

doi:10.11937/bfyy.20174417

## 日光温室郁金香 3D 可视化模型研究

程 陈<sup>1</sup>, 韩 硕<sup>2</sup>, 伍 露<sup>1</sup>, 王春雷<sup>1</sup>, 叶彩华<sup>2</sup>, 刘海鹏<sup>3</sup>

(1. 中国农业大学 资源与环境学院, 北京 100193; 2. 北京市气象局 北京市气候中心, 北京 100089;

3. 北京市国际鲜花港 景观设计部, 北京 101399)

**摘 要:**基于郁金香不同品种、不同播期的 2 个生长季试验材料,采用 L-System 建模方法,构建了郁金香 3D 可视化模拟模型,以期对郁金香的形态结构分析提供科学参考。结果表明:通过构建郁金香生长发育的 L-System,利用郁金香器官的拓扑结构确定了各个器官的位置关系和连接方式,利用 NURBS 曲线建立郁金香茎的仿真模型,并利用三次 Bezier 曲面的原理,构建了郁金香的单叶片和单花被曲面模型,得到了郁金香 3D 可视化模拟效果图。

**关键词:**温室;郁金香;结构;模拟模型;3D 可视化

**中图分类号:**S 682.2<sup>+</sup>63 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0009(2018)13-0074-06

郁金香 3D 可视化模型表现出其特有的生长特性,能动态地再现自然景物丰富的细节和随机变化。在国外,Green Lab 可模拟植株生物量生产与基于植株拓扑结构的生物量分配,以及器官生物量积累与器官形态的关系,模拟植物结构功能过程,可以比较精确地模拟植物生长<sup>[1]</sup>。加拿大 Calgary 大学开发的植物模拟软件 CPGF 和 L-Studio 功能较强,能生成各种植物图形<sup>[2-3]</sup>。在国内,陆汝铃<sup>[4]</sup>提出了广义 L-系统,包括有线字母集(细胞)、有限正整数集(裂变周期)、有限产生式集(裂变规则)、g(环境元素)和  $\omega$ (生物起源)5 部分。李庆忠等<sup>[5]</sup>使用 L 系统与 IFS 相互融合的方法模拟植物形态,利用 L 系统进行植物生长规律和拓扑结构分析。袁晓敏等<sup>[6]</sup>阐述了应用于园艺植物真实感绘制方面的技术,并对园艺植物

可视化的发展趋势进行了展望。

国内外基于不同建模算法构建 3D 可视化模型的研究越来越多<sup>[5,7-12]</sup>,但是对于郁金香 3D 可视化模型的研究甚少。该研究通过温室试验、收集数据,对郁金香外观形态进行了较为细致的定量化表达,以期展示用户或虚拟环境需要的三维植物,也能够表现郁金香在不同环境下的结构差异以及在给定生长环境下的结构动态变化<sup>[13]</sup>。

### 1 材料与方法

#### 1.1 试验地概况

试验地点为北京顺义区杨镇国际鲜花港 B2 日光温室基地(北纬 40°10'27",东经 116°47'41",海拔 38 m),属于暖温带半湿润大陆季风气候。年平均气温 11.5℃。

#### 1.2 试验材料

供试郁金香(*Tulipa gesneriana* L.)品种共计 5 个,具体生物特性见表 1。

试验采用无土水培箱栽培,宽 38.0 cm,长 57.0 cm,高 17.5 cm,针盘底距箱底 3.0 cm,针高 1.0 cm。在插盘之前用 NaOH 溶液消毒 3 次。温室总面积为 5 000 m<sup>2</sup>,采用南北负压式通风和湿帘窗风机强制通风降温,阳光板材用聚碳酸酯

**第一作者简介:**程陈(1993-),男,安徽合肥人,博士研究生,研究方向为作物生长发育模拟模型。E-mail:chengc1993@cau.edu.cn.

**责任作者:**叶彩华(1968-),女,福建南平人,教授级高级工程师,研究方向为农业气象与遥感应用和生态气象。E-mail:YCH681012@126.com.

**基金项目:**北京市气象局 2016—2017 北京市财政资助项目(PXM2016\_151102\_000009)。

**收稿日期:**2018-02-24

表 1 供试品种生物特性

Table 1 Biological features of the experiment varieties

品种 Variety	品种特性 Characteristic	花瓣颜色 Petal color	品系 Strain
“粉色印象”‘Pink Impression’ (PI)	早花	粉色	‘达尔文’
“硕大粉红”‘Huge Pink’ (HP)	中花	粉色	‘达尔文’
“白日梦”‘Daydream’ (D)	中花	橙色	‘达尔文’
“艾斯米”‘Esmee’ (E)	晚花	红色	‘达尔文’
“夜皇后”‘Queen of Night’ (AW)	非常晚花	紫色	‘单瓣晚花’

中空板(PVC板)覆盖,密封件连接。

### 1.3 试验方法

试验 I:2016 年 5 月 8—28 日为冷库生根期,2016 年 5 月 28 日至 6 月 27 日为温室栽培期。采用随机区组设计,1 个品种(“硕大粉红”),2 个密度梯度(388 株·m<sup>-2</sup>和 443 株·m<sup>-2</sup>),3 次重复,总共 16 个小区,栽培管理参照正常管理水平。

试验 II:2016 年 10 月至 2017 年 4 月进行,采用随机区组设计,4 个品种(“粉色印象”“白日梦”“艾斯米”“夜皇后”),密度梯度 388 株·m<sup>-2</sup>,3 次重复,分 3 个播期进行试验:早播(EP)为 2016 年 12 月 19 日播种,2017 年 2 月 3 日移入温室;中播(MP)为 2016 年 12 月 29 日播种,2017 年 2 月 13 日移入温室;晚播(LP)为 2017 年 1 月 8 日播种,2017 年 2 月 23 日移入温室,总共分为 36 个小区。

#### 1.3.1 L-系统(Linden Mayer-System)

确定郁金香生长过程初始状态与描述规则,进行有限次数的迭代,生成字符发展序列以表现其拓扑结构,并对产生的字符串进行几何解释,从而生成分形图形<sup>[5,7,14]</sup>。

#### 1.3.2 Bezier 曲面建模

三阶 Bezier 曲线的一般参数表达式为:

$$P(x, y) = \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 P_{ij} B_{i,3}(x) B_{j,3}(y), \\ x, y \in [0, 1].$$

此时每条曲线的初始控制点均为 4 个。需定义一个 4×4 的控制点点阵及 2 个分量  $v$  和  $t$ 。沿分量设置一定的细分度,计算在分量  $v$  的方向上沿平行曲线的点,再用这些点计算在分量  $t$  方向上的点,将这些点连结成三角形,画出 Bezier 曲面。设定的细分度越高,计算量越大,曲面的平滑

度也就越高。

利用双三次 Bezier 曲面,可以完成郁金香叶片、花被片等的建模。结合器官分布模型,可以绘制出叶群和花朵,从而完成单株郁金香模型的建立。由于郁金香的叶片数目较少,不同节位的叶片曲面存在一定形态差距,可通过多种形态的曲面进行初始化定义,从而得到可调用的不同几何曲面。

#### 1.3.3 NURBS(Non-Uniform Rational B-Splines) 曲面建模

NURBS 指一个控制顶点的影响力范围能够改变,每个可通过 NURBS 创建的曲线或曲面都可以通过有理多项式来进行表达和定义,并通过内插方法实现多个点之间的连线,最终完成郁金香茎的建模。

### 1.4 项目测定

根:最大根长。

叶:展叶数(叶长>0.08 m);不同叶位的叶长(叶片长度日增长量<1 mm);不同叶位的叶片最大宽度;不同叶位的叶片相对倾角与绝对倾角;叶片间相对方位角。

茎:抽生节间数;各节点与种球顶部的距离;各茎粗。

种球:种球高度。

花:花颈长度(第四叶鞘到花蕾基部)、花颈粗度(花蕾基部以下 5 cm)、蕾长和蕾茎(花蕾中部最大直径);花瓣长度和宽度。

形态结构的测定包括节位顺序的测定和几何形态测定。

节位顺序的测定:依据 L-系统的编写规则,梳理郁金香植株各个器官的发生顺序、发生节位并进行编号(主茎号、叶片号),测定各器官的几何构型,通过多角度拍照记录器官分离后的形态。

倾角测定:确保所测器官轴线与其所在主茎/分枝的轴线在同一平面内,然后利用量角器测定 2 条轴线之间的夹角,规定角度的正方向,倾角绝对值的取值范围为 0°~180°,与正方向同向的为正角度,与正方向相反的为负角度。

方位角测定:绝对方位角即某器官轴线在水平地面的投影与正北方向的夹角,绝对方位角的取值范围为 0°~±180°;剖面夹角方位角,即在水平剖面上(法线为地平面的垂线),2 个节位相邻

的器官所夹的角度(以最下面的叶片为基础,依次向上,总和为 $360^\circ$ ),取值范围为 $0^\circ\sim\pm 180^\circ$ ,测量之前需要规定正方向。

## 1.5 数据分析

### 1.5.1 数据分析软件

运用 Excel 5.0 软件、SPSS 11.0 统计分析软件对试验数据进行  $T$  检验、方差分析和函数回归分析,并制作数据曲线图。运用 Sufer 7.0、3DsMAX、GroImp、Photoshop 图像处理软件对各个器官的三维空间数据进行分析并绘制三维图形。

### 1.5.2 程序编写软件

建模语言使用基于 Fortran 的模拟编程语言 FST(The Fortran Simulation Translator)。该语

言是荷兰 Wageningen 大学开发的专门进行作物系统模拟的高级语言,使用非常简单、方便。

## 2 结果与分析

### 2.1 郁金香器官可视化建模

#### 2.1.1 花的结构模拟

郁金香的花瓣为双层镊合状排列,花被 6 枚,2 轮排列。将 Bezier 曲面的细分度设置为 7,需要连结  $8\times 8=64$  个点,共构建 98 个空间三角域。为保持花被片的自然性,采用随机塌陷函数调整部分初始控制点的位置,使萼片观感更为自然,如图 1 所示。

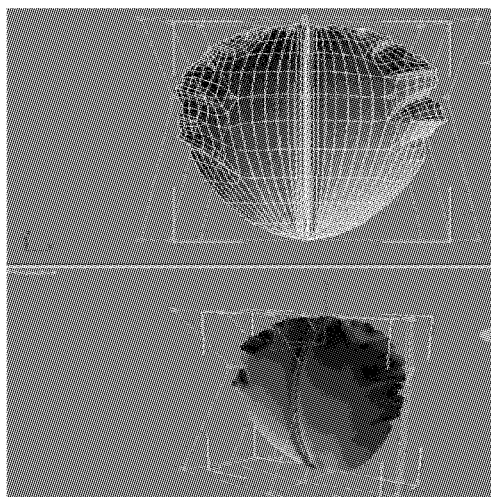
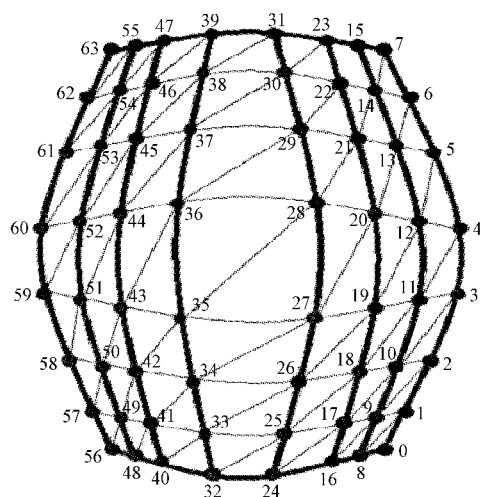


图 1 7 层细分度 Bezier 曲面模式图(左)及其在 3DsMAX 中的实现(右)

Fig. 1 The Bezier surface layer subdivision degrees model (left) and its implementation in 3DsMAX (right)

#### 2.1.2 茎的结构模拟

郁金香叶片的着生基点称为节,该研究中郁金香品种均为 5 个节。郁金香的茎截面直径随着茎节位数值的增长而减小;顶端花茎的横截面直径较小,较为纤细。花期内(6 月 6—15 日),1~5 节位的平均直径分别为 9.6、8.1、7.2、6.7、6.3 mm(图 2)。

直立的郁金香茎可视为一个圆锥体,通过回归分析,可得到郁金香第  $x$  节位茎的横截面直径为  $y = -0.805x + 9.9926$  ( $R^2 = 0.9414$ )。式中, $y$  为郁金香茎节横截面直径(mm), $x$  为节位顺序。

在郁金香生长过程中,由于花冠受重力或环境影响导致器官茎并不能保持直立生长,这种情况下郁金香茎的生长则是一条曲线。利用 NURBS 曲线,即非均匀有理 B 样条来对弯曲的郁金香茎进行模拟(图 3)。

#### 2.1.3 叶的结构模拟

郁金香的叶片为单叶呈卵圆形,一般的品种具有 3~5 叶,其中有 2~3 片叶着生在基部,互生或轮生。利用 3DsMAX 进行模式绘制,简单模式的郁金香单叶空间弯曲度可将轴线按正弦函数进行拟合,拟合效果如图 4 所示。

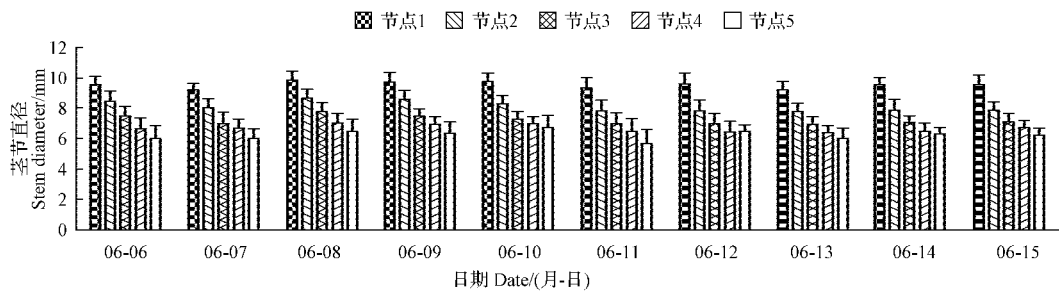


图 2 郁金香花期内各茎节间直径对比

Fig. 2 Diameter of tulip stems during the flowering duration

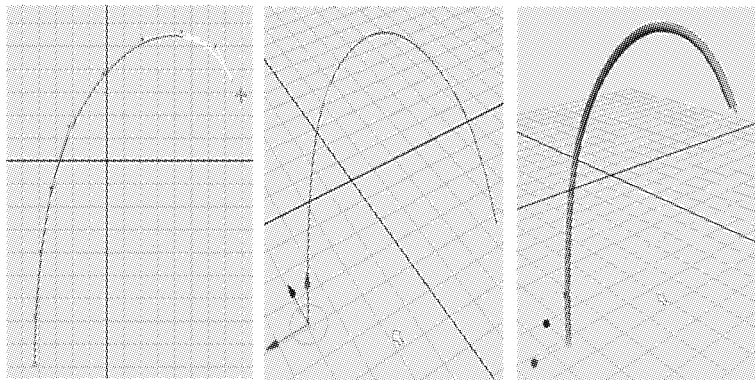


图 3 NURBS 中的 CV 曲线构建弯曲的郁金香茎/花丝模型

Fig. 3 Tulip stem/filaments simulation model based on CV bending curve in NURBS

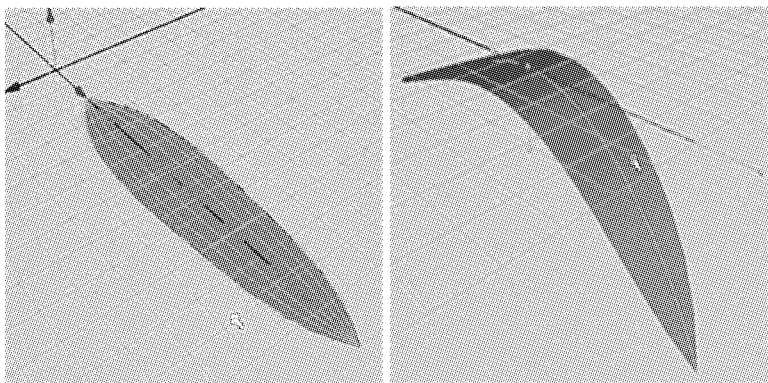


图 4 单个叶片初步曲面建模结果

Fig. 4 A single blade preliminary sketch surface modeling results

2.2 色彩渲染以及个体模拟

按照 L-System 规则进行组合,得到完整的郁金香结构曲面模型(图 5)。

真实感和仿真度是衡量可视化植物模型的重要指标<sup>[14-15]</sup>。真实感绘制主要是通过计算机的

色彩渲染从光照、纹理、阴影等方面增加虚拟植物模型的视觉逼真度和存在感,从而实现真实物体的再现。

植物器官的纹理是决定植物真实感的重要因素。通过照片中对物体纹理数字化的提取,再结

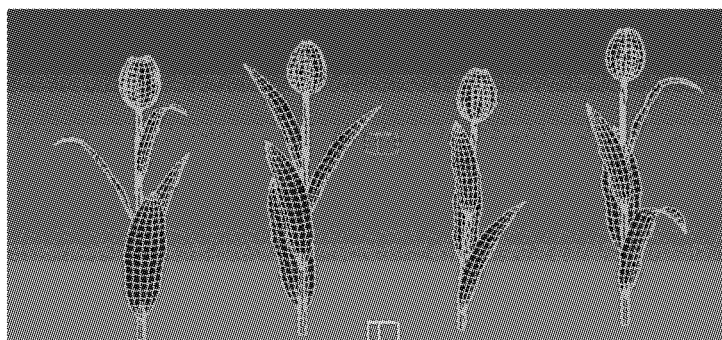


图5 曲面建模方法建立的郁金香可视化模型

Fig. 5 The tulip visualization model built by method of curved surface modeling

合 3DsMAX 软件中的纹理贴片功能,可将照片中提取到的纹理信息直接赋予曲面模型,达到真实化的仿真。由于照片中的器官纹理是在给定视场中提取出来的,其自身带有一定的弯曲弧度,当进行再次映射时,会导致纹理的初始投影坐标发生偏差,尤其是外层纹理会发生过度的收缩后膨胀。因此在采用图像分割的方法获取郁金香组织器官的纹理图像时,要通过 Photoshop 等图像处理软件进行自由节点的调整,使花被片的纹理信息处于平展状态,然后再映射到曲面模型上。郁金香花冠外侧纹理的提取步骤如图 6 所示。

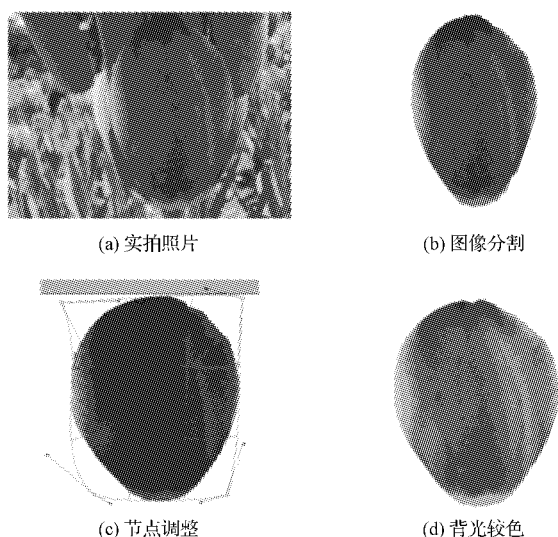


图6 郁金香花冠纹理提取步骤

Fig. 6 The extraction steps of tulip corolla texture

利用 3DsMAX 软件中的 V-ray 渲染功能,采用伦布郎自然光源对仿真植物进行照射,模拟自然光源下植物的色彩,添加纹理和渲染后的郁金香可视化模型效果如图 7 所示。



图7 经过渲染和纹理投影后的单株郁金香模拟效果

Fig. 7 Single plant simulation of tulips after rendering and texture projection

### 3 讨论与结论

计算机生长发育模拟技术给郁金香 3D 可视化模拟模型的建立提供了一个新的方向,大量曲面建模和图像信息化提取方法的运用使得可视化模型能够较容易地被计算机图形语言识别并进行转录,使植物模型的建立周期更短,更为便捷,也比传统的算法模型更加直观逼真,为郁金香不同生产管理措施下的生长仿真提供参考。

该研究对郁金香形态结构进行了可视化模拟。首先通过试验对郁金香的形态学规律进行观察,构建郁金香生长发育的 L-System,利用郁金

香器官的拓扑分布结构确定各个器官的位置关系和连接方式,结合试验测量的形态学数据得到初级拓扑结构模型。该方法具有一定的通用性,可推广到其它花卉植物中。其次,利用三次 Bezier 曲面的构建原理方法构建了郁金香的单叶片和单花被曲面模型。再次,利用 NURBS 曲线建立了郁金香茎的仿真模型,取得了较好的可视化模拟效果。最后,通过对照片影像加工,提取得到了郁金香主要器官的纹理,并通过自然光渲染方法模拟出日光照射下单株郁金香和郁金香群体的视觉影像,并给出了可视化模型的最终效果图。

在未来的研究方向应该将郁金香各个器官更细致化的描述。该模型若加入对郁金香形态变化和生长规律的控制,就能够在生育进程角度上更为逼真地对郁金香进行模拟,从而可实现从气候条件、种内/种间竞争、人为管理甚至基因表达等多种因素综合分析植物的生长进程,使郁金香的生长发育研究进入到更深的层次中。

(该文作者还有李奕卓、彭明喜,工作单位同第一作者。)

## 参考文献

- [1] MARCELISLFM, HEUVELINK E. Concepts of modeling carbon allocation among plant organs[J]. Wageningen UR Frontis Series, 2007(22):103-111.
- [2] SIEVÄNEN R, NIKINMAA E, NYGREN P, et al. Components of functional-structural tree models[J]. Annals of Forest Science, 2000, 57(5):399-412.
- [3] LEWISP. 3D canopy modelling as a tool in remote-sensing research[J]. Frontis, 2007(22):219-229.
- [4] 陆汝铃. 广义 L 系统[J]. 中国科学(技术科学), 2002, 32(4):530-540.
- [5] 李庆忠, 韩金姝. 一种 L 系统与 IFS 相互融合的植物模拟方法[J]. 工程图学学报, 2005, 26(6):135-139.
- [6] 袁晓敏, 温维亮, 郭新宇, 等. 园艺植物可视化研究进展[J]. 中国农业科技导报, 2011, 13(6):90-98.
- [7] 刘振兴. 基于结构-功能和 L-系统的植物仿真建模[D]. 天津:天津工业大学, 2008.
- [8] 王菁. 虚拟花卉形态建模方法研究[D]. 北京:北京工业大学, 2013.
- [9] 国红, 雷相东, 刁军. 林木结构-功能模型研究综述[J]. 世界林业研究, 2010, 23(2):55-60.
- [10] 林形省. 基于 L 系统的虚拟植物生长算法研究及软件实现[D]. 杭州:浙江大学, 2008.
- [11] 高思聪, 陈刚, 付忠良, 等. 龙眼幼苗的虚拟植物生长发育模拟模型[J]. 计算机应用, 2013, 33(s2):220-223.
- [12] 黄文岳. 芦苇生长模型及其可视化研究[D]. 镇江:江苏大学, 2009.
- [13] 康孟珍. 植物功能结构模型研究的回顾与展望[J]. 系统仿真学报, 2012, 24(10):2039-2048.
- [14] JACKSONCAL, ROTEVATN A. 3D seismic analysis of the structure and evolution of a salt-influenced normal fault zone: A test of competing fault growth models[J]. Journal of Structural Geology, 2013, 54(17):215-234.
- [15] TVEDT A B M, ROTEVATN A, JACKSON A L, et al. Growth of normal faults in multilayer sequences: A 3D seismic case study from the Egersund Basin, Norwegian North Sea[J]. Journal of Structural Geology, 2013, 55(5):1-20.

## Study on 3D Visualization Simulation Model of Solar Greenhouse Tulip

CHENG Chen<sup>1</sup>, HAN Shuo<sup>2</sup>, WU Lu<sup>1</sup>, WANG Chunlei<sup>1</sup>, YE Caihua<sup>2</sup>, LIU Haipeng<sup>3</sup>, LI Yizhuo<sup>1</sup>, PENG Mingxi<sup>1</sup>

(1. College of Resources and Environment, China Agricultural University, Beijing 100193; 2. Beijing Climate Center, Beijing Meteorological Bureau, Beijing 100089; 3. Landscape Design Department, Beijing International Flower Harbor, Beijing 101399)

**Abstract:** Based on the tulip experiment data in two growing seasons with different varieties and sowing dates, the 3D visualization simulation model for the tulip adopted L-System modeling method was built to provide scientific references with morphology analysis. The results showed that, by building the L-System of tulips growth, the topology structure of tulip organs were built to determine the position relationship and connection mode. The tulip stem simulation model was built based on NURBS curve, and the single blade and floral envelope surface model was built by using the principle of three times the Bezier surface. Finally, the tulip 3D visualization rendering was simulated.

**Keywords:** greenhouse; tulips(*Tulipa gesneriana* L.); structure; simulation model; 3D visualization