

6-14-2018

Physically-based Dynamic Algorithms for Time-Varying of Flowers and Leaves

Jiao Di

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

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;

Yang Gang

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

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 Original Article 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.

Physically-based Dynamic Algorithms for Time-Varying of Flowers and Leaves

Abstract

Abstract: *This paper presents physically-based simulations of dynamic algorithms of the blossom and fading of flowers as well as the time-varying leaves following the seasons.* The models of the flowers are constructed according to the previously collected primary biological data of organs of flowers. The dynamic simulation is presented by two phases: the process of blooming and the process of fading. To simulate the former, the curved surfaces of petals are controlled by controlling the points on the Bezier surface; for realizing the simulation of the latter, the physical method is used. The dynamic effects of colors of leaves according to the changes of seasons are simulated by the texture synthesis algorithm. The experimental results show that the proposed algorithm is able to effectively simulate the process of blossom and fading of different kinds of flowers under the influence of the wind, which proves its application value and broad prospects for development.

Keywords

flower modeling, blooming dynamics, litterfall dynamics, time varying, physical simulation

Recommended Citation

Jiao Di, Yang Meng, Yang Gang. Physically-based Dynamic Algorithms for Time-Varying of Flowers and Leaves[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(6): 2076-2085.

基于物理的花开花落与叶片时变动态算法

焦迪¹, 杨猛^{1,2}, 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: 提出一种基于物理的花的开放与凋落的动态模拟算法与叶片随季节时变动态算法。以五种花为代表, 依据所收集的主要器官形态学数据建立各种花卉的模型。花朵动态仿真分为两个阶段: 开放过程与凋落过程。通过控制 Bezier 曲面上控制点的变化, 来模拟花朵开放过程; 通过基于物理的方法, 模拟花瓣凋落过程。通过纹理合成算法模拟叶片的颜色随季节变换的动态效果。实验结果表明, 该算法能够有效地模拟不同品种的花的开花过程和在有风的影响下花瓣的凋落过程, 具有一定的应用价值和广阔的发展前景。

关键词: 花卉建模; 开花动态; 凋落动态; 时变; 物理模拟

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2018) 06-2076-10

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201806010

Physically-based Dynamic Algorithms for Time-Varying of Flowers and Leaves

Jiao Di¹, Yang Meng^{1,2}, 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: This paper presents physically-based simulations of dynamic algorithms of the blossom and fading of flowers as well as the time-varying leaves following the seasons. The models of the flowers are constructed according to the previously collected primary biological data of organs of flowers. The dynamic simulation is presented by two phases: the process of blooming and the process of fading. To simulate the former, the curved surfaces of petals are controlled by controlling the points on the Bezier surface; for realizing the simulation of the latter, the physical method is used. The dynamic effects of colors of leaves according to the changes of seasons are simulated by the texture synthesis algorithm. The experimental results show that the proposed algorithm is able to effectively simulate the process of blossom and fading of different kinds of flowers under the influence of the wind, which proves its application value and broad prospects for development.

Keywords: flower modeling; blooming dynamics; litterfall dynamics; time varying; physical simulation

引言

花, 即花卉, 在人们的生产、生活中起着重要的作用, 它能够给人们带来美的享受, 调节人们的

心情, 常被用来表达爱意或敬意, 也可用于各种活动和场合, 例如庆祝节日、装饰房间、装饰场景等。

在信息技术飞速发展的今天, 关于花卉的模拟的应用越来越广泛。在广告、影视等领域, 花卉经常被用于搭建场景, 美化画面。而花卉的仿真能够模拟出现实中很难捕获的效果, 给特效的拍摄及后期的处理带来方便; 同样, 在游戏领域, 植物模型特别是花的模型的引入, 使得游戏场景更加逼真,



收稿日期: 2016-06-14 修回日期: 2016-08-04;
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(2017JC10, 2015ZCQ-XX,
BLX2012049);

作者简介: 焦迪(1994-), 女, 河北, 学士, 研究方向
为计算机图形学; 杨猛(通讯作者 1982-), 男, 河北,
博士, 副教授, 研究方向为计算机图形学。

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

• 2076 •

内容更加丰富,能够给游戏玩家以身临其境的感觉;同时,关于花的生长等变化的真实感仿真能够应用在教育领域,辅助相关课程的教学,丰富教学素材,使知识的传播更加直观、生动;在日常植物知识的传播和农业技术推广方面,植物的仿真模拟,尤其是植物的动态展示起到很大的作用,它能够更为直观地展示各种细节知识;在各种园林规划、景观设计中,花是场景中最常见且不可或缺的重要组成部分之一,因此构建真实场景离不开对花卉的模拟;在生态保护领域,花的仿真模拟通过直观的模式,为生态保护的发展提供便利。因此,在诸多领域中,关于花卉的仿真模拟尤其是花卉的动态模拟具有重要的价值,关于花卉的动态模拟已经成为当前计算机图形学研究领域的热点问题之一。

目前在计算机图形学领域,关于花卉的三维静态仿真模拟已较为成熟,有多种方法进行花卉的三维建模。随着计算机技术的不断发展,人们对花卉的仿真模拟要求逐渐提高,从对静态的花卉模拟的需求逐渐转变为对其动态过程的模拟仿真的要求,但是相对于静态仿真模拟的研究而言,关于花卉的动态模拟成果则相对较少,而相较于对开花过程的模拟,对花的凋落过程的模拟的研究成果则更少。

在自然界,花的开放过程主要是花本身的生长过程,外界环境对其影响较小,但花瓣的凋落受到外界环境的影响,尤其是风的影响,因此,研究花瓣的凋落过程需要将外界环境的影响加入花瓣的动态模拟中,这是花的动态仿真模拟的难点之一。

综上,花卉的动态模拟是计算机图形学领域的热门研究问题之一,亦是难点研究问题之一。本文重点研究花卉的动态模拟算法,包括开花过程和风力与空气阻力作用下的凋落过程以及叶片的时变过程。

不同的花卉在不同季节开放,因此每个季节有其代表花卉,所以本文将重点选择五种代表花卉代表不同月份来进行花卉的模拟仿真,依据其主要器官的生物学数据,利用 OpenGL 技术和 Visual Studio C++编程工具对花卉的几何形态进行仿真模

拟,研究其开花及凋落过程,实现其开花和凋落过程的仿真模拟,同时引入风的模型加入其凋落的过程,实现花卉的动态仿真模拟算法。随着时间的推移,花朵经历由开花到凋落的过程,同时,叶片外观特征的变化较为明显,主要是颜色和纹理的变化。

1 相关工作

对植物的仿真模拟是近年来随计算机技术不断发展而逐渐热门的研究领域,关于植物的建模和动态仿真是建立在植物学、计算机图形学等多种学科基础之上的交叉领域,在自然景观设计、三维游戏、教育教学等方面有着广泛的应用前景。因此,国内外的研究人员均对植物的仿真模拟进行研究,尤其是三维建模的领域,研究成果较为丰富,但由于所应用的领域、构造算法等不同,建模方式也不尽相同。随着计算机硬件水平的发展,单纯对植物的静态三维模型的模拟仿真逐渐不能满足人们对植物的仿真模拟的要求,因此,对植物的动态变化的仿真模拟的需求逐渐显现。在自然界的植物中,花卉常作为观赏植物为人们所喜爱。因此,对植物,尤其是对花卉的仿真模拟变得更为突出。花朵的开放过程常常作为仿真模拟的研究方向之一,但同时对于花卉的凋落过程的研究成果则相对较少。

根据近年来的研究成果,可以归结出以下常见的仿真算法。

1.1 植物静态建模算法

对于植物的三维建模一直是国内外计算机图形学的热门研究问题之一,花卉的三维建模是其中的一个重要分支。常用的植物建模的方法总体上可分为两种,一种是基于图形的方法,另一种则是基于图像的方法。

具体的植物形态建模方法主要有以下几种:基于图形的方法有分形方法^[1-2]、粒子系统^[3-4]、随机过程、逐步生长方法和体元素方法等;基于图像的方法有基于轮廓的体重建、基于剖面的曲面重建和基于立体视觉的三维点重建。

分形几何的概念是美籍法国数学家曼德罗布 (B. B. Mandelbrot) 在 1975 年提出的。1982 年, 曼德布罗特发表了著作《The Fractal Geometry of Nature》, 并于 1985 年获得巴纳德奖章。分形方法是利用数学功能描述植物形态结构的自相似性 (Self-similarity), 根据分形理论来表现出植物生长的拓扑形态结构。目前常用的分形几何建模方法可以分为 L-System 方法、迭代函数系统 (Iterated Function System, IFS)、分枝矩阵 (Ramification Matrix)^[5]、正规文法方法^[6]、A 系统 (A-system)^[7]。

针对 L-System 代码用于编程指导非常繁琐这个问题, 张树兵等^[8]提出一种改进方法, 从而避免了传统方法中庞大的链表结构和复杂的遍历过程, 使植物建模更加简洁高效; 在 1986 年, Peter 等^[2]提出了一种分形分枝对象的计算机模型, 考虑环境的随机效应, 模拟了具有真实感的植物; Quan L 等^[9]通过计算机视觉原理, 从多幅图像中恢复植物表面的三维信息, 利用点云实现了植物的三维建模; Anastacio 等^[10]则实现了根据用户构造的概念草图, 调整植物模型, 从而自动生成植物模型。2008 年, 丛波等^[11]依据 IFS 码和二次曲线迭代元实现了三维花瓣的模拟, 真实度较高, 同时降低了复杂度。

1.2 植物动态仿真算法

近年来, 关于植物的仿真研究除了有植物静态三维模型的仿真模拟, 还有关于植物动态仿真模拟, 而关于花的动态仿真研究往往集中在对具有大花瓣的花的开花动态效果的仿真模拟上, 关于花的凋谢的仿真模拟则相对较少。

闫雪^[12]将玉米作为研究对象, 分析其生长过程及影响因素, 采用微分 L 系统理论实现了玉米根系、叶片等器官的动态生长模型的构建, 从而实现了玉米根系及叶片等器官的动态仿真模拟; 刘东平等^[13]通过采用微分 L 系统来描述花朵的拓扑结构, 同时采用 Bezier 曲面对花朵的几何结构进行模拟, 提出一种模拟花的动态生长和开放过程的简单模型; 涂晓兰^[14]提出了基于草图的建模和生

物驱动模型自动生成花开动画的方法, 得到了符合花的自然生长规律的动画; 张铭^[15]利用 Bezier 曲面构建了 12 种花朵的模型, 并且利用数学模型模拟了开花的过程; 2012 年, 淮永建等^[16]采用 Logistic 方程模拟叶片和花瓣的生长过程, 得到了逼真自然的花卉。柳有权等^[17]则研究了树在风中自然摇曳的状态, 提出了一种基于物理的在风的条件下快速生成真实感较强的树的成像方法。

1.3 植物叶片时变仿真算法

在计算机图形学领域, 以往对叶片的仿真模拟通常采用的是单一材质样本, 而在现实生活中, 当花朵开始枯萎, 叶片也会随着时间的变化, 有不同程度的衰老, 其纹理也是发生变化的。针对这一现象, 2009 年, 迟小羽等^[18]采集大量的叶片样本, 结合植物学知识等, 从中得出叶片衰老过程的表达式, 最终提出了一种采样并生成植物叶片表现的方法, 这种方法有可以更加真实、有效地模拟叶片的干枯、老化过程; 同样的, S H Jeong 等^[19]介绍了一种基于生物动力的对叶片干枯过程进行仿真变形的的方法, 该方法可以模拟整个叶片表面的细节变化, 仿真效果较为真实。

2 基于形态学的花卉建模

研究花卉开放和凋落过程, 首要是构建花的三维模型。典型的花, 在一个有限生长的短轴上, 着生花萼、花瓣和产生生殖细胞的雄蕊和雌蕊。为了能够更好地模拟花卉的动态效果, 花卉的三维模型需要在展现花卉的自然形态的同时便于进行变形计算。因此, 我们采用基于剖面的曲面重建的方法进行花卉的三维建模。

花卉种类繁多, 并且不同季节有不同的花卉开放, 因此我们选择了五种花卉作为不同季节的代表, 它们分别是郁金香^[20]、百合^[21]、栀子花^[22]、荷花^[23]、兰花^[24], 如图 1 所示。郁金香的开放时间是春季 3-4 月; 不同百合花品种开花时节不同, 大部分集中在在 5-6 月, 常见的百合品种在春末到

夏季生长开放; 初夏时节栀子花开放, 花期较长, 集中在 6-7 月; 荷花在盛夏开放, 作为 7-8 月的代表花卉; 兰花则是作为秋天的代表花卉, 开花时间在 9-10 月。



图 1 不同月份的代表花卉
Fig. 1 Representative flowers in different months

以郁金香为例, 其花朵由花冠、花萼、花托、花蕊组成, 有各种各样的颜色, 本文以黄色郁金香作为代表。为便于对花的动态变化进行模拟仿真, 本文将花卉结构进行了简化, 如郁金香简化为由花茎、叶片、花冠构成, 其中, 花冠由 6 片花瓣构成。

本文中花瓣及叶片均是采用双三次 Bezier 曲面进行模拟, 存储 16 个控制点来控制曲面形状(如图 2 所示)。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(1):

$$P(u,v) = \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n P_{ij} B_{i,m}(u) B_{j,n}(v), \quad (1)$$

$$(u,v) \in [0,1] \times [0,1]$$

式中: P_{ij} 为 $P(u,v)$ 的控制顶点, 通过调整这些控制点的坐标得到平滑的花瓣和叶片的曲面。

花瓣控制点的位置取决于花的外形, 由整片花瓣的长度和弯曲程度决定花瓣的顶部和底部的控制点位置, 并且 $P_{00}, P_{01}, P_{02}, P_{03}$ 4 个控制点合为 1 个控制点, $P_{30}, P_{31}, P_{32}, P_{33}$ 合并为 1 个控制点, 以作为花瓣的两个端点, 选取花瓣最宽的两个定点作

为 P_{20}, P_{23} 控制点的位置, 选取花瓣最宽到花瓣定点之间外边缘切线斜率最小的位置为 P_{10}, P_{13} 控制点的位置, 由此控制整个花瓣的外轮廓的形状, $P_{11}, P_{12}, P_{21}, P_{22}$ 控制点的位置是由花瓣的中轴形态决定的, 有些花卉的花瓣中轴位置有微微凹陷的现象, 由 2 个端点控制点和中间 4 个控制点来模拟此类形态特征。

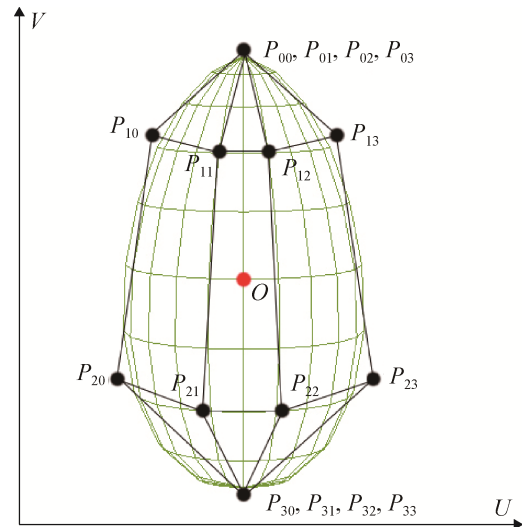


图 2 Bezier 曲面模拟花瓣形态示意图
Fig. 2 Illustration of Bezier curve petal surface

通过纹理贴图得到郁金香花瓣(如图 3(a)), 同理得到郁金香的叶片(如图 3(c))。

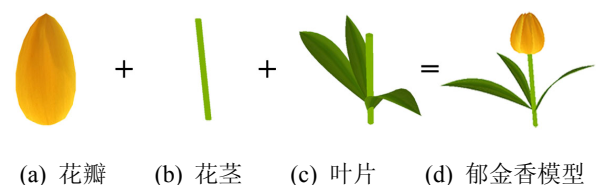


图 3 郁金香各主要器官及最终模拟效果图
Fig. 3 Major organs and final modeling results of tulip

花茎由棱柱进行模拟, 采用 5 个等高十六棱柱拼接的方式, 如图 4 所示, 第一节茎底面半径为 r_0 , 顶面半径为 r_1 , 偏移角为 α , 高度为 l , 通过已知量计算出顶面中心位置, 第二节茎底面半径与第一节茎顶面半径 r_1 相同, 且底面中心与第一节茎顶面中心位置重合, 因此两节茎完成拼接, 依据半径、偏移角和高度来计算第二节顶面的位置。以

此类推，得到全部花茎。通过纹理贴图得到如图 3(b)的郁金香茎。

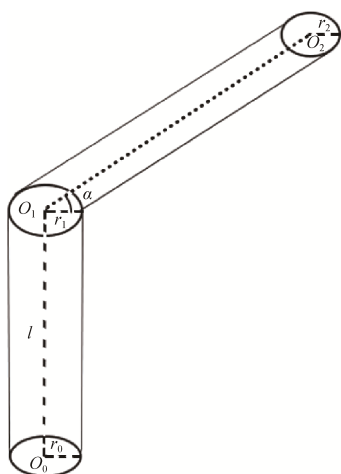


图 4 花茎示意图

Fig. 4 Illustration of the steam of a flower

最终，得到静态的郁金香三维模型，如图 3(d)。同理，得到了另外 4 种花的三维模型。

3 花开花落动态仿真算法

花卉的动态变化过程可分为开花阶段和凋落阶段，不同阶段影响花朵变化的因素不同。花朵开放的原因是花瓣等器官自身因细胞的增殖而伸长、生长，受外界影响较小，而花瓣凋落的过程则受到外界力的作用，比如重力、风力。因此，在本文中，这两个过程是分别进行仿真模拟的。

3.1 开花过程仿真算法

静态的花朵可以给人带来美的享受，而花朵开放的过程更是让人感受到生命绽放的魅力和精彩，随着时间的变化，花卉的外观逐步发生改变，尤其是花瓣的变化最为明显，花朵从花苞到盛开的过程，主要是花瓣的生长变形过程。在本文中，我们对郁金香、百合花、栀子花、荷花、兰花进行深入观察，对其开花过程进行调查分析，在已得到的静态模型的基础之上，对花瓣的动态变化进行了仿真模拟。

通过观察和收集资料我们发现，花朵的开放过程可大致分为两个阶段：伸长阶段和伸展阶段。以

1 片花瓣为例，第一阶段主要为花瓣的伸长、变宽过程，主要是花瓣的长短、大小发生变化；第二阶段主要为花瓣的变形、开放过程，主要为花瓣的倾角、弯曲程度及大小发生变化。因此，根据上述结论，取花朵开放过程中的 3 个特殊形态作为标志形态，即花苞形态、即将绽放的形态和花朵盛开的形态。利用这 3 个标志形态将花朵开放过程分割为两个阶段(如图 5)，分别与上述两个阶段相对应，每个阶段花瓣的变形则通过对 Bezier 曲面上 16 个控制点(如图 2)进行控制来完成，通过将与其阶段相对应的两个标志形态花瓣相应的控制点的坐标进行线性插值从而获得控制该变化阶段的控制点的变量参数值。郁金香常为 6 片花瓣，呈两轮排列，即内层 3 瓣，外层 3 瓣，在花朵开放过程中，外层花瓣相比于内层花瓣变形程度更大，因此，在模拟花朵的开花过程时，对花瓣生长顺序进行相应控制，即外层花瓣弯曲变形比内层花瓣程度大。凋落过程也是外层花瓣先于内层花瓣。其它花卉模拟原理相同。



图 5 花朵开放过程示意图

Fig. 5 Illustration of the blooming process of a flower

上述过程具体实现过程如下，以郁金香为例，郁金香的 3 个标志形态矢量分别为 G_1 、 G_2 、 G_3 (如图 6(a~c))。

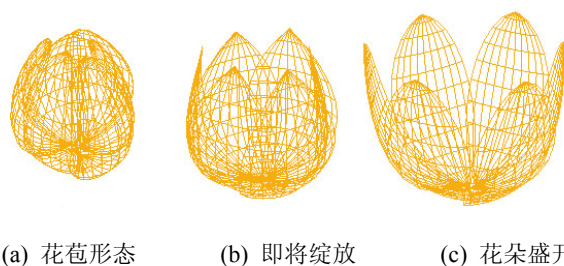


图 6 郁金香的 3 个标志形态

Fig. 6 Illustration of three sign shape vectors of a tulip

每个形态矢量对应时间点分别为 t_1 、 t_2 、 t_3 ，根据以上几点可以设计一个数字模型来表示花瓣的变化过程。花瓣的形态矢量 G_i 可以用线性方程(2)

来表示:

$$G_t = G_{t-1} + \Delta G_t \quad (2)$$

式中: G 表示花瓣的形态矢量; G_t 表示 t 时刻的花瓣的形态矢量; G_{t-1} 表示 $t-1$ 时刻的花瓣的形态矢量; ΔG_t 表示角度值在 t 时刻花瓣形态矢量的增量。其中第一阶段 t 时刻的形态矢量的增量 ΔG_t 可用以下线性方程(3)计算, 同理, 第二阶段 t 时刻的形态矢量的增量 ΔG_t 为式(4)。

$$\Delta G_t = (G_2 - G_1) / (t_2 - t_1) \quad (3)$$

$$\Delta G_t = (G_3 - G_2) / (t_3 - t_2) \quad (4)$$

如上, 得到郁金香开放过程的仿真结果。

3.2 凋落过程仿真算法

花开的仿真过程是基于日常经验得到的结果, 较为接近花开的变化过程。当花朵完全开放, 完成其授粉过程, 就会枯萎凋落, 当花瓣脱离花托, 则不再受到花茎的支撑作用。同时, 外界环境将对其凋落过程产生较大影响。尤其是风会对花瓣的凋落产生很大的影响, 会改变其运动轨迹, 使花瓣产生位移和旋转。

风, 是自然界中最为常见的由于空气流动而产生的一种自然现象, 它的形成和空气的温度有很大关系, 冷热空气的运动导致空气发生流动, 从而产生了风。

因此, 本文重点模拟在风的影响下, 花瓣的凋落过程。通常风由两个运动分量构成, 方向和大小, 即风向和风速。本文针对3种风力条件, 对花瓣的凋落过程进行仿真模拟, 这3种风力条件分别是无风条件, 微风条件和强风条件。采用基于物理力学的方法来模拟花瓣的运动变化过程。本文采用微分的方式, 将花瓣的凋落过程看成无数个极短时间内的匀速运动, 通过计算花瓣凋落过程中每个时刻花瓣的速度、方向等得到该时刻花瓣在视区的运动距离等数据, 屏幕刷新后显示每时每刻花瓣的状态, 最终花瓣的凋落过程以动画形式呈现在屏幕上。

首先分析花瓣凋落过程中的受力情况, 主要的力有重力、风力和空气阻力见图7。

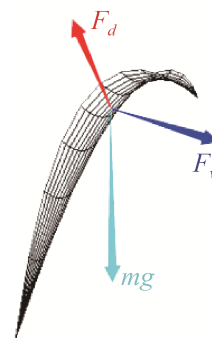


图7 花瓣受力分析示意图

Fig. 7 Illustration of force analysis on a petal

得到花瓣的动力学方程如式(5):

$$m \frac{d^2 x(t)}{dt^2} = \sum_{i=1}^n F_i \quad (5)$$

式中: m 为花瓣质量; $x(t)$ 为花瓣在 t 时刻的位置; F_i 为花瓣所受的外力; n 为外力个数。

由于将花瓣的凋落过程看作无数极短时间内的匀速运动, 因此花瓣在 t 时刻的位置可由式(6)求得:

$$x(t) = x(t-1) + v_t \Delta t \quad (6)$$

式中: $x(t-1)$ 为花瓣在 $t-1$ 时刻的位置; v_t 为花瓣在 t 时刻的速度; Δt 为极短的单位时间; v_t 则是由花瓣在空气中所受的力来决定的, 其求解公式如下:

$$v_t = v_{t-1} + a \Delta t \quad (7)$$

式中: a 由公式 $a = F / m$ 求得, 因此, 求得花瓣所受外力即可求得花瓣的运动过程。

本文算法重点考虑花瓣所受3个外力: 包括自身重力 G 、风力 F_w 以及运动过程中的空气阻力 F_d 。即 $\sum_{i=1}^n F_i = G + F_w + F_d$, 其中 $n=3$ 。

花瓣重力由 $G=mg$ 求得, 其中重力加速度 g 取 9.8 m/s^2 。

空气阻力 F_d 的方向与花瓣的瞬时速度方向有关, 其大小和空气阻尼系数和瞬时速度大小成正比, 方向相反。如图8所示。

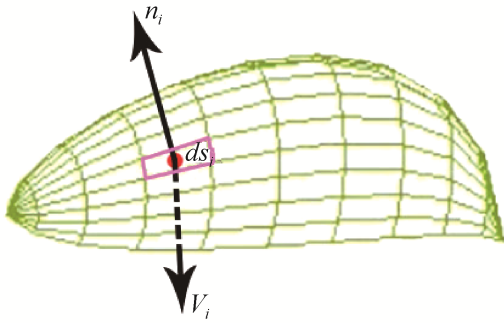


图8 空气阻力示意图

Fig. 8 Illustration of air resistance

花瓣受到的空气阻力 F_d 如式(8)所示:

$$F_d = \int_1^n \frac{f_i}{S} ds_i \quad (8)$$

式中: s_i 为第 i 个叶片网格面积; f_i 为第 i 个叶片网格上所受的阻力; S 为叶片网格总面积, 可以表示为 $S = \int_1^n ds_i$; n 为叶片网格个数。 f_i 可以表示为式(9):

$$f_i = k(n_i \cdot v_i)v_i \quad (9)$$

式中: k 为空气阻尼系数; n 为第 i 个面片的单位法向量; v_i 为该面片速度矢量, 可以表示为 $v_i = \frac{dx_i(t)}{dt}$ 。在同种空气条件下, k 为定值。

风力 F_w 与花瓣的速度和迎风面积有关, 依据风速风压关系公式^[17], 风力可以表示为

$$F_d = \frac{1}{2} C_p \rho v^2 S \quad (10)$$

式中: C 为空气阻力系数; S 为花瓣迎风面积; ρ 为空气密度。 v 为风速。通过调整风速, 迎风面积等来调整风力模型。特别地, 当无风条件时, v 取值为 0。

式(5)~(6)可以求解花瓣凋落过程的位置, 但是不能求解花瓣的转动效果。花瓣转动效果可以由如下力矩控制:

$$\tau(t) = \sum \tau_i(t) = \sum (r_i(t) - x(t)) \times F_i(t) \quad (11)$$

式中: $\tau_i(t)$ 为第 i 个面片上的力矩; $r_i(t)$ 为第 i 个面片上网格顶点到花瓣质心的距离矢量。

通过以上计算, 得到花瓣凋落过程的动画, 如“实验结果及分析”小节中所示。通过更改风速, 得到其它风力条件下花瓣的凋落过程动画。

其它品种花卉的花瓣凋落过程模拟方法同理, 但不同花卉空气阻尼系数不同, 花瓣迎风面积不同, 因此花瓣凋落过程不尽相同, 通过更改这些参数, 得到各个花卉的凋落过程动画。

4 叶片时变动态仿真算法

随着季节的更替, 花朵经历由开到落的过程, 同时(尤其是秋天的时候), 叶片的颜色也在发生变化。

通过观察我们发现, 叶片抽芽时, 主叶脉左右两侧叶片相互靠拢叠起, 随着小叶的生长, 水分和营养成分逐渐增加, 并在叶脉中流向叶片的各个部分, 两侧叶片也随之分别向两侧伸展并逐渐平铺, 平铺后小叶有小到大向四周扩展, 最终因水分流失而衰老收缩。

在本文中, 根据上述生物学原理, 将叶片形变划分为两个阶段: 第一阶段为叶片抽芽舒展, 第二阶段为叶片失水老化, 通过对 Bezier 曲面上 16 个控制点(如图 2 所示)进行线性插值来控制其形变。上述两个阶段对应着如图 9 所示的 3 种形态, 其形态矢量分别为 H_1 (图 9(a))、 H_2 (图 9(b)), H_3 (图 9(c)), 对应的时间点分别为 t_0 , t_1 , t_2 。

则叶片在第一阶段任意时刻 e 的形态矢量 H_e 为如式(12), 同理, 叶片在第二阶段任意时刻 e' 的形态矢量 H'_e 如式(13),

$$H_e = H_1 + (H_2 - H_1) \times (e - t_0) / \Delta t_1 \quad (12)$$

$$H'_e = H_2 + (H_3 - H_2) \times (e' - t_0) / \Delta t_2 \quad (13)$$

式中: $\Delta t_1 = t_1 - t_0$; $\Delta t_2 = t_3 - t_1$ 。



(a) 初期 (b) 成熟期 (c) 衰老期

图9 不同时期的真实叶片

Fig. 9 Real leaves in different stages

同时, 因叶片不同部位在老化时失水速率不

同, 导致叶片不同部位卷曲程度存在差异, 因此我们引入收缩因子 $K (K \geq 0)$, K 的值与叶片卷曲程度成正比。根据观察, 叶片在失水老化时, 距叶片中心 O 越远其卷曲程度越大, 且 U 方向的卷曲程度大于 V 方向的卷曲程度(如图 2 所示)。因此, 我们采用 V 、 U 两个方向的收缩因子 K_i 和 $K_j (i, j=0,1,2,3)$ 线性相加得到任意控制点 P_{ij} 的收缩因子 K_{ij} , 为 K_i 赋予权重 $a (a > 0)$, 为 K_j 赋予权重 $b (b > 0)$, 且 $b > a$, 如式(14):

$$K_{ij} = a \times K_i + b \times K_j \quad (14)$$

式中: K_i 和 K_j 分别由 P_{ij} 与 O 在 V 、 U 方向上的距离决定, 且与距离成正比。

5 实验结果及分析

本文系统运行在配置条件为 Intel® Core(TM) i5-240 0 CPU 3.10GHzCPU, 8G 内存, Win8.1 操作系统的 PC 机上, 植株模拟结果如下: 图 10 所示为郁金香三维静态模型最终效果图, 图 11 展示了百合花、荷花、兰花和栀子花的三维静态模型中标志状态和细节。



图 10 郁金香三个标志状态
Fig. 10 Three sign states of tulips

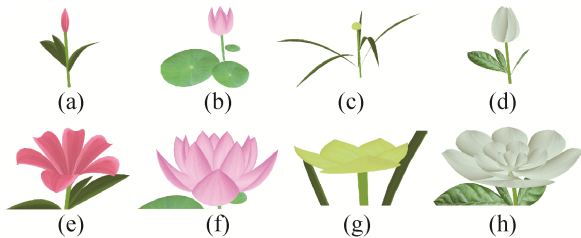


图 11 四种花卉的形态展示
Fig. 11 States of four kinds of flowers

图 12 所示为各品种花卉开放过程动画截图, 以荷花为例, 图 13 为真实荷花^[25]开放过程与仿真过程对比结果图。图 14 为郁金香在 3 种风力条件

下的花瓣凋落过程动画截图, 图 14(a)~(e)为郁金香在无风条件下花瓣凋落过程动画截图, 图 14(f)~(j)为郁金香在微风条件下花瓣凋落过程动画截图, 图 14(k)~(o)为郁金香在强风条件下花瓣凋落过程动画截图。

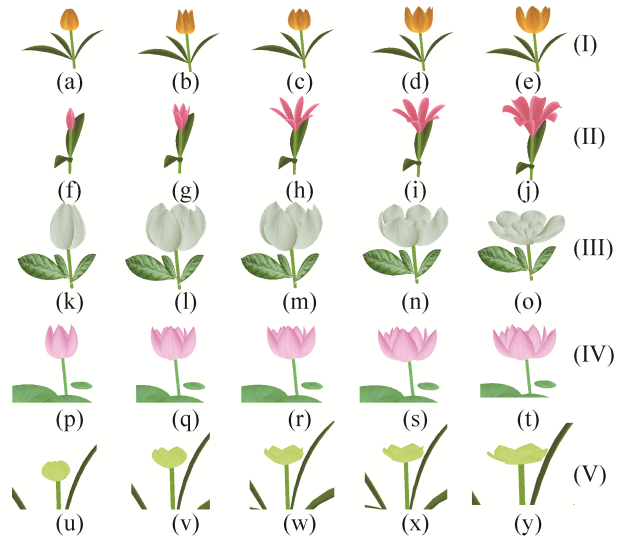


图 12 花卉开放过程动画截图
Fig. 12 Blooming process sequences of different kinds of flowers

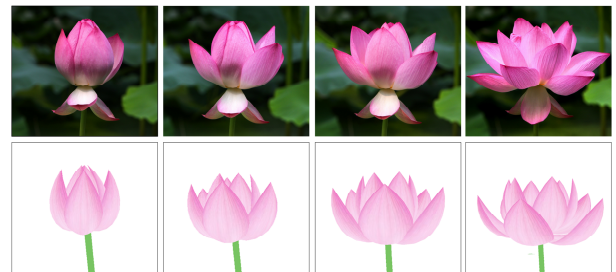


图 13 荷花真实图片和仿真结果对比图
Fig. 13 Comparison between real photos of a water lily and its results of modeling effects

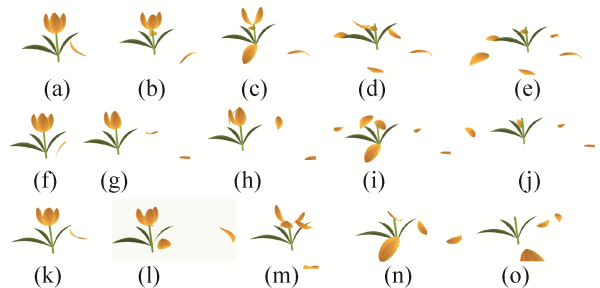


图 14 郁金香在 3 种风力条件下凋落过程动画截图
Fig. 14 A tulip fading process animation sequences under the condition of three different kinds of wind

叶片时变模拟结果如图 15 所示, 图 15(a)为叶片抽芽时的出其形态, 图 15(b)为叶片伸展开后的成熟时期的形态, 图 15(c)为叶片衰老期的形态。



图 15 叶片时变仿真效果

Fig. 15 Simulation results of the time-varying leaf blade

经测量得到 5 种代表花卉的时间效率等相关数据, 如表 1 所示。

表 1 单株代表花卉的统计数据

Tab. 1 Data of several representative flowers

| 序号 | 花型 | 花落 FPS | | |
|----|-----|--------|-----|-----|
| | | 无风 | 微风 | 强风 |
| 1 | 郁金香 | 362 | 346 | 391 |
| 2 | 百合 | 383 | 339 | 419 |
| 3 | 栀子花 | 301 | 217 | 318 |
| 4 | 荷花 | 261 | 227 | 322 |
| 5 | 兰花 | 380 | 318 | 411 |

本文所选花卉为单瓣类型, 花瓣为一轮或两轮, 花型较为简单, 开花过程采用线性插值进行模拟, 适用于花型较为简单的花卉, 花落的过程采用物理公式进行计算, 不受花卉种类的限制和影响, 其它类型的花卉亦可以采用本文方法进行仿真, 因此, 本文方法有一定的通用性。

6 结论

本文在对花卉主要器官生物学形态特征进行分析的基础之上, 采用基于剖面的曲面重建的方法进行花卉的三维建模, 提出了基于物理的花开花落的动态仿真算法。将花朵的动态仿真分为两个阶段: 开放阶段和凋落阶段。其中, 通过控制花瓣的 Bezier 曲面上控制点的参数来控制花瓣的大小、形态完成花朵开放过程的仿真模拟。采用基于物理的方法对花瓣凋落过程中的受力情况进行分析、计算, 依据牛顿第二运动定律对花瓣的运动情况进行计算, 以此来模拟花瓣凋落的动态过程。其中, 花

卉三维建模的参数是基于真实的生物学数据, 凋落过程中的空气阻力系数、风力系数和空气密度为定值, 但不同物体的空气阻尼系数不同。因此, 标准大气压下, 空气密度取值为 1.2 kg/m^3 , 风速取值与风力等级有关。本文算法适用于单株植物的三维建模和动态效果展示, 能够较好地模拟出文中所给的几种花卉的花开花落过程。

本文算法适用于单株植物的三维建模和动态效果展示, 能够较好地模拟出文中所给的几种花卉的花开花落过程, 及叶片随时间发生变化的过程。本文算法运行于 CPU, 尚未进行 GPU 加速, 将来可以通过 GPU 加速的方法对算法的运行进行优化, 使程序运行更加高效。花开花落过程为动态变化过程, 因此不可避免会发生一些穿透现象, 利用碰撞检测的方法则可以对花瓣、叶片位置、状态进行检测, 当发生碰撞可以进行碰撞效果的模拟或者避免。因此, 本课题未来工作之一是利用碰撞检测及回避的方法对花瓣之间、叶片之间及花瓣和叶片之间的穿透现象进行避免, 同时如产生碰撞可对其碰撞效果进行模拟, 从而使动态仿真过程更加逼真。

参考文献:

- [1] Benoit B Mandelbrot. Fractals: Form, Chance and Dimension[J]. The Mathematical Intelligencer (S0343-6993), 1978, 1(1): 35-37.
- [2] Peter E Oppenheimer. Real Time Design and Animation of Fractal Plants and Trees[J]. ACM SIGGRAPH Computer Graphics (S0097-8930), 1986, 20(4): 55-64.
- [3] William T Reeves, Ricki Blau. Approximate and Probabilistic Algorithms for Shading and Rendering Structured Particle Systems[J]. ACM SIGGRAPH Computer Graphics (S0097-8930), 1985, 19(3): 313-322.
- [4] W T Reeves. Particle Systems — a Technique for Modeling a Class of Fuzzy Objects[J]. ACM Transactions on Graphics (S0730-0301), 1983, 2(2): 91-108.
- [5] X Viennot, G Eyrolles, N Janey, et al. Combinatorial Analysis of Ramified Patterns and Computer Imagery of Trees[J]. ACM SIGGRAPH Computer Graphics (S0097-8930), 1989, 23(3): 31-40.
- [6] Smith A R. Plants, Fractals and Formal Languages[J]. ACM SIGGRAPH Computer Graphics (S0097-8930), 1984, 18(3): 1-10.

- [7] Masaki Aono, Toshiyasu L. Kunii. Botanical Tree Image Generation[J]. IEEE Computer Graphics and Applications (S0272-1716), 1984, 4(5): 10-34.
- [8] 张树兵, 王建中. 基于 L 系统的植物建模方法改进[J]. 中国图象图形学报, 2002, 7(5): 457-460.
Zhang Shubing, Wang Jianzhong. Improvement of Plant Structure Modeling Based on L-System[J]. Journal of Image and Graphics, 2002, 7(5): 457-460.
- [9] Long Quan, Ping Tan, Gang Zeng, et al. Image-based Plant Modeling[J]. ACM Transactions on Graphics (S0730-0301), 2006, 25(3): 599-604.
- [10] Fabricio Anastacio, Mario Costa Sousa, Faramarz Samavati, et al. Modeling Plant Structures Using Concept Sketches[C]// International Symposium on Non - Photorealistic Animation & Rendering. New York: NY, USA, 2006: 105-113.
- [11] 丛波, 王琰. 基于分形构造三维花卉的算法[J]. 沈阳理工大学学报, 2008, 27(6): 14-20.
Cong Bo, Wang Yan. The Algorithm for 3D Flower Construction Based on Fractal[J]. Journal of Shenyang Ligong University. 2008, 27(6): 14-20.
- [12] 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]. 长春: 吉林农业大学, 2012.
Yan Xue. Based on the Virtual Reality Technology of Plant Growth Dynamic Simulation Key Technology Research[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2012.
- [13] 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.
Liu Dongping, Zhang Wenjun, Tian Chao, et al. A Dynamic Simulation Model of the Flower Blossom[J]. Microcomputer Application, 2010, 26(3): 3-5.
- [14] 涂晓兰. 花初期花瓣的形变模拟[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
Tu Xiaolan. Simulating the Deformation of Petals During Floral Blooming[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007.
- [15] 张铭. 三维花开过程动态模拟技术研究 with 实现[D]. 厦门: 厦门大学, 2009.
Zhang Ming. Research and Implementation of Dynamic Simulation Technology in 3-Dimensional Blooming Process[D]. Xiamen: Xiamen University, 2009.
- [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.
Huai Yongjian, Zeng xi. Visual Simulation of Morphology and Growth of Virtual Flower Plants[J]. Computer Engineering and Applications, 2012, 48(8): 185-188.
- [17] 柳有权, 王文成, 吴恩华. 快速真实地生成树的自然摇曳[J]. 计算机学报, 2005, 28(7): 1185-1191.
Liu Youquan, Wang Wencheng, Wu Enhua. Fast and Realistic Simulation for Trees Swaying in Wind[J]. Chinese Journal of Computers, 2005, 28(7): 1185-1191.
- [18] 迟小羽, 盛斌, 杨猛, 等. 秋季植物叶子表现的模拟[J]. 软件学报, 2009, 20(3): 702-712.
Chi Xiaoyu, Sheng Bin, Yang Meng, et al. Simulation of Autumn Leaves[J]. Journal of Software, 2009, 20(3): 702-712.
- [19] So Hyeon Jeong, Si-Hyung Park, Chang-Hun Kim. Simulation of Morphology Changes in Drying Leaves[J]. Computer Graphics Forum (S1467-8659), 2013, 32(1): 204-215.
- [20] 张金政, 龙雅宜. 世界名花郁金香及其栽培技术[M]. 北京: 金盾出版社, 2003: 3-10.
Zhang Jinzheng, Long Yayi. The World Famous Flower Tulip and its Cultivation Techniques[M]. Beijing: JinDun Publishing House, 2003: 3-10.
- [21] 付静. 百合的形态特征及栽培技术[J]. 现代农业科技, 2013, 22: 146-162.
Fu Jing. The Morphological Characteristics and Cultivation Techniques of Lily[J]. Mod Agric Sci Technol, 2013, 22: 146-162.
- [22] 佚名. 梔子花的形态特征与生长习性[EB/OL]. [2015-12-07]. <http://www.zhiwuwang.com/news/show.php?itemid=94493>.
Anonymous. The Morphological Characteristics and Growth Habits of Gardenia[EB/OL]. [2015-12-07]. <http://www.zhiwuwang.com/news/show.php?itemid=94493>.
- [23] 张行言, 王其超. 荷花品种的形态特征及生物学特性的初步观察[J]. 园艺学报, 1966, 2: 89-102.
Zhang Xingyan, Wang Qichao. Preliminary Observation on Morphological Characteristics and Biological Characteristics of Water Lily Varieties[J]. Acta Horticulturae Sinica, 1966, 2: 89-102.
- [24] 刘方农, 刘联仁. 兰花的形态、生活和繁殖[J]. 西昌农业高等专科学校学报, 2003, 1: 23-27.
Liu Fangnong, Liu Lianren. The Morphology, Living and Reproduction of Orchids[J]. Journal of Xichang Agricultural College, 2003, 1: 23-27.
- [25] 佚名. 相机记录荷花开放全过程——高清图片[EB/OL]. [2011-12-06]. http://www.360doc.com/content/11/12/06/9/1586516_170025105.shtml.
Anonymous. The Entire Blooming Process of The Water Lily Recorded by the Camera-HD Pictures[EB/OL]. [2011-12-06]. http://www.360doc.com/content/11/12/06/9/1586516_170025105.shtml.