

引用格式:

邹一波, 褚诗贤, 葛艳, 陈明. 基于自由曲面和 L-system 的红掌生长模型[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2024, 50(1): 85–90.

ZOU Y B, CHU S X, GE Y, CHEN M. The anthurium growth model based on free-form surface and L-system [J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2024, 50(1): 85–90.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



## 基于自由曲面和 L-system 的红掌生长模型

邹一波<sup>1,2</sup>, 褚诗贤<sup>1,2</sup>, 葛艳<sup>1,2\*</sup>, 陈明<sup>1,2</sup>

(1.上海海洋大学信息学院, 上海 201306; 2.农业农村部渔业信息重点实验室, 上海 201306)

**摘要:** 针对红掌花卉生长可视化中参数难以确定的问题进行研究, 提出推导控制点的方法, 建立红掌器官模型: 采用 Bezier 曲线结合扫描成型的方法来构造叶柄模型, 采用双三次 NURBS 曲线对佛焰苞进行建模; 运用红掌的相关表型数据拟合生长函数, 提出基于红掌生长规律的微分 L-system, 可有效模拟红掌的拓扑结构和生长过程; 通过虚拟器官表示红掌器官的几何属性, 降低微分 L-system 的复杂度。试验验证提出的方法对红掌各项生长指标拟合度可达 0.89 以上, 并可对每个生长阶段的红掌进行模拟, 能有效地对红掌的生长过程进行建模。

**关键词:** 红掌; 自由曲面建模; L-system; 生长函数; 虚拟器官

中图分类号: TP391.9; S682.36

文献标志码: A

文章编号: 1007-1032(2024)01-0085-06

## The anthurium growth model based on free-form surface and L-system

ZOU Yibo<sup>1,2</sup>, CHU Shixian<sup>1,2</sup>, GE Yan<sup>1,2\*</sup>, CHEN Ming<sup>1,2</sup>

(1.College of Information Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2.Key Laboratory of Fisheries Information, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shanghai 201306, China)

**Abstract:** Aiming at the difficulty of determining the parameters in visualization of anthurium flower growth, a method for deducing control points was proposed to establish anthurium organ model in this study using Bezier curve combined with scanning molding for the leaf stalk model and bicubic NURBS curve for the flame bud model. The differential L-system based on the growth law of anthurium was proposed to simulate the topological structure and growth process of anthurium effectively by fitting the growth function with the related phenotype data of anthurium. The geometric properties of anthurium organs were represented by virtual organs to reduce the complexity of differential L-system. The experiment verified that the fitting degree of the proposed method for the growth indicators of anthurium were higher than 0.89, and it was able to simulate the growth of anthurium at each growth stage, effectively modeling the whole growth process of anthurium.

**Keywords:** anthurium; free-form surface modeling; L-system; growth function; virtual organs

对植物生长过程进行仿真, 可预测植物器官的生长数据, 且虚拟植物的引入可以增强环境的真实感。植物可视化对于智慧农业、艺术设计、数字孪生等多个行业都有着非常重要的意义<sup>[1]</sup>。

构造植物几何结构的方法有点云法<sup>[2]</sup>和数学方

法。随着三维扫描和点云技术的发展, 越来越多的研究基于点云数据进行几何重建。点云技术可以高度还原植物的原始状态<sup>[3]</sup>, 但存在着计算量过大的问题<sup>[4]</sup>。数学方法存在参数无法准确定义的问题, 导致无法高度还原植物器官的真实性。

收稿日期: 2022-09-05

修回日期: 2024-01-15

基金项目: 上海市科技创新计划项目(20dz1203800)

作者简介: 邹一波(1983—), 男, 江苏兴化人, 博士, 讲师, 主要从事虚拟现实、可视化和机器视觉研究, [ybzou@shou.edu.cn](mailto:ybzou@shou.edu.cn); \*通信作者, 葛艳, 博士, 副教授, 主要从事农业信息化研究, [yge@shou.edu.cn](mailto:yge@shou.edu.cn)

构造植物拓扑结构的方法有交互方法<sup>[5]</sup>、参考轴技术<sup>[6]</sup>和分形方法<sup>[7]</sup>。交互方法的自由度较大,但没有考虑到植物的生长过程;参考轴技术使用自动机描述状态转移,可以很好地描述植物特征,但无法描述环境影响下的植物生长形态;分形方法的代表是L-system<sup>[7]</sup>,由于植物的生长具有自相似性,通常使用L-system来描述植物的拓扑结构以及生长过程<sup>[8-9]</sup>,但L-system对几何结构的描述过于复杂且不易控制。

模拟植物生长发育的方法有物理方法<sup>[10]</sup>和基于生长函数<sup>[11]</sup>的方法。物理方法主要用于对非刚性物体进行变形模拟,缺少灵活性和通用性<sup>[10]</sup>。基于生长函数的方法可以有效模拟物体的连续变化,但要求有足够的数来拟合生长函数<sup>[11]</sup>。由于花卉形状复杂,对花卉的建模方法也无法统一。在植物器官建模上常用的方法有基于手绘草图的建模<sup>[12]</sup>、多边形网格建模及基于Bezier<sup>[13]</sup>和NUBRs<sup>[14]</sup>的自由曲面建模,其中,手绘草图要求用户有一定的绘画能力,而基于数学的方法存在控制点定义不明确的问题。

随着切花产业的快速发展,红掌因其较高的观赏价值被广泛用于切花生产中。然而,目前对于红掌可视化方面的研究较少,建立红掌可视化模型对于指导红掌种植与生产有十分重要的意义。笔者对红掌花卉生长可视化中参数难以确定的问题进行研究,提出推导控制点方法并建立红掌器官模型;再对红掌生长规律复杂的问题,提出基于红掌生长规律的微分L-system,并结合生长函数的方法模拟红掌的拓扑结构和生长过程;然后,通过虚拟器官表示几何属性,最终建立基于红掌生长规律的可视化模型,以期运用该模型有效模拟红掌各个生长阶段的状态,为红掌生产及其他花卉的可视化研究提供依据。

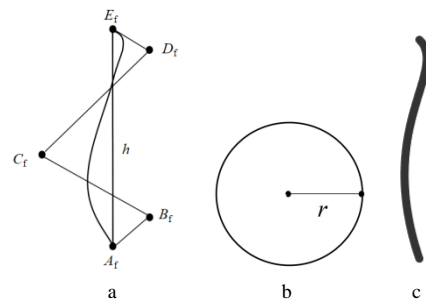
## 1 红掌器官的几何建模

### 1.1 叶柄和花萼的建模

红掌叶柄的几何结构简单<sup>[15]</sup>,长度可达20~50 cm,可以看作一个具有不规则弯曲形状的光滑圆柱体。叶柄从主茎中抽出,顶部为叶片,叶柄的生长和控制较为复杂,采用Bezier曲线结合扫描

成形的方法来构造叶柄模型。

因为红掌叶柄在顶部和底部均有较大的弯曲,所以采用5个控制点的四次Bezier曲线<sup>[13]</sup>来表示,轴线是1段圆弧,体现了叶柄的弯曲程度,控制点的选择如图1-a所示。红掌叶柄的高度为 $h$ , $A_f$ 和 $E_f$ 控制点固定,分别表示叶柄的底部和顶部, $B_f$ 控制点在垂直方向上位于 $h/6$ 的位置,水平方向上设置小于 $h/2$ 的随机偏移, $B_f$ 控制点控制叶柄底部的弯曲度; $C_f$ 控制点在垂直方向上位于 $h/2$ 的位置,可以对中间部分进行控制; $D_f$ 控制点在垂直方向上位于 $5h/6$ 的位置,水平方向上设置小于 $h/4$ 的随机偏移, $D_f$ 控制点控制着叶柄顶部(靠近叶片部位)的弯曲度,其中,任何1个控制点的移动都会改变叶柄整体形状。



a 轴线; b 截面; c 叶柄模型。

图1 红掌叶柄模型

Fig.1 Model of petiole of anthurium

红掌叶柄的顶部和根部的截面形状较为相似,故使用指定半径的圆弧轮廓来构建,半径为 $r$ ,如图1-b所示。通过轴线绕着截面扫描的方式,最终可以得到红掌的叶柄模型,如图1-c所示。通过设置截面的 $r$ 和轴线的 $h$ 来构建不同粗细、长度的叶柄模型,实现叶柄形状的多样化。因花萼的外观与叶柄类似,采用类似的方法对花萼进行建模。

### 1.2 佛焰苞和叶片的建模

红掌佛焰苞的几何形态呈光滑的心型曲面且变化较大,采用双三次NURBS曲面<sup>[16-17]</sup>进行建模。 $K$ 次NURBS曲线和基函数的定义参考文献<sup>[18]</sup>。对于自由曲面,权重没有明显的几何意义,简化为1。通过累计弦长参数法来计算节点矢量。

1) 计算2个数据点的弦长。第 $i$ 个数据点的坐标为 $(x(i), y(i))$ , $n$ 为控制点数,对 $i$ 从1到 $n-1$ 遍

历数据点计算出第  $i$  个弦长  $\text{chord}(i)$ ,  $\text{chord}(i)=\sqrt{(x(i+1)-x(i))^2+(y(i+1)-y(i))^2+(z(i+1)-z(i))^2}$ 。

2) 计算节点矢量。 $k$  是次数, 对  $i$  从  $k+1$  到  $n+k-2$  遍历弦长计算第  $i$  个节点矢量  $U(i)$ ,  $U(i+1)=U(i)+\text{chord}(i-k)/\text{sum}(\text{chord})$ 。

3) 对  $i$  从 2 到  $n-1$  开始遍历节点矢量, 根据 De Boor 算法<sup>[18]</sup>计算得到 B 样条基函数  $N$ ,  $N=\text{cal}(U)$ 。

4) 补充边界条件。 $N(1,1)=1$ ,  $N(n,n)=1$ 。

5) 求解矩阵得到控制点  $D$ 。 $D=Q/N$ 。

使用控制点, 代入 NURBS 定义方程, 得到最后的 NURBS 方程。最终构造的佛焰苞模型如图 2 所示。红掌的叶片和佛焰苞外形相似, 也采用相同的方法建模。

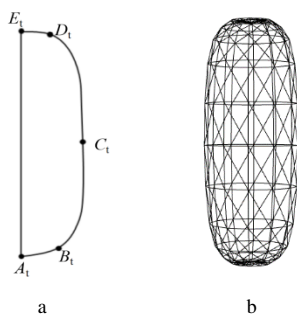


图 2 红掌佛焰苞网格模型

Fig.2 Model of buddha's flame bud of anthurium

### 1.3 花序的建模

红掌花序为肉穗花序, 呈椭球体, 花序轴对称, 可以使用样条曲线加旋转成型的方式构造。先构造花序的轮廓线, 如图 3-a 所示。采用 1.3 中的求取控制点方法构造曲线, 数据点选择花序的顶部  $E_t$  点、底部  $A_t$  点、中间点  $C_t$  和周围曲率变化较大的  $B_t$  点、 $D_t$  点, 最终计算得到花序的轮廓线; 然后将其绕着轴线  $A_tE_t$  旋转, 即可获得花序, 如图 3-b 所示。



a 控制点和轮廓线; b 花序网格模型。

图 3 红掌花序模型

Fig.3 Inflorescence model of anthurium

### 1.4 真实性处理

完成红掌器官建模后, 对模型进行颜色渲染、纹理映射和光照处理等真实性处理。

为了模拟模型受到光照后的阴影效果, 选择具有漫反射效果的 Lambert<sup>[19]</sup>材质来模拟光照效果。

为了模拟红掌真实条件下的光照效果, 在光照模型中使用环境光和平行光来模拟种植条件下的太阳光。平行光  $I_{id}$  以  $\theta$  角度射入,  $\theta$  角度通过式 (1) 计算获得。

$$\theta = \frac{t \bmod(T_{\text{day}})}{T_{\text{day}}} \times 2\pi - \frac{\pi}{2} \quad (1)$$

式中:  $t$  为当前时间的时戳;  $T_{\text{day}}$  为 1 d 的时戳。

最后将  $\theta$  角度代入 Lambert 光照模型公式<sup>[19]</sup>计算出漫反射光强。最终产生的 Lambert 模型的光照强度为环境光和漫反射光的叠加。

## 2 红掌拓扑结构构建和生长可视化

### 2.1 红掌生长函数

在理想的环境下通常采用 Logistic 方程对植物生长进行描述, 但 Logistic 方程存在隐式表达形式<sup>[20]</sup>, 因而采用 Hermite 形式方程<sup>[21]</sup>来替代。

红掌生长过程中, 器官形成期( $0 \leq t \leq T_1$ ,  $T_1$  为开始快速生长的时间), 器官变化缓慢; 器官快速生长期( $T_1 < t \leq T_2$ ,  $T_2$  为停止快速生长的时间), 器官快速生长; 器官成熟期( $t > T_2$ ), 器官变化又趋于平缓。为了方便起见, 红掌生长函数可以简化为公式(2)。

$$A(t) = \{a, b, c, d, T_1, T_2, A(T_1), A(T_2)\} \quad (2)$$

式中:  $A(t)$  为某一红掌器官生长函数;  $a$ 、 $b$ 、 $c$  为拟合后的参数;  $d$  为函数截距;  $A(T_1)$  为生长初始值;  $A(T_2)$  为生长的最大值。

### 2.2 基于 L-system 的红掌拓扑模型

红掌花和叶子轮流生长<sup>[22]</sup>, 生长过程存在一定的自相似性, 体现了红掌花卉的分形特征。为呈现逐渐生长的效果, 采用微分 L-system 进行建模。参照文献[23], 在微分 L-system 中,  $V$  为 L-system 中所有出现的符号的含义,  $W$  为系统中的初始状态和初始参数,  $P$  为系统迭代的规则, 以时间( $t$ )和红掌器官的生长阶段( $n$ )作为自变量<sup>[24]</sup>, 红

掌的 L-system 规则如下。

$$V: \{S(t,n), O(t,n), L(t,n), I(t), K(t), B(t), R(t), V(t), F(t), t, [, ], n, \max\}$$

$$W: \{S(0,0), \max, t=0\}$$

$$P: \{P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6, P_7, P_8, P_9, P_{10}\}$$

$$P_1: S(t,n): n \times T_2 < t \leq (T_1 + n \times T_2) \&\& n < \max \rightarrow S(t, n+1) I(t) \text{random}(2,5) \times [O(t, n+1) L(t, n+1)]$$

$$P_2: L(t,n): n < \max \rightarrow K(t) B(t)$$

$$P_3: O(t,n): (T_1 + (n-1) \times T_2) < t \leq n \times T_2 \&\& n < \max \rightarrow R(t) [V(t)] [F(t)]$$

$$P_4: I(t) \rightarrow I(t+dt) \text{// 主茎}$$

$$P_5: K(t) \rightarrow K(t+dt) \text{// 叶柄}$$

$$P_6: B(t) \rightarrow B(t+dt) \text{// 叶片}$$

$$P_7: R(t) \rightarrow R(t+dt) \text{// 花葶}$$

$$P_8: V(t) \rightarrow V(t+dt) \text{// 佛焰苞}$$

$$P_9: F(t) \rightarrow F(t+dt) \text{// 花序}$$

$$P_{10}: t=t+1$$

在 L-system 中, 可以将红掌植株视作一个整体, 其中  $S(t,n)$  表示  $n$  阶段下生长时间为  $t$  的红掌主茎部分;  $O(t,n)$  表示  $n$  阶段下生长时间为  $t$  的花芽;  $I(t)$  为主茎生长函数;  $K_i$ 、 $B_i$ 、 $R_i$ 、 $V_i$ 、 $F_i$  分别表示采用对应的函数  $K(t)$ 、 $B(t)$ 、 $R(t)$ 、 $V(t)$ 、 $F(t)$  构造的第  $i$  个叶柄、叶片、花葶、佛焰苞和花序;  $\max$  控制着红掌最大的迭代生长次数, 通过每一轮的迭代生长, 不断地抽生新的叶片和花。当叶片的  $n$  为 2 时, 表示该叶片是第 2 轮迭代产生的,  $n$  为 2 的叶片会快速生长, 而  $n$  为 1 的叶片已经成熟, 生长趋于缓慢。

此外, 在产生式中使用  $T_1$ 、 $T_2$  分别表示红掌结束长叶和结束开花的时间节点。当生长时间在  $[n \times T_2, (T_1 + n \times T_2)]$  中时, 红掌处于长叶期, 主茎会产生新的叶芽, 叶芽产生叶柄和叶片, 并且主茎缓慢生长, 红掌花将会在叶腋  $O(t,n)$  中产生, 在这个时间周期内红掌只会长出新叶; 而在  $[(T_1 + (n-1) \times T_2), n \times T_2]$  周期内, 红掌进入开花阶段, 叶腋中抽生花芽, 花芽抽生出花葶、佛焰苞和花序。至此, 红掌整体逐步被拆分为多个有着生长规律的子单元, 通过微分方程进行生长的控制, 通过时间进行生长顺序的控制。

## 2.3 基于微分 L-system 的红掌虚拟器官模型

鉴于 L-system 尚无法准确表示红掌器官的倾斜角度、位置和面积等几何信息, 因而采用虚拟器官<sup>[25]</sup>来表示器官的几何结构。通过基于微分 L-system 的红掌虚拟器官模型, 在虚拟器官中定义红掌器官的拓扑属性和几何属性。虚拟器官的数据结构表示为式(3)。

$$VO_i = \{\text{type}, \text{parentPart}, \text{childrenParts}, \text{age}, \text{level}, \text{mesh}\} \quad (3)$$

式中:  $VO_i$  为第  $i$  个虚拟器官;  $\text{type}$  为虚拟器官的类型;  $\text{parentPart}$  为父节点;  $\text{childrenParts}$  为孩子节点;  $\text{age}$  为器官的年龄, 用来查询相关的生长函数进行形变;  $\text{level}$  为该节点所在迭代周期;  $\text{mesh}$  保存节点对应的几何信息, 包括几何模型、纹理贴图、 $uv$  坐标、旋转角度和起始位置。

输入时间  $t$ , 输出生长时间为  $t$  的红掌模型。

1) 根据  $\text{type}$  查看对应的生长函数, 更新几何模型, 进行渐变。

2) 判断产生式执行条件是否满足, 满足则跳转 3, 不满足则跳转 4。

3) 执行产生式, 将新节点加入当前父节点的孩子节点中。

4) 循环遍历所有孩子节点。

5)  $t=t+1$ , 更新时间, 跳转到 1。

## 3 红掌建模结果

以 Visual Studio Code 为开发平台, JavaScript 为开发语言, 基于 WebGL 三维图形引擎开发红掌器官和生长模型。

在红掌器官的建模中, 以佛焰苞下边缘部分的数据点为例, 求取控制点, 最终控制点如图 4 所示。图 5-a 为 3 维视角, 图 5-b 为 2 维视角。其中数据点为  $[(-10.00, 0.00, 3.00), (-5.00, -5.00, 1.50), (0.00, 0.00, 0.00), (5.00, -5.00, 1.50), (10.00, 0.00, 3.00)]$ , 求得控制点  $[(-10.00, 0.00, 3.00), (-10.00, 0.00, 3.08), (-4.28, -10.00, 1.46), (-0.01, 5.00, -0.74), (4.32, -10.00, 1.50), (9.92, 0.00, 3.00), (10.00, 0.00, 3.00)]$ 。可见, 最终拟合的曲线可较好地反映佛焰苞的下边缘部分。通过该方法可构造出红掌各个器官的模型。

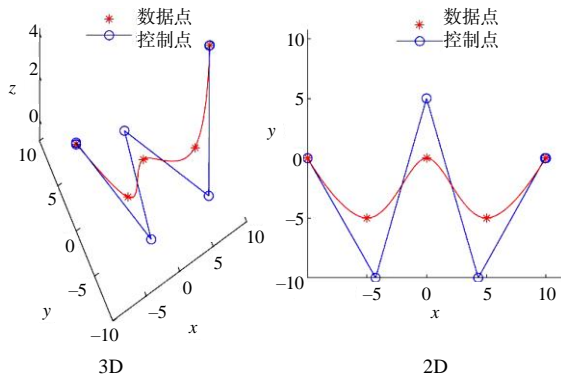


图 4 数据点推导的控制点

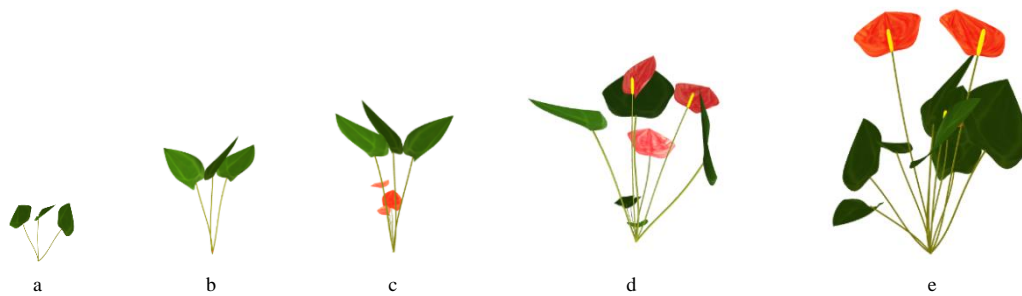
Fig.4 Control points derived from data points

运用 sklearn 工具对红掌的花葶长度、佛焰苞宽度、佛焰苞长度等数据进行拟合，拟合的多项式形式生长函数具体参数如表 1 所示， $R^2$  均大于 0.85，表明拟合效果好，拟合的生长函数可有效表示原数据。多项式形式生长函数可以有效表示器官初始值和最大值，防止过拟合。在微分 L-system 中使用生长函数，并结合虚拟器官最终可以模拟出红掌各阶段的生长形态。模拟结果如图 5 所示。

表 1 Hermite 形式生长函数参数和拟合程度

Table 1 Hermite growth function parameters and degree of fitting

指标	$a$	$b$	$c$	$d$	$T_1$	$T_2$	$A(T_1)$	$A(T_2)$	$R^2$
花葶长度	-1.65	1.16	-0.09	0.79	0	240	0	15.0	0.92
佛焰苞宽度	0.63	-0.03	0.01	0.08	0	240	0	5.5	0.93
佛焰苞长度	1.12	-0.12	0.01	0.86	0	240	0	9.0	0.89



a、b 幼苗期；c 开花阶段前期；d 开花阶段中期；e 花期长叶阶段。

图 5 红掌各生长阶段的模拟结果

Fig.5 Simulation results of anthurium at each growth stage

图 5-a 和图 5-b 为幼苗期的红掌模型；图 5-c 和图 5-d 分别为红掌处于开花阶段前期和中期的模型；图 5-e 为花期长叶阶段的生长模型。为了保证生长的随机性，为每个节点都设置随机的偏移

角度。在增加了光照模型后，可以模拟出 1 d 中不同时间点的红掌状态，结果如图 6 所示。与真实红掌图片相比，模拟结果的模拟效果较逼真。



a、b、c、d、e 模拟图片；f 真实红掌图片。

图 6 红掌 1 d 内光照模拟结果

Fig.6 Illumination simulation results of anthurium in one day

## 4 结论

笔者提出了红掌花卉的可视化方法:运用计算机图形的相关技术构造了红掌的器官,结合反求工程解决了曲面控制点难以选择的问题;通过真实性处理,使得红掌器官模型更加逼真;通过基于微分 L-system 的虚拟器官模型和生长函数构建了红掌的生长模型,实现了红掌逐步生长的效果。该方法较好地模拟了红掌在自然条件下的生长情况。然而,在数据采集等方面还存在一定误差,且未考虑到光照、温度等环境因素的影响。基于以上研究,后续工作将集中研究植物与环境因素的交互关系,使得红掌生长模型更加真实。

### 参考文献:

- [1] 淮永建,孟庆阔,陈园园,等. 真实感林木建模方法研究综述[J]. 北京林业大学学报, 2022, 44(8): 134-146.
- [2] ZHENG Q, FAN X C, GONG M L, et al. 4D reconstruction of blooming flowers[J]. Computer Graphics Forum, 2017, 36(6): 405-417.
- [3] 陆健强,兰玉彬,毋志云,等. 植物三维建模 ICP 点云配准优化[J]. 农业工程学报, 2022, 38(2): 183-191.
- [4] 张文麒,吴升,郭新宇,等. 植株自旋转多视角重建技术在小麦植株三维表型获取中的应用评估[J]. 中国农业科技导报, 2022, 24(8): 87-98.
- [5] 马玲,李书杰,刘晓平. 基于简单手绘的树木快速建模[J]. 系统仿真学报, 2017, 29(8): 1667-1676.
- [6] DE REFFYE P, HU B G, KANG M Z, et al. Two decades of research with the GreenLab model in agronomy[J]. Annals of Botany, 2021, 127(3): 281-295.
- [7] GUO J W, JIANG H Y, BENES B, et al. Inverse procedural modeling of branching structures by inferring L-systems[J]. ACM Transactions on Graphics, 2020, 39(5): 155.
- [8] 杨乐,彭军,杨红云,等. 基于微分 L-系统的水稻根系三维生长模型研究[J]. 农业机械学报, 2019, 50(10): 208-214.
- [9] PRUSINKIEWICZ P, CIESLAK M, FERRARO P, et al. Modeling plant development with L-systems[M]//MORRIS R. Mathematical Modelling in Plant Biology. Cham: Springer, 2018: 139-169.
- [10] 陆声链,赵春江,郭新宇,等. 基于物理的植物器官实时变形模拟[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(24): 6587-6591.
- [11] JUHARI J, ALGHAR M Z. Modeling plant stems using the deterministic lindenmayer system[J]. CAUCHY: Jurnal Matematika Murni Dan Aplikasi, 2021, 6(4): 286-295.
- [12] ANASTACIO F, SOUSA M C, SAMAVATI F, et al. Modeling plant structures using concept sketches[C]//ACM. Proceedings of The 4th International Symposium on Non-Photorealistic Animation And Rendering. Annecy, France: ACM, 2006: 105-113.
- [13] 王菁. 虚拟花卉形态建模方法研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2013.
- [14] WANG S Y, PAN J J, BAI J X, et al. Flower factory: a component-based approach for rapid flower modeling[C]//2020 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality(ISMAR). Porto de Galinhas, Brazil: IEEE, 2020: 12-23.
- [15] 孙君梅. 红掌生长特性及苗期无土栽培技术的研究[D]. 海口: 海南大学, 2010.
- [16] 孙晨阳. 小麦生长的三维可视化建模方法研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2019.
- [17] 伍艳莲,曹卫星,汤亮,等. 基于 OpenGL 的小麦形态可视化技术[J]. 农业工程学报, 2009, 25(1): 121-126.
- [18] 叶丽,谢明红. 采用积累弦长法拟合 3 次 NURBS 曲线[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2010, 31(4): 383-387.
- [19] 淮永建,张晗,张帅. 面向 VR 应用的花卉植物物理渲染技术研究与应用[J]. 电子与信息学报, 2018, 40(7): 1627-1634.
- [20] 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.
- [21] BIELEFELDT B R, AKLEMAN E, REICH G W, et al. L-system-generated mechanism topology optimization using graph-based interpretation[J]. Journal of Mechanisms and Robotics, 2019, 11(2): 020905.
- [22] 杨克彬. 日光温室切花红掌品种筛选及关键配套栽培技术研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2017.
- [23] CIESLAK M, PRUSINKIEWICZ P. Gillespie-Lindenmayer systems for stochastic simulation of morphogenesis[J]. In Silico Plants, 2019, 1(1): diz009.
- [24] 张慧春,王国苏,边黎明,等. 基于光学相机的植物表型测量系统与序生长模型研究[J]. 农业机械学报, 2019, 50(10): 197-207.
- [25] 刘骥,朱庆生,曾令秋,等. 基于虚拟器官的植物可视化[J]. 系统仿真学报, 2010, 22(10): 2363-2367.

责任编辑: 邹慧玲  
英文编辑: 柳正