* 为最大的倾角值  $+\text{rand}()\%5$ ;
- Step3: 设定倾角变化加速度 *dg* 初值;
- Step4:  $\text{if}(g < \text{angle}/2) \quad dg = dg + 0.01$ ;  
           $\text{else } dg = dg - 0.01$ ;
- Step5:  $\text{if}(dg < 0.05) \quad dg = 0.05$ ;
- Step6:  $g += dg$ ;
- Step7:  $\text{if}(g \leq \text{angle})$  执行 Step4;
- Step8:  $\text{if}(g > \text{angle}) \{ g = \text{angle}; \text{state} = \text{false}; \}$

其中, *g* 和 *angle* 加入了随机值, 这样可以保证每个花萼及花瓣都各不相同。

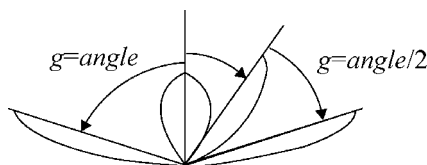


图 4 兰花花瓣与中轴的倾角变化图

在花开过程中, 花瓣的长度和宽度变化以及花瓣的自身弯曲度变化都不是很明显, 程度远低于这个倾角的变化, 可以直接用线性方程表示。例如花萼及花瓣长度 *l* 的变化可以用数学模型描述如公式(1)所示:

$$l = l + \Delta l \tag{1}$$

其中  $\Delta l$  为一常量。还需要根据不同兰花的特点限定 *l* 的最大值, 当 *l* 达到最大值时, *l* 不再发生变化。

另外, 虽然花朵在花轴生长初期已经分生, 但此时由于花未开放且体积极小, 除外部三片花萼可见外, 内部的器官都不可见。为提高效率, 在花朵未开放前, 可只绘制萼片, 直到花开的时刻才绘制花棒、唇瓣和蕊柱。因为花萼、花棒、唇瓣、蕊柱的生长并非同时进行的, 所以在程序中应设定其生长状态参数进行分别控制, 根据其生长的范围判断是否达到最大值, 若达到最大值, 则将生长状态的标志 *state* 置为 false, 从而让其停止生长。

## 2.4 植株生长模拟

根据植物学知识, 兰花在生长过程中, 先长叶后由假鳞茎抽生出花葶, 进而长成由花轴连接的花蕾直至开花。

兰叶的生长过程中生物物质积累应符合生态学的“S”形生长曲线, 即, 叶片数量增长速率及生长速度都具有先慢后快再变慢的特点, 且叶片在生长过程中宽度变化远小于长度变化。可定义一个绘制叶片慢速生长的函数 `void DrawLeafS(int n)`, 算法可用图 5(a) 表示, 实现绘制 *n* 片叶片, 其叶片长度变化速度为 *leafLS*、宽度变化速度为 *leafWS*, `DrawLeafS(int n)` 第一次被调用时,  $n=i$ , 第二次被调用时  $n=k$ ; 及一个绘制叶片快速生长的函数 `void DrawLeafQ(int a, int n)`, 算法可用图 5(b) 表示, 实现绘制  $(\text{int})a \times n$  片叶片, 其叶片长度变化速度为  $a \times \text{leafLS}$ 、宽度变化速度为  $a \times \text{leafWS}$ 。其中 *a* 为大于 1 的实数, *m* 为已绘制的叶片数, 第 *n* 片叶片长度为 *leafLn*, 宽度为 *leafWn*, 叶片最大长度为 *leafLMax*。

在兰叶生长速度趋于平缓的时候, 抽葶开花。在开花过程中叶片几乎不再生长。花轴的生长可由圆柱变形获得, 过程是变长、长粗。而花朵在花轴不再生长之前就已分生。所以在花轴快速生长期就应绘制出花朵, 如春兰等单生花只需画出花轴和花朵, 而大多数兰花属于簇生花, 则需要考虑花序的问题。随着花朵与花轴根部的距离的增大, 花朵的体积逐渐减小, 且花的间距也在减小, 因此, 每朵花都有一个缩放因子, 而花间距可通过等差数列加入随机数获得。在绘制花朵时, 第 *m* 朵花与花轴根部的距离  $|A0Am|$  可通过公式 2 获得:

$$\begin{aligned} |A0Am| = & (m-1) * |A1A2| - (m-1) * (m-2) / 2 * d + \\ & |A0A1| + \text{ram} \quad (1 \leq m < n) \end{aligned} \tag{2}$$

其中, 需设定该种兰花花朵总数 *n*, 花间距等差 *d*, 花轴总长度  $|A0An|$ , 最靠近花轴根部的一朵花与花轴根部的距离  $|A0A1|$ , 以及更真实模拟现实世界中存在的间距非真正等差而加入的随机因

子  $ram$ ，因为最后一朵花必须绘制在花轴最顶端，该位置是确定的，所以该随机数只在非花轴顶端的花朵位置计算中使用。而簇生花存在互生或轮生现象，所以还需沿着花轴进行旋转，第  $m$  朵花所旋

转的角度可表达为公式(3)：

$$rotm = rot1 + 360/k + ram(k \in \{2,3\}) \quad (3)$$

其中  $k$  为 2 表示花朵互生  $k$  为 3 表示花朵轮生。

如图 6 所示为花朵在花轴上的位置分布模型。

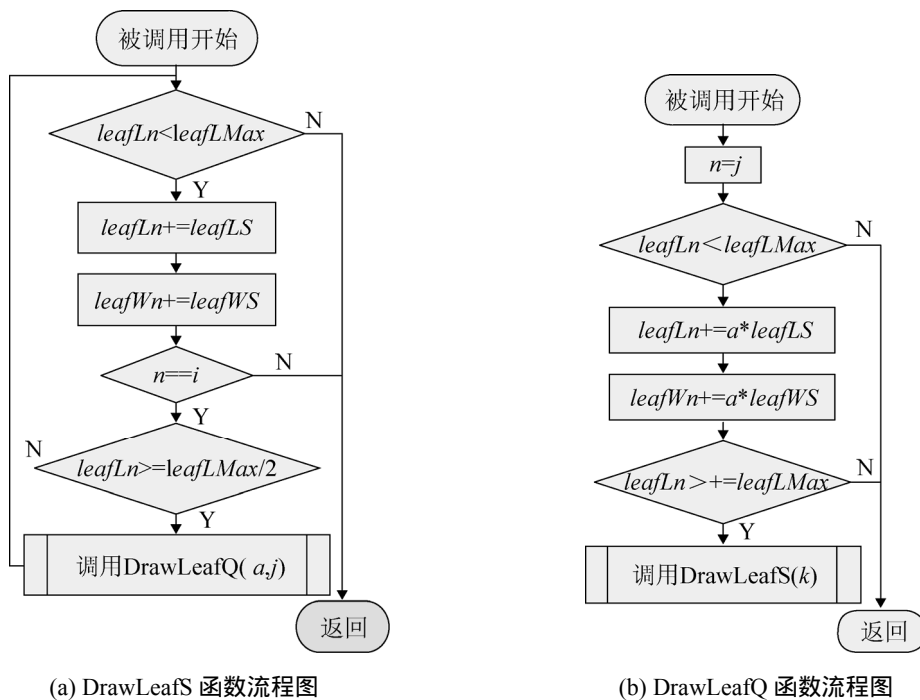


图 5 绘制叶片生长的函数流程图

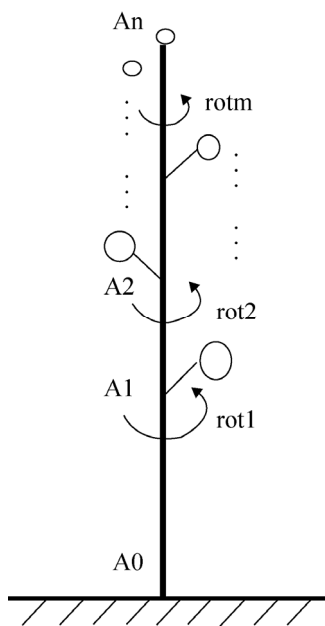


图 6 花朵在花轴上的位置分布模型图

### 3 系统实现

最终，使用 VC 结合 OpenGL<sup>[24-25]</sup>开发完成本系统，界面如图 7。系统实现了通过点击主界面下拉菜单中的一种兰花名，即可在中部的兰花展示区将该兰花的生长过程进行三维模拟展示，如图 8 为七种兰花花开的实现展示效果。系统中实现了用户对兰花展示的交互控制，包括，更换兰花的叶艺、花盆的样式，选用不同的兰花摆放场景，通过鼠标、键盘或视点更换按钮组、旋转视点按钮实现对兰花展示效果的任意角度的观察，还可更换系统风格。图 8(a)为更换成青花瓷花盆的缙艺春兰，图 8(b)为更改视点后的蕙兰花开展示，图 8(c)为更改视点后的寒兰花开展示，图 8(d)为更换了陶土花盆的斑艺建兰，图 8(e)为白色蝴蝶兰花开的实现，图 8(f)为导入现代家居场景并旋转视点后的紫色蝴蝶兰花开展示，图 8(g)为碎花蝴蝶兰花开的实现。

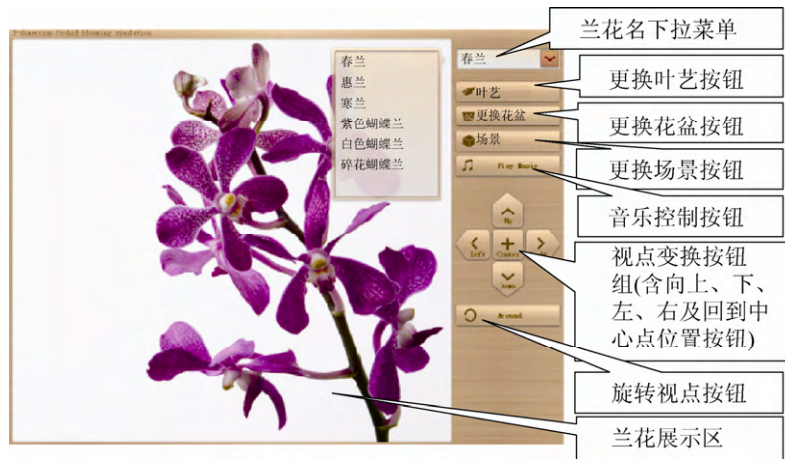
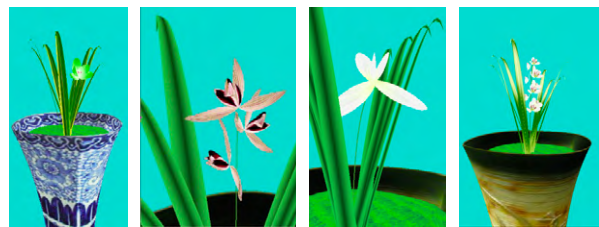
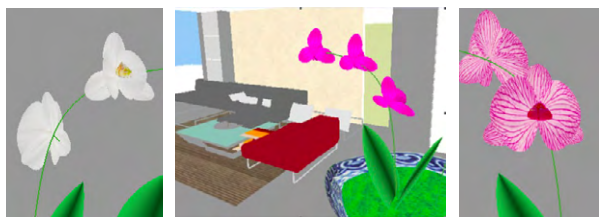


图 7 虚拟现实三维兰花花开系统主界面图



(a) 缟艺春兰 (b) 蕙兰 (c) 寒兰 (d) 斑艺建兰



(e) 白色蝴蝶兰 (f) 在现代家居场景中展示紫色蝴蝶兰 (g) 碎花蝴蝶兰

图 8 七种兰花花开的实现图

## 4 应用结果分析

通过虚拟现实三维兰花花开系统的开发实现, 模拟了 7 种不同的现实世界中的兰花, 能将其生长、开花过程进行真实的展示。如图 9-10 分别展示了以春兰和蝴蝶兰为代表的系统中的单花和多花的开放过程。通过花萼、花瓣的曲度变化及长度、宽度的变化, 可较真实的模拟兰花的开放过程。图 11 分别为绘制的碎花蝴蝶兰、春兰、白色蝴蝶兰、寒兰、蕙兰、建兰与对应的现实中的兰花的对比, 可见系统能模拟现实中兰花花朵在花轴上的大小、旋转角度及开放顺序, 通过对比图可见系统能较真实的绘制出现实中的兰花。

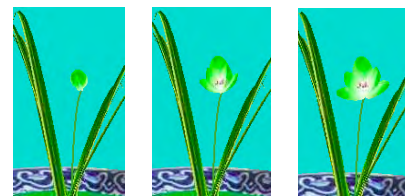
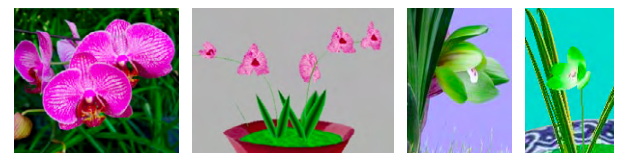


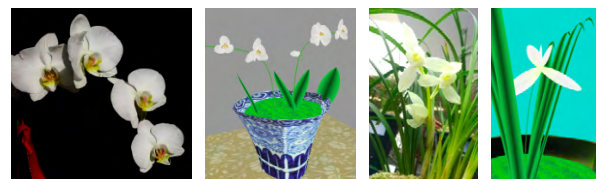
图 9 以春兰为代表的单花兰花花开过程示意图



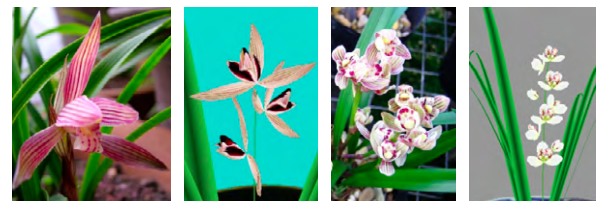
图 10 以蝴蝶兰为代表的多花兰花花开过程示意图



(a) 碎花蝴蝶兰 (b) 春兰



(c) 白色蝴蝶兰 (d) 寒兰



(e) 蕙兰 (f) 建兰

图 11 几种兰花绘制效果对比图

相较国内外其他的模拟花卉开放的效果而言,更具真实感,而且,对于兰花的花开模拟系统尚且无人开发,该系统填补了国内外对兰花花开仿真研究的空白。由于兰花花朵形态的特殊性,国内外花开仿真研究,如文献[7,12-16,23]等中所提及的方法多侧重规则的花瓣的研究,而就兰花而言,花萼与花瓣对于花朵外观形态的构成与展示效果均有同等重要地位。另外,兰花的花瓣形态的不规则性,也是无法使用前人的研究成果来描述的。在文献[12]中只考虑了花朵的生长,而忽略了花朵的植株生长。在文献[9]中虽对植株的生长进行了较好的模拟,却不涉及到花朵的生长。文献[7]中侧重大场景的仿真效果,为提高绘制效率而对某些细节进行了省略,而且只关心花朵的开放,对植株只进行生成研究,未涉及其生长过程。文献[15]中虽对草本花卉进行了较为真实的模拟,但由于其使用了规则的参数,所以缺少了模拟现实世界中植物在生长过程中的随机变化。而本系统却弥补了前人所遗漏的,根据不同器官特点建立了模型库,并根据各器官生长特点加入了包括随机参数在内的适当变换,通过生长参数的控制,能模拟兰花生长过程中各器官的生长顺序及快慢,从而能很好的模拟现实中的兰花生长直至开花的过程。

该系统可用于兰花营销过程中的兰花生长过程展示,使用户能身临其境的感受兰花在不同场景下摆放的效果,通过多角度的观赏兰花,产生认同感,促成销售。以一家年营业额为 1000 万人民币的兰花生产销售企业来说,在展会中通过该系统,能展示公司科技创新的实力,促成更多订单,增加了 10% 的销售额,近 100 万以上的收益。

## 5 结论

本文根据现实世界中植物的自相似性和差异性,对不同种类的兰花各器官进行归类,建立器官库,并利用随机值对兰花叶片、兰花花萼、花瓣等进行生长位置、大小、角度等的可接受范围的变化调整控制,使模拟出的植物更具真实感。使用现实

中采集到的不同纹理控制植物、花盆、盆土等,使其呈现出近乎真实世界的外观。最后将各部分进行整合,并用界面上的按钮对场景、花盆、视点、背景音乐等进行更换控制,并允许用户通过键盘、鼠标对观察视点进行方便的变换操作,极大的方便了用户的使用。最终形成一个完整的、可交互的、界面美观的三维兰花花开系统。运用该算法,可通过设置不同的器官模型库,并根据植物学知识,模拟其他的草本植物生长开花过程。系统可用于植物学研究、园艺展示、植物教学交互等方面。当然,现阶段系统只开发了兰花在盆土之上可见的叶、花轴、花部分的展示,为了能更完整的将兰花植株进行展示,下一步考虑进行盆土下面的根茎的模拟研究。还可考虑增加用户对光照、水分、温度等生长条件的交互,以控制兰花生长速度,增强用户的交互体验。

## 参考文献:

- [1] 谭美,王四清. 观赏植物生长模拟模型研究进展 [J]. 园艺学报, 2010, 37(9): 1523-1530.
- [2] 唐卫东,刘昌鑫,李萍萍,等. 基于信息融合的植物生长数字化构建研究 [J]. 计算机应用研究, 2010, 27(1): 174-176.
- [3] 袁琪,周淑秋. 基于双尺度自动机的玉米拓扑结构模型研究 [J]. 齐齐哈尔大学学报, 2010, 26(1): 5-8.
- [4] 唐卫东,胡雪华,郭晨,等. 基于视频特征提取的虚拟植物动态仿真研究 [J]. 计算机应用研究, 2011, 28(1): 375-377.
- [5] 唐卫东,李萍萍,胡雪华,等. 基于生长模型的温室虚拟黄瓜构建研究 [J]. 计算机应用研究, 2011, 28(10): 3957-3959, 3966.
- [6] 董天阳,张萃,范菁,等. 植物共享光照资源的生长模型改进及可视化仿真 [J]. 农业工程学报, 2012, 28(16): 145-152.
- [7] 曾兰玲,汪国昭. 梅花树建模与梅花林景观模拟 [J]. 浙江大学学报(工学版), 2009, 43(12): 2191-2195.
- [8] 林晓穗,曾庆茂,朱同林. 基于骨架提取的植物三维建模和生长模拟系统 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2010: 472-475.
- [9] 丁维龙,朱元伟,章谦元,等. 水稻生长可视化模拟系统的设计与实现 [J]. 浙江工业大学学报, 2012, 40(1): 46-49.

(下转第 2559 页)

- on Graphics (S0730-0301), 2006, 3(25): 835-846.
- [2] Yasutaka Furukawa, Brian Curless, Steven M Seitz. Towards Internet-scale multi-view stereo [C]// IEEE Computer Vision and Pattern Recognition. USA: IEEE, 2010: 1434-1441.
- [3] M Kazhdan, H Hoppe. Screened poisson surface reconstruction [C]// ACM Transactions on Graphics. USA: IEEE, 2013, 32(3): 1-13.
- [4] Byungjoon Chang, Sangkyu Woo, Insung Ihm. GPU-based parallel construction of compact visual hull meshes [J]. The Visual Computer (S0178-2789), 2014, 30(2): 201-211.
- [5] Sorensen, Rhein, Mahoney. Reconstruction of textureless regions using structure from motion and image-based interpolation [C]// International Conference on Image Processing. USA: IEEE, 2014: 1847-1851.
- [6] 陈明伟, 杨洋. 弱纹理图像建模中的相机优化和扩展滤波研究 [J]. 系统仿真学报, 2013, 25(10): 2449-2453.
- [7] 缪君, 储珺, 张桂梅. 基于稀疏点云的多平面场景稠密重建 [J]. 自动化学报. 2014, 41(4): 813-822.
- [8] S Fuhrmann, F Langguth, M Goesele. MVE A Multi View Reconstruction Environment [C]// Euro graphics Workshop on Graphics and Cultural Heritage. Germany: Eurographics, 2014.
- [9] Zhuoliang Kang, Gerard Medioni. Fast Dense 3D Reconstruction using an Adaptive Multi-scale Discrete-Continuous Variational method [C]// Winter Conference on Applications of Computer Vision. USA: IEEE, 2014: 53-60.
- [10] Changchang Wu, Sameer Agarwal, Brian Curless, *et al.* Multicore Bundle Adjustment [C]// Computer Vision and Pattern Recognition. USA: IEEE, 2011: 3057-3064.
- [11] Carl Olsson, Olof Enqvist. Stable Structure from Motion for Unordered Image Collections [C]// Conference on Image Analysis. USA: IEEE, 2011: 524-535.
- [12] T Wu, S Yeung, J Jia, *et al.* A Closed-Form Solution to Tensor Voting: Theory and Applications [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (S0162-8828), 2012, 34(8): 1482-1495.
- [13] A Chambolle, T Pock. A first-order primal-dual algorithm for convex problems with applications to imaging [J]. Journal of Mathematical Imaging and Vision (S0924-9907), 2011, 40(1): 120-145.
- [14] W E Lorensen, H E Cline. Marching cubes: A high resolution 3d surface construction algorithm [C]// ACM Siggraph Computer Graphics. USA: IEEE, 1987, 21: 163-169.



(上接第 2552 页)

- [10] 马培良, 丁维龙, 古辉. 基于 OpenGL 和双三次贝塞尔曲面的稻叶可视化建模 [J]. 浙江工业大学学报, 2010, 38(1): 36-40.
- [11] 李娜, 王琰. 基于 IFS 的荷叶叶脉纹理算法 [J]. 沈阳理工大学学报, 2008, 27(6): 21-24
- [12] 刘东平, 张文俊, 田超, 等. 一种植物花朵开花的动态仿真模型 [J]. 微型电脑应用, 2010, 26(3): 3-5.
- [13] 刘金定, 伍艳莲, 梁敬东. 基于 OpenGL 的荷花开放过程模拟 [J]. 安徽农业科学, 2008, 36(25): 11054-11056.
- [14] Peiyu Qin, Chuanbo Chen. Simulation Model of Flower Using the Integration of L-systems with Bezier Surfaces [J]. International Journal of Computer Science and Network Security (S1738-7906), 2006, 6(2A): 65-68.
- [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] 淮永建, 曾茜. 花卉植物形态与生长可视化仿真研究 [J]. 计算机工程与应用, 2012, 48(8): 185-188.
- [17] 姚俊峰. 三维数字创意产业核心技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [18] 姚俊峰. 交互式三维技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [19] 陈璋, 郑昭. 兰花 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2004.
- [20] 闫雪. 基于虚拟现实技术的植物动态生长模拟关键技术研究 [D]. 吉林: 吉林农业大学, 2012.
- [21] 温维亮, 郭新宇, 陆声链, 等. 曲面建模方法在数字植物中的应用与展望 [J]. 中国农业科学, 2011, 44(7): 1338-1345.
- [22] Chen X J, Neubert B, Xu Y Q, *et al.* Sketch-Based Tree Modeling Using Markov Random Field [J]. ACM Transactions On Graphics (S0730-0301), 2008, 27(5) : Article 109:1-9.
- [23] Ding Z, Xu S, Ye X, *et al.* Flower Solid Modeling Based on Sketches [J]. Journal of Zhejiang University SCIENCE A (S1673-565X), 2008, 9(4): 481-488.
- [24] Richard S Wright Jr, Nicholas Haemel Graham Sellers Benjamin Lipchak. OpenGL 超级宝典(5 版) [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2012.
- [25] 施瑞奈尔. OpenGL 编程指南(7 版) [M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.