

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.12.037

# 番茄植株三维形态精确重构研究\*

袁晓敏 赵春江 温维亮 郭新宇 陆声链 魏学礼

(国家农业信息化工程技术研究中心,北京 100097)

**【摘要】** 为实现番茄形态的数字化设计与可视化模拟,通过对番茄进行长期的观察测量与分析,提出了对实测数据统计分析的基础上进行器官模板分类的几何建模方法。对叶片和侧枝进行了分类,每种分类都建立模板库。依据番茄器官的主要形态特征,提取器官几何模型的主控参数。结合模板技术实现了番茄主要器官和植株三维形态结构的交互式设计软件。所提出的基于番茄器官几何模型的植株结构交互式设计方法所构建的模型呈现多态性,并且对模型和对应的真实植株的垂直投影叶面积与总叶面积的比值进行了计算,分别为0.478 8和0.483 2,其误差为0.91%,具有较高的真实感效果。该设计方法易于结合农学知识,且满足番茄形态多样化的数字化设计要求,对形态结构复杂的园艺作物几何建模具有一定的参考价值。

**关键词:** 番茄 三维形态 分类建模 交互设计

**中图分类号:** TP391.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)12-0204-07

## Detailed Modeling of 3-D Configuration of Tomato Plant

Yuan Xiaomin Zhao Chunjiang Wen Weiliang Guo Xinyu Lu Shenglian Wei Xueli

(National Engineering Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100097, China)

### Abstract

In order to provide techniques for digital design of the 3-D shape and visual simulating of tomato, on the foundation of observation, measurement and analysis of long term on tomato, the classification modeling of configuration of leaves and lateral branches was put forward based on measured data. Leaves and lateral branches were classified, and template libraries were constituted, which contains 2 ~ 4 templates respectively. Several principal control parameters with explicit biological background for these geometric models of organs were extracted based on the morphological features of tomato. Interactive designing the 3-D shape and organs of tomato were implemented by using template techniques. The models designed by this method, which presented polymorphism and have high realistic, could be integrated with agricultural knowledge easily. An interactive design software based on geometric model of tomato organs was exploited, by which users can design tomato plant model interactively. The digital model appears polymorphism, and ratios of model and real plant that the vertical projection leaf area and total leaf area were compared, they were 0.478 8 and 0.483 2, respectively, the error between them was 0.91%, so it has a high sense of reality.

**Key words** Tomato, 3-D shape, Modeling classify, Interactive design

### 引言

目前在农业信息化研究中,数字植物技术体系

的研究越来越受到广大学者的关注,数字植物是利用数字化的方法对植物进行研究,并为植物几何建模、生长过程模拟、可视化计算、植物生命体系的数

收稿日期:2012-02-01 修回日期:2012-03-21

\*“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2012BAD35B01)和北京市自然科学基金资助项目(4081001)

作者简介:袁晓敏,助理工程师,主要从事图形图像处理研究,E-mail: yuanxiaomin1@yahoo.com.cn

通讯作者:赵春江,研究员,博士生导师,主要从事农业信息技术和精准农业研究,E-mail: zhaocj@nercita.org.cn

数字化表达、协同科研实验、集成应用以及成果共享等提供技术支撑和信息服务<sup>[1-2]</sup>。番茄是全球栽培最为普遍的果蔬之一<sup>[3]</sup>，利用数字化技术，构建数字番茄技术体系<sup>[1]</sup>，以三维可视的方式来分析、设计和模拟番茄的生命过程和生产过程十分必要<sup>[2]</sup>。实现番茄形态结构的三维可视化建模是构建数字植物技术体系的基础性工作，目前国内在水稻<sup>[4]</sup>、小麦<sup>[5]</sup>、玉米<sup>[6]</sup>等农作物器官及植株的可视化模拟方面取得了较多的成果。番茄是典型的园艺作物，形态结构较复杂，对于番茄模型的研究主要侧重于其生长发育过程中的生物量生产与分配，并以产量为目标<sup>[7]</sup>，如以色列和美国联合开发的 TOMGRO 温室番茄模型<sup>[8]</sup>和荷兰建立的 TOMSIM<sup>[9]</sup>等著名的温室番茄生长模型。中国科学院自动化研究所中法联合实验室利用有限态自动机的方法，以番茄个体为研究对象，构建了番茄的结构模型，该模型主要研究植株及器官的动态构建过程，器官形态被简化<sup>[10]</sup>。在番茄形态结构的可视化研究方面目前尚未见相关报道。

本文通过大量数据观测分析番茄叶片与侧枝的形态结构特征，对不同生长叶位的叶片与侧枝形态分别进行统计，在此基础上对番茄叶片和侧枝进行分类，针对不同分类构建番茄叶片和侧枝的三维模型，通过参数化设计进行番茄植株的几何建模，并开发交互式设计软件，最后对所构造的番茄模型进行验证。

## 1 材料与方 法

### 1.1 实验材料

实验于 2010~2011 年在北京市农林科学院院内日光温室中进行。供实验的品种是莎莉，当出现 2 片真叶时，移栽到花盆中，按照行距 1 m、株距 0.5 m 摆放，基本符合番茄田间种植密度，以获得更真实的番茄冠层形态参数。

### 1.2 实验方法

为获得番茄器官、个体及群体的形态特征数据，对田间番茄进行非破坏性测量与破坏性测量。其中，非破坏性测量主要获取番茄的侧枝生长位置、方位角、倾角等几何形态参数；破坏性测量主要利用 FASTSCAN 和数字化仪等仪器获取叶片、侧枝的点云数据，以及植株主干的节点位置等数据<sup>[8]</sup>。

### 1.3 数据测定方法

在对番茄进行参数化建模前，需根据番茄拓扑结构，提取其主要的形态特征参数。番茄的拓扑结构主要由主干长度、主干与竖直方向夹角、分枝数目、分枝在主轴上着生位置、分枝与主轴夹角以及分

枝方位角等决定。因此，在进行拓扑结构设计时，首先应考虑上述特征。如图 1 所示，在建立坐标系时，取正北方向为  $X$  轴方向，竖直向上为  $Y$  轴方向，据此确定  $Z$  轴方向，并引入以下参数来描述番茄植株的拓扑结构：基部到顶端的垂直高度  $H$ 、分枝数（不包括主轴） $N$ 、各分枝在主轴上着生的高度  $L_i$  ( $i=1, 2, \dots, N$ )、分枝与主轴夹角  $\theta_k$  ( $k=1, 2, \dots, N$ )（分枝底端切向与竖直方向的夹角）、分枝方位角  $\omega_k$  ( $k=1, 2, \dots, N$ )（分枝底端切向与坐标轴  $X$  轴方向的夹角）。以上 5 个参数即可基本确定番茄的拓扑结构和基本形态。数据获取实验在 2010 年 8~12 月于北京市农林科学院日光温室内进行，共获取 1 000 多幅图片，选取 3 棵固定植株，按照每 3 天一个周期获取以上 5 个参数的数值，用于参数化几何建模。

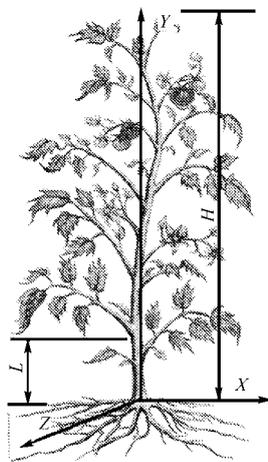


图 1 番茄的形态参数

Fig.1 Shape parameters of tomato

## 2 番茄主要器官的几何建模

番茄为茄科一年生或多年生草本植物，植株高 0.6~2 m，易倒伏。茎多为半直立性或半蔓性，茎基部木质化，需支架栽培，分枝能力强，每个叶腋都可发生侧枝，且侧枝形态各异，花穗下第一侧枝生长最快。叶片是番茄的主要器官之一，番茄的叶互生，为单中羽状深裂或全裂，其形态在不同品种、不同生长叶位之间存在着显著的差异。果实为浆果，呈扁球状或近球状，肉质而多汁，橘黄色或鲜红色，光滑。

由番茄的主要器官特征可知，番茄的主茎、叶、侧枝、果实等器官的形态具有较大差异，需用不同的方法进行建模。

### 2.1 器官几何模型的主控参数

番茄叶片从形态上看，主要由顶尖叶片、小叶片、复叶、叶轴和叶柄组成，把叶轴看作主茎的一级分枝，叶柄看作次级分支<sup>[5]</sup>，并将叶轴、叶柄以及其上叶片合称为侧枝，以下叶片指次级分支上的叶片。

主茎的主控参数为主茎长度、顶端半径和底端

半径;叶片的主控参数为叶倾角和叶片最大长度。叶倾角是描述植物个体或者群体形态结构的一个重要特征,它决定了植物光合作用过程中所能利用的有效叶面积;侧枝的主控参数为侧枝倾角、方位角以及侧枝主轴长度;果实主控参数为横切面最大半径和纵切面最大半径。

以上这些参数主要由温室实验测量统计得出。

## 2.2 叶片模型建立

目前针对植物叶片几何建模方法研究相对较多<sup>[11-14]</sup>,但这些方法一般适用于相似度较高的叶片。番茄叶片数量多、差异大,通过交互式设计逐一对其进行几何建模工作量较大,因此采用分类建立叶片三维模板<sup>[15]</sup>的方法对番茄叶片进行建模。通过对番茄植株进行长期数据获取与分析,将番茄叶片按叶位及形态分为以下5类:简单小叶、深裂对称叶、深裂不对称叶、全裂对称叶和全裂不对称叶,其各自对应的具体形态如图2所示。为丰富番茄的叶片形态,对以上5类叶片进行建模时保证每类模板中分别建立2~4个该类叶片的模板。

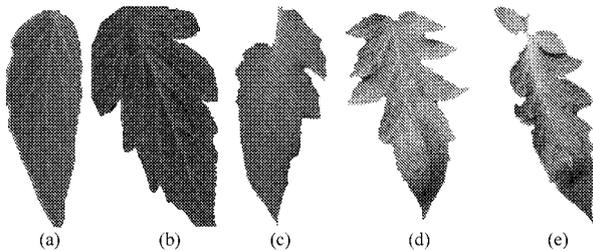


图2 5类叶片

Fig.2 Five types of leaves

(a) 简单小叶 (b) 深裂对称叶 (c) 深裂不对称叶  
(d) 全裂对称叶 (e) 全裂不对称叶

番茄叶片较复杂,多深裂或全裂状,这使得基于Bezier曲面或者NURBS曲面等一般的曲线曲面建模方法难以表示该种复杂曲面。为此采用基于三维数据点云的几何重建方法对番茄叶片进行建模。叶片点云模型获取及网格生成步骤为<sup>[16]</sup>:①确定预建模的番茄植株,选取形态较好且完整的叶片若干,并对其拍照,便于后期纹理贴图。②对选定的番茄叶片,利用FASTSCAN手持式三维激光扫描仪进行扫描(图3a),获取该叶片点云数据(图3b)。③将叶片点云数据进行点云简化处理,为保持后期处理及可视化速率与模型细节表示的平衡性,采用200~300个顶点表示1个叶片模型(图3c)。④利用简化后的点云数据,生成网格模型,通过网格处理软件进行网格修补、删除和平滑处理等操作,最终得到番茄叶片网格模型(图3d)。

为增强叶片模型的真实感,通过纹理映射技术对三维模型进行渲染。番茄叶片的叶脉较多,为保

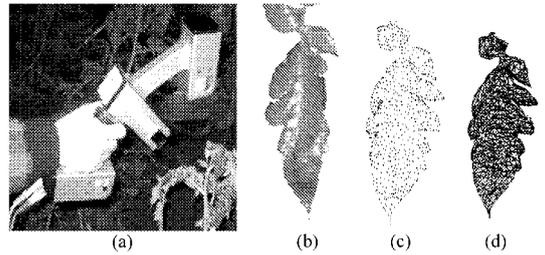


图3 叶片点云模型和网格模型

Fig.3 Point cloud model and mesh model of leaf

(a) 叶片采样扫描 (b) 采集点集  
(c) 简化后的点云 (d) 网格模型

证叶片完整性,采用单一贴图方式进行处理,即将整个叶片表面作为一张纹理图片,与叶片的网格模型对应<sup>[17]</sup>。由于番茄叶片弯曲程度大,多深裂或全裂叶缘,且所获取的图像,大都是在没能把叶片完全展开即自然情况下获取的,使得所拍摄叶片区域和网格面积不能较好地吻合,给后期的贴图带来不便,因此为获得更逼真的效果,在得到叶片网格后,采用透明纹理贴图方式对番茄叶片进行纹理映射,利用该方法渲染后的番茄叶片模型如图4所示。

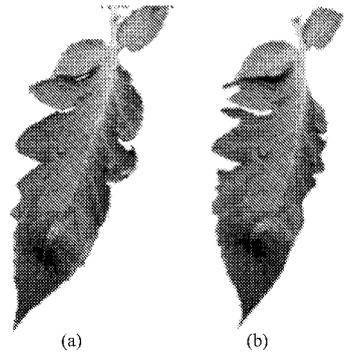


图4 叶片透明贴图

Fig.4 Transparent textures of leaf

(a) 真实叶片 (b) 叶片模型

## 2.3 侧枝模型建立

番茄的主茎和侧枝构成了整株结构的骨架,侧枝枝条上叶片、花和果实,形成完整的番茄植株。番茄的侧枝形态呈多态性,随在主干上生长叶位的不同,形态的大小、弯曲程度、叶片数量以及侧枝上叶片的分布都呈现一定的规律性。为保持这种多态性,通过观察与数据分析,初步将侧枝分为:生长在主干下部、中下部、中上部、中部和顶部的5类侧枝。

为使番茄枝条重建更符合真实情况,采集10株番茄的多角度图像数据,对每株的每个侧枝进行分析。从每株5个特定部位选取5类枝条,统计10株番茄5类枝条的各类型叶片的数量,经过平均得出每个侧枝上实际应包括的各类叶片数如表1所示。

从表1可得到每个侧枝上应添加的各类叶片的数量。由于中上部和中下部各类型叶片的数量和叶

表 1 5 种侧枝应包含各类叶片数量

Tab.1 Leaf numbers of five kinds of collateral 片

侧枝	简单小叶	深裂对称叶	深裂不对称叶	全裂对称叶	全裂不对称叶	小枝	总计
1	1~2	1~2	2~3	1	1	0	6~9
2	2~3	2~3	1~2	1	2~3	1~2	9~14
3	3~4	5~6	1~2	2	3~4	2~3	16~21
4	1~2	3~4	1	1	1~2	2~3	9~13
5	2~3	5	1~2	3~4	2~3	1~2	13~19

片总数几乎相等,且观察其形态,这两部位分布的枝条长度相差较小,所以为减少建模工作量,两种枝条合为一种模型。

番茄侧枝的茎可视为不规则的弯曲圆柱,球 B 样条曲线是表征三维空间中基于骨架的管状实体的方法,适合模拟植物枝干、根系等柱状结构器官,因此采用球 B 样条曲线对番茄枝条和叶柄进行几何建模<sup>[18]</sup>。

设  $N_{i,p}(t)$  是  $p$  次以  $(u_0, u_1, \dots, u_m) = (a, \dots, a, u_{p+1}, \dots, u_{m-p-1}, b, \dots, b)$  为节点矢量的 B 样条基函数,  $\langle p_i; r_i \rangle$  是以  $p_i$  为中心以  $r_i$  为半径的控制球。则球 B 样条曲线定义为<sup>[17]</sup>

$$\langle B \rangle (t) = \sum_{i=0}^n N_{i,p}(t) \langle p_i; r_i \rangle$$

其中,  $t \in [0, 1]$ 。

由定义可知,用球 B 样条曲线生成枝条和叶柄模型时,只需输入相应的控制球数据,即  $p_i$  的三维坐标与半径  $r_i (i = 0, 1, \dots, n)$  即可。为生成枝条主干几何体曲面,首先在点云模型中沿主干抽取多个点,由于枝条弯曲变化多在叶柄着生处,因此根据枝条弯曲变化,获取点云模型中的特征点,即将主干分为多条线段。图 5a 从下到上依次选取 15 个控制点:每个叶柄着生处,以及两叶柄中间点。然后按以下规则确定控制中心的三维坐标与半径<sup>[19]</sup>:

(1) 特征点坐标的转换:由于扫描数据已经是三维数据,因此为增加模拟的真实性,直接转换该特征点坐标为 OpenGL 显示坐标即可。

(2) 控制球半径的确定:通过游标卡尺测量所扫描侧枝对应点的直径获得。

获取控制球信息后,首先根据控制球坐标生成一条中心轴线,然后根据球 B 样条方法在每个控制点处,根据相应控制点的半径,生成粗细不均的线条型曲面,即生成了枝条主干模型。图 5a 是获取控制球坐标的点云模型,图 5b~5c 为利用球 B 样条构建的番茄主干及侧枝模型。得到枝条主干模型后,为模拟整个枝条形态,根据真实叶柄与侧枝主干之间的夹角,采用与枝条主干同一个模型中获取叶柄控制球坐标的方法,按照上述球 B 样条方法,对各侧枝上的各叶柄重建。

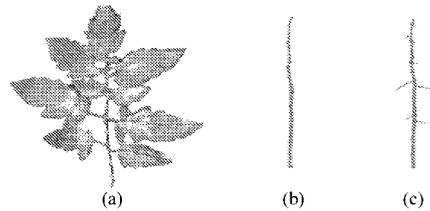


图 5 中下部侧枝模型

Fig.5 Collateral model in mid-lower

(a) 控制球数据 (b) 侧枝主干模型 (c) 侧枝模型

重建侧枝模型后,需对各侧枝添加叶片模型。通过统计分析,侧枝上叶片类型按不同叶位表现出一定的分布规律:除顶叶外,其他叶片的分布为:互生,一对大叶和一对小叶循环出现。所以设立大叶模板库(深裂对称叶、深裂不对称叶和小枝)和小叶模板库(全裂对称叶、全裂不对称叶和简单小叶)。枝条生成后,每个叶位的叶片按照规律从已经完成建模的各类叶片中随机添加,所构造各类枝条模型如图 6 所示。

### 2.4 果实模型建立

番茄果实多为椭圆形,较规整,但大小不一,在模型建立过程中,既要能反映果实的外形特征,也要具有良好的可控性,使得模型具有良好的重用性。

番茄表面有果棱,为更真实的模拟果实的形状,鉴于 B 样条曲面优良的性质,采用 B 样条曲面对番茄果实进行模拟。利用三维数字化仪对果实表面进

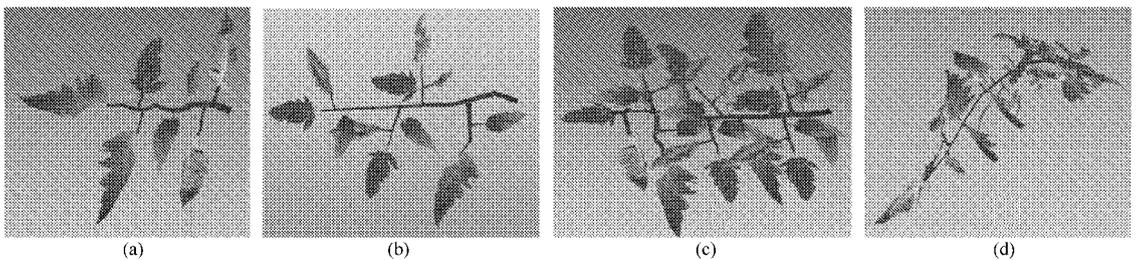


图 6 各类枝条模型

Fig.6 Various branches model

(a) 底部模型(表 1 侧枝 1) (b) 中下部和 中上部侧枝模型(侧枝 2、4) (c) 中部侧枝模型(侧枝 3) (d) 顶部侧枝模型(侧枝 5)

行控制点获取,每列 17 个点,共采集 13 列,利用 B 样条曲面重建出番茄果实。

给定  $(m + 1) \times (n + 1)$  个控制点  $d_{i,j} (i = 0, 1, \dots, m; j = 0, 1, \dots, n)$  的阵列和参数  $u, v$  的次数  $k, l$  以及 2 个节点矢量  $U = (u_0, u_1, \dots, u_{m+k+1})$  与  $V = (v_0, v_1, \dots, v_{n+l+1})$ , 就可以定义一张  $k \times l$  次张量积 B 样条曲面<sup>[19]</sup>

$$p(u, v) = \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n d_{i,j} N_{i,k}(u) N_{j,l}(v)$$

$$(u_k \leq u \leq u_{m+1}, v_l \leq v \leq v_{n+1})$$

式中  $N_{i,k}(u) (i = 0, 1, \dots, m)$  与  $N_{j,l}(v) (j = 0, 1, \dots, n)$  均为 B 样条基函数。

$N_{i,k}(u)$  的双下标中第 2 下标  $k$  表示次数,第 1 下标  $i$  表示符号,其递推式为

$$N_{i,0}(u) = \begin{cases} 1 & (u_i \leq u \leq u_{i+1}) \\ 0 & (\text{其他}) \end{cases}$$

$$N_{i,k}(u) = \frac{u - u_i}{u_{i+k} - u_i} N_{i,k-1}(u) + \frac{u_{i+k+1} - u}{u_{i+k+1} - u_{i+1}} N_{i+1,k-1}(u)$$

其中规定  $0/0 = 0$ , 给定  $17 \times 13$  个控制点,构成一张控制网格,如图 7a 所示,根据以上 B 样条曲面计算公式计算得到番茄果实表面的数据,得到番茄果实如图 7b 所示。

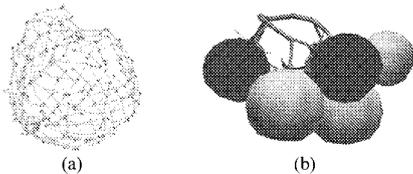


图 7 果实模型

Fig. 7 Fruit model

(a) 果实网格模型 (b) 果枝模型

### 3 植株形态交互式设计

依据番茄器官的形变特征和主要形态,设定各器官的主要形态特征参数,结合描述器官形态特征的模板文件,通过交互输入具体的参数值,实现番茄器官的参数化设计<sup>[20]</sup>。

依据不同器官几何建模方法的不同,设定器官参数如下:叶片的主控参数为叶长和叶宽;侧枝的主控参数为枝条的总长、方位角和倾角;主干的主控参数为主干总长和主干上侧枝的总数;果实的主控参数为颜色、果实横向和纵向最大横截面的半径。这些主控参数均具有明确的生物学意义,并且可以通过知识规则或实际测量获取。

依据对番茄侧枝以及果实生长叶位和形态的统计,获取侧枝与果实的生长规律,利用该交互式软

件,用户可以方便地生成番茄植株,图 8 为软件操作流程。

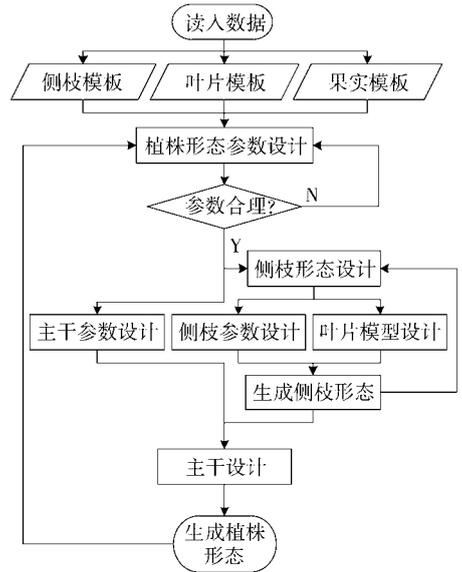


图 8 番茄几何建模软件流程图

Fig. 8 Flow chart of tomatoes geometry modeling software

为对番茄植株进行交互式设计,开发了番茄形态可视化交互式设计软件。采用 C++ 编程语言和 OpenGL 图形渲染引擎实现了番茄器官和植株形态可视化交互式设计软件,软件界面如图 9 所示,分别对  $H, N, L_i (i = 1, 2, \dots, N), \theta_k (k = 1, 2, \dots, N), \omega_k (k = 1, 2, \dots, N)$  参数的范围进行了设定,使得用户在设计时只能在该范围内进行选择设计,保证了番茄的基本形态,减少了用户的修改工作。根据生理特征所建立的各器官模板,用户可随机生成符合真实生长规律的番茄植株的三维形态几何模型。所生成的番茄植株几何模型有着较好的视觉效果。

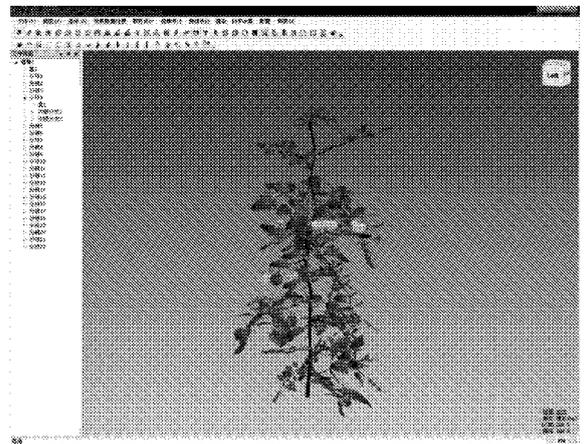


图 9 软件生成的植株形态界面

Fig. 9 Plant morphological interface generated by software

### 4 模型验证

利用上述方法,对番茄单株模型进行三维重建,并对其拓扑结构和形态特征进行了对比验证。

#### 4.1 实验设计

对番茄的重构主要从拓扑结构分布、器官形态差异等方面进行,因此,模型验证也主要针对以上参数进行验证。番茄作物不同于一般园艺植物,它叶片形状多样,不便于一一进行大小测量等,为了考察所建立模型的准确性,从叶片覆盖面积对模型进行验证。叶片和侧枝的分布呈多个方向,且大小不一,因此,本文选择叶片总面积和垂直投影两类数据进行验证,拟分别比较总叶面积、垂直投影叶面积及其比值 3 个数值。

#### 4.2 验证方法

如图 10 所示,分别计算两种方法重建得出的几何模型的垂直投影面积及总叶面积,并计算两数值的比值(表 2)。由表中数据可看出,本文方法所建立的番茄植株几何模型与利用 3DSMAX 及实测数据所建立的几何模型相比,总叶面积  $S_1$  误差为 2.88%,垂直投影叶面积  $S_2$  误差为 2.01%,两者均在允许误差范围内。叶片垂直投影面积和总叶面积的比值  $S_3$  反映了叶片方位角和形态分布的概率,本文所建模型的比值为 0.478 8,利用实际植株所建模型的比值为 0.483 2,误差为 0.91%。所得误差在允许范围内,验证了本研究所采用番茄模型的建立方法和研究空间拓扑结构分布规律的方法有一定的科学性。

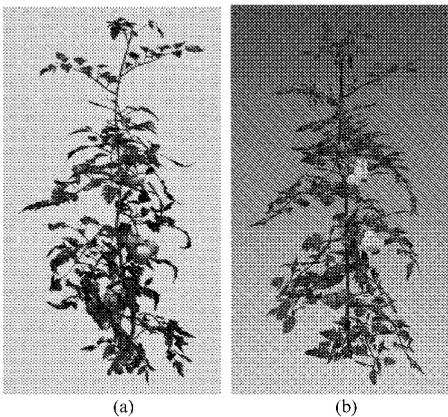


图 10 完全复制模型和本文所建模型

Fig. 10 Tomato models of completely copy and proposed in this paper

(a) 完全复制模型 (b) 本文所建模型

#### 4.3 讨论

由于实际生产过程中,番茄经常受到整枝方式、定植密度、环境条件(特别是水分胁迫)等因素的影响而引起单株以及群体间形态结构的差异。以群体

设计为例,本研究所设计的番茄可视化软件在进行模型设计时,这种差异的体现是通过获取群体中每一个植株个体的形态参数,对植株个体逐一进行重建完成的。如果环境条件发生改变,不能在原有模型基础上进行改变,必须对每一株单株模型进行完全重建,再设定植株密度等信息才能完成模型的改变,所以存在一定的局限性。

表 2 完全复制模型和本文所建模型形态特征参数  
Tab. 2 Character parameters calculated by complete replication model and the proposed model

特征参数	完全复制模型	本文所建模型	误差/%
$S_1$	767 663. 6	790 508. 3	2. 88
$S_2$	370 951. 6	378 530. 9	2. 01
$S_3$	0. 483 2	0. 478 8	0. 91

因此,可以通过以下方式对模型软件进行改进:

(1) 单株建模:需进一步研究不同株型参数变异情况以及同一品种形态结构参数受环境影响的关系。在番茄三维可视化软件中添加以上因素的交互响应变量,使得建立单株模型时,只需要选择生长时期,即可建立理想生长条件下(即水、光、肥、温度等条件充分满足生长需求<sup>[7]</sup>,且无病虫害的情况)的番茄单株形态,再加上以上获取的参数变异情况,即可完成对真实植株的模拟。

(2) 群体建模:需进一步实验和观察,获取群体间环境条件和定植密度等的因素对植株形态的影响关系。在番茄三维可视化软件中添加各种影响因素的交互响应变量,使建模时只需选择生长时期,完成相应单株建模之后,再选择环境因素的影响和定植密度,即可完成对真实情况下番茄单株和群体的模拟。

#### 5 结束语

针对番茄形态复杂的特点,通过大量实验数据的统计分析并借助三维数据获取设备,构建了番茄叶片和侧枝的三维模板库,并基于器官模板分类方法,结合植物参数化几何建模,构造了具有较高真实感的番茄几何模型,实现了番茄器官和个体的三维可视化表达。基于以上方法开发了番茄形态可视化交互式设计软件,软件结构设计合理,各器官模板采用外部读入的方式,方便番茄形态的扩展,为番茄生长系统的数字化、可视化模拟提供了实用的软件工具。

#### 参 考 文 献

- 1 赵春江, 陆声链, 郭新宇, 等. 数字植物及其技术体系探讨[J]. 中国农业科学, 2010, 43(10): 2 023 ~ 2 030.  
Zhao Chunjiang, Lu Shenglian, Guo Xinyu, et al. Exploration of digital plant and its technology system [J]. Science

- Agricultura Sinica, 2010,43(10):2023~2030. (in Chinese)
- 2 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.  
Yuan Xiaomin, Wen Weiliang, Guo Xinyu, et al. Research progress on visualization of horticultural plants[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2011, 13(6):90~98. (in Chinese)
  - 3 Heuvelink E. Tomatoes crop production science in horticulture[M]. Wallingford: CABI Publication, 2005.
  - 4 杨红云, 罗威, 何火娇, 等. 水稻主茎三维形态建模与计算机模拟[J]. 江西农业大学学报, 2008, 30(6):1153~1156.  
Yang Hongyun, Luo Wei, He Huojiao, et al. 3D morphology modeling and computer simulation of rice main stem[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2008, 30(6):1153~1156. (in Chinese)
  - 5 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.  
Wu Yanlian, Cao Weixing, Tang Liang, et al. OpenGL-based visual technology for wheat morphology [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(1):121~126. (in Chinese)
  - 6 郭新宇, 赵春江, 肖伯祥, 等. 玉米三维重构及可视化系统的设计与实现[J]. 农业工程学报, 2007, 23(4):144~148.  
Guo Xinyu, Zhao Chunjiang, Xiao Boxiang, et al. Design and implementation of three-dimensional geometric morphological modeling and visualization system for maize[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(4):144~148. (in Chinese)
  - 7 董乔雪, 王一鸣, 杨丽丽, 等. 番茄三维形态结构的参数提取及模拟[J]. 农业工程学报, 2010, 26(增刊 2):38~42.  
Dong Qiaoxue, Wang Yiming, Yang Lili, et al. Parameter identification of tomato 3D architectural model and simulation[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(Supp. 2):38~42. (in Chinese)
  - 8 Heuvelink E. Dry matter partitioning in tomato: validation of a dynamic simulation model[J]. Annals of Botany, 1996, 77(1):71~80.
  - 9 Jones J W, Dayan E, Allen L H, et al. A dynamic tomato growth and yield model(TOMGRO)[J]. Transactions of the ASAE, 1991, 34(2):663~672.
  - 10 董乔雪, 王一鸣. 番茄的结构-功能模型 I: 基于有限态自动机的 3D 形态构建[J]. 中国生态农业学报, 2006, 14(4):195~199.  
Dong Qiaoxue, Wang Yiming. Tomato structural function model I: a 3D architectural modeling based on finite state automation[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2006, 14(4):195~199. (in Chinese)
  - 11 Rodkaew Y, Siripant S, Lursinsap C, et al. An algorithm for generating vein images for realistic modeling of a leaf[C]// Proceedings of the International Conference Computational Mathematics and Modeling(CMM), 2002: 73~78.
  - 12 Runions A, Fuhrer M, Lane B, et al. Modeling and visualization of leaf venation patterns[J]. ACM Transactions on Graphics (TOG)-Proceedings of ACM SIGGRAPH, 2005, 24(3):702~711.
  - 13 Sung Min Hong, Bruce Simpson, Gladimir V G Baranoski. Interactive venation-based leaf shape modeling[J]. Computer Animation and Virtual Worlds, 2005, 16(3~4):415~427.
  - 14 温维亮, 郭新宇, 肖伯祥, 等. 基于模板的生菜参数化几何建模方法[J]. 中国农学通报, 2011, 27(6):459~463.  
Wen Weiliang, Guo Xinyu, Xiao Boxiang, et al. The parametric geometric modeling method for lettuce based-template[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(6):459~463. (in Chinese)
  - 15 魏学礼, 肖伯祥, 郭新宇, 等. 三维激光扫描技术在植物扫描中的应用分析[J]. 中国农学通报, 2010, 26(20):373~377.  
Wei Xueli, Xiao Boxiang, Guo Xinyu, et al. Analysis of applications of 3D laser scan technology in plant scanning[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, 26(20):373~377. (in Chinese)
  - 16 赵春江, 陆声链, 郭新宇, 等. 西瓜三维形态几何建模和真实感绘制技术研究[J]. 中国农业科学, 2008, 41(12):4155~4163.  
Zhao Chunjiang, Lu Shenglian, Guo Xinyu, et al. Techniques for modeling 3-D shape and realistic rendering of watermelon [J]. Science Agricultura Sinica, 2008, 41(12):4155~4163. (in Chinese)
  - 17 潘云鹤, 董金祥, 陈德人. 计算机图形学——原理、方法及应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003:191~198.
  - 18 王芸芸, 温维亮, 郭新宇, 等. 基于球 B 样条函数的烟草叶片虚拟实现[J]. 农业工程学报, 2011, 27(1):230~235.  
Wang Yunyun, Wen Weiliang, Guo Xinyu, et al. Virtual realization of tobacco leaves based on ball B-spline function[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(1):230~235. (in Chinese)
  - 19 施法中. 计算机辅助几何设计与非均匀有理 B 样条[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001: 211~224.
  - 20 肖伯祥, 郭新宇, 王纪华, 等. 玉米叶片形态建模与网格简化算法研究[J]. 中国农业科学, 2007, 40(4):693~697.  
Xiao Boxiang, Guo Xinyu, Wang Jihua, et al. Maize leaf morphological modeling and mesh simplification of surface[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2007, 40(4):693~697. (in Chinese)