

# 基于数据约束的黄瓜叶片参数化建模\*

苗腾<sup>1</sup> 赵春江<sup>2</sup> 郭新宇<sup>2</sup> 陆声链<sup>2</sup> 温维亮<sup>2</sup>

(1. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083; 2. 国家农业信息化工程技术研究中心, 北京 100097)

**【摘要】** 提出一种基于数据约束的黄瓜叶片参数化建模方法。该方法首先通过对真实叶片形态数据的统计分析获得叶脉分布以及叶缘特征两类形态特征参数, 用来约束叶片整体形状并分区域描述叶缘形态细节, 再根据参数值计算出叶片轮廓特征点的三维坐标, 利用轮廓中轴骨架建模方法生成叶片的三维网格, 最后采用纹理贴图技术增加真实感。试验结果表明, 采用该方法可以快速、灵活地构建出黄瓜叶片的三维形态, 具有较强的真实感效果。

**关键词:** 黄瓜叶片 数据约束 交互式设计 参数化建模

**中图分类号:** TP391.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2011)01-0171-06

## Parameterized Geometric Modeling of Cucumber Leaf Based on Data Constrains

Miao Teng<sup>1</sup> Zhao Chunjiang<sup>2</sup> Guo Xinyu<sup>2</sup> Lu Shenglian<sup>2</sup> Wen Weiliang<sup>2</sup>

(1. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

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

### Abstract

A method for parameterized geometric modeling of cucumber leaf based on data constrains was presented. Firstly, the data of leaf was collected and measured, the statistics law was analyzed. Secondly, vein distribution and morphological characteristic parameters of two types of leaf margin were refined based on the law, which constrained the overall shape of leaves and described the details of leaf margin in the partition. According to the parameter values, the 3-D coordinates of contour feature points were calculated, and the 3-D grid was generated by Silhouette-axis skeleton modeling method. Finally, texture mapping was used for increasing the realism. The experimental results showed that the method could construct the 3-D model of cucumber leaf quickly and flexibly, and with good realism effect.

**Key words** Cucumber leaf, Data constrains, Interactive design, Parameterized geometric modeling

### 引言

对植物叶片的几何描述和真实感建模是数字植物和计算机图形学领域的研究热点, 许多学者进行了积极的探索。1973年, Rozenberg<sup>[1]</sup>等提出用L系统作为描述植物拓扑结构的通用方法, 但生成的结果较为单调呆板。Rodkaew<sup>[2]</sup>将L系统与遗传算法结合, 一定程度上解决了L系统的呆板, 但真实感

仍显不足。Mündermann<sup>[3]</sup>等提出了基于叶片外轮廓构建三维模型的方法。Lu<sup>[4]</sup>等利用植物器官骨架构建三维模型曲面, 同时支持对骨架的添加修改等交互操作。以上工作虽然可以通过交互方便灵活地构建植物叶片模型, 但是结果都不能较好地反映器官的品种特性, 原因是这些方法生成的模型都是建立在用户的主观感知上, 缺少客观数据的支持。为了解决该问题, Loch<sup>[5]</sup>等利用三维扫描数据重构

收稿日期: 2010-05-26 修回日期: 2010-06-08

\* 国家自然科学基金资助项目(30700493)、国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2007AA10Z224)和北京市自然科学基金资助项目(4081001)

作者简介: 苗腾, 博士生, 主要从事计算机图形学研究, E-mail: caumiao@126.com

通讯作者: 赵春江, 研究员, 博士生导师, 主要从事农业信息化研究, E-mail: zhaocj@nrcita.org.cn

叶片模型,可以得到自然界中叶片的真实形态。迟小羽<sup>[6]</sup>等提出了基于物理的植物形态变化仿真方法,真实地反映叶片在老化、干枯时的变化。以上方法虽然可以获得接近实际情况的叶片形态,但是建模过程相当繁琐、不能通过交互实时生成。还有一些学者,从叶片纹理<sup>[7-8]</sup>以及光照<sup>[9-10]</sup>等方面对叶片进行模拟,在像素层次上取得了很好的效果,但在几何层次的描述方面仍显不足。

为了解决以上问题,本文在前人研究的基础上<sup>[4]</sup>,提出一种基于数据约束的黄瓜叶片参数化几何建模方法。

## 1 数据测量及参数选择

试验在北京市农林科学院院内日光温室内进行,秋冬茬栽培,供试品种为京研迷你2号(MiN2)黄瓜。黄瓜定植缓苗后,选择生长均匀一致的植株进行标记。在结果期,从长势一致的标记植株的同一叶位上选取叶片进行数据采集。采集时将叶片尽量展平,测量特征较明显的5个一级叶脉的长度以及相互之间的角度。如图1所示,分别测量

$OA$ 、 $OB$ 、 $OC$ 、 $OD$ 、 $OE$ 、 $AF$ 、 $CG$ 、 $DI$ 、 $BH$  的长度,以及  $\angle COA$ 、 $\angle EOC$ 、 $\angle DOE$ 、 $\angle BOD$ 、 $\angle OAF$ 、 $\angle OCG$ 、 $\angle ODI$ 、 $\angle OBH$  的角度。

为方便分析,对叶脉进行编号, $OE$  为1号叶脉, $OD + DI$  为2号, $OB + BH$  为3号, $OC + CG$  为4号, $OA + AF$  为5号。

利用 SPSS 13.0 对所测叶脉长度数据进行相关性分析,结果如表1所示。分析发现叶脉长度数据之间相关性较高,可以通过主叶脉的长度近似得到其他叶脉的长度。对数据以  $D_i = \rho_{i1} D_1$  形式进行线性回归拟合, $D_i$  为  $i$  号叶脉的长度, $\rho_{i1}$  为  $i$  号叶脉与1号叶脉长度的比例系数。拟合结果为

$$\begin{cases} D_2 = 0.728D_1 & (R^2 = 0.833) \\ D_3 = 0.752D_1 & (R^2 = 0.764) \\ D_4 = 0.576D_1 & (R^2 = 0.827) \\ D_5 = 0.587D_1 & (R^2 = 0.823) \end{cases} \quad (1)$$

以0.05为有意义标准进行回归系数检验。共有13个样本,计算  $F$  值,分别为54.9、33.89、52.6、51.1,全部大于4.84,所以拟合结果有意义。将  $D_1$  与  $\rho_{i1}$  设定为用户的输入参数,这样系统可以自动计算出各个叶脉的长度。通过处理分析数据,为用户

提供参数  $\rho_{i1}$  的选择依据,处理过程如下:①利用公式  $\rho_{i1} = D_i/D_1$  计算同一叶片上各个叶脉长度数据的比例系数。②计算  $\rho_{i1}$  的最小值  $\rho_{i1\min}$ 、最大值  $\rho_{i1\max}$ 。③取区间  $[\rho_{i1\min}, \rho_{i1\max}]$  为参数的取值范围,式(1)中的系数作为  $\rho_{i1}$  的默认值。通过上述分析过程,得到系统中各叶脉长度的比例系数,如表2所示。

表1 各编号叶脉长度数据相关性

Tab.1 Correlation of length data of each numbered veins

叶脉编号	叶脉编号				
	1	2	3	4	5
1	1	0.928	0.877	0.913	0.909
2		1	0.811	0.828	0.782
3			1	0.926	0.828
4				1	0.957
5					1

表2 各编号叶脉长度比例系数

Tab.2 Proportion parameters of length data of each numbered veins

叶脉编号	比例系数		
	最小值	最大值	默认值
1	1	1	1
2	0.654	0.818	0.728
3	0.684	0.798	0.752
4	0.451	0.686	0.576
5	0.467	0.693	0.587

对角度数据做相关性分析,发现相关程度不大,但数值基本保持在一定范围之内。将各个角度值设定为输入参数,记为  $a$ ,计算每个角度数据的最小值  $a_{i\min}$ 、最大值  $a_{i\max}$  以及平均值  $a_{ijq}$ 。区间  $[a_{i\min}, a_{i\max}]$  作为参数  $a_i$  的取值范围, $a_{ijq}$  作为参数默认值。角度参数如表3所示。

表3 各角度数据参数值

Tab.3 Parameters of each angle data (°)

角度	最小值	最大值	默认值
$\angle COA$	32.0	48.0	41.0
$\angle EOC$	33.0	46.0	40.5
$\angle DOE$	36.0	48.0	39.0
$\angle BOD$	35.0	42.0	40.6
$\angle OAF$	158.0	172.0	163.1
$\angle OCG$	150.0	174.0	161.2
$\angle ODI$	158.0	176.0	166.5
$\angle OBH$	151.0	171.0	163.4

MiN2 黄瓜叶片叶边缘的主要特征有两个,一是边缘经常出现卷曲,二是叶缘有锯齿。选取边缘特征较明显的60片叶片作为样本观察,提取叶边缘形

态特征信息。

首先观察边缘卷曲的形态及分布情况,依照黄瓜卷曲的形态特征,将其抽象为 3 种基本形态:梯形型、抛物线型以及正弦曲线型。同时为了便于统计描述,按叶脉分布及叶轮廓将叶边缘分为 6 个区域,用  $L_j(j \in [1,6])$  表示,如图 2 所示。通过统计(表 4),发现以 1 号叶脉为轴,对称区域出现卷曲的频率及形态类别基本相同。 $L_2$ 、 $L_5$  卷曲发生概率最大且卷曲程度最明显, $L_3$ 、 $L_4$  其次, $L_1$ 、 $L_6$  基本不出现卷曲,只有微量的上翘。3 种卷曲形态在各个区域出现的频率为: $L_2$ 、 $L_5$  区域,梯形型频率大于抛物线型,抛物线型频率大于正弦曲线型; $L_3$ 、 $L_4$  区域正好相反。根据统计特征,将各区域卷曲类型以及波峰(用  $A$  表示)、周期值(用  $T$  表示)作为建模参数,其中卷曲类型参数的默认设定值为在该区域内出现频率最大的类型。

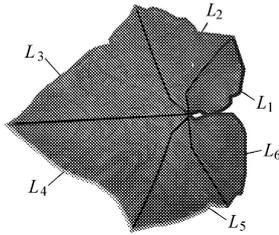


图 2 叶边缘区域划分图

Fig. 2 Leaf edge zoning image

表 4 边缘卷曲类型数量

Tab. 4 Number of various types of edge curl

边缘区域	各种卷曲类型的叶片数量			总数
	梯形型	抛物线型	正弦曲线型	
$L_1$	0	2	0	2
$L_2$	24	15	4	43
$L_3$	3	11	14	28
$L_4$	1	9	16	26
$L_5$	19	11	7	37
$L_6$	1	2	1	4

Min2 黄瓜叶缘存在锯齿,且锯齿类别多为三角锯齿型,为描述锯齿的分布以及锯齿大小形态,提取锯齿密度及锯齿高度作为交互参数。

## 2 基于参数的叶片建模

采用边缘中轴骨架建模方法对叶片建模。首先利用输入参数计算叶片的边缘骨架控制点和中轴骨架控制点,然后根据骨架控制点的三维坐标生成样条曲线,再从曲线中提取采样点作为构建曲面的空间离散点,实现曲面三角化,之后在边缘三角网格上加入锯齿模拟,最后应用纹理映射技术增加真实感。

### 2.1 叶片轮廓骨架控制点计算

选取边缘区域  $L_j$  作为叶片轮廓骨架,1 号叶脉作为叶片的中轴骨架,通过参数设置自动计算骨架上的控制点。

首先计算主叶脉与叶边缘交点的坐标,即图 1 中的  $E$ 、 $F$ 、 $G$ 、 $I$ 、 $H$  5 个点。由于叶片在尽量展平之后可以近似看作一个二维平面,所以为方便计算,在建模过程中首先把叶片放置在  $X-Y$  平面上, $O$  点与原点重合,1 号叶脉与  $Y$  轴重合, $Z$  值设为零,这样,对于上述 5 个点的计算就由三维空间转化为二维平面。其中  $E$  点的计算较为简单,只需将参数  $D_1$  直接赋给  $E$  的  $Y$  分量坐标值。 $F$ 、 $G$ 、 $I$ 、 $H$  4 个点的计算方法基本相同。如图 3 所示,以  $G$  点为例, $OC + CG$  即为 4 号叶脉, $C$  点是叶脉的拐点, $d_0$  与  $d_1$  分别为  $OC$  与  $CG$  的长度,它们的和为 4 号叶脉的长度,可以通过参数  $D_1\rho_{14}$  得出, $d_0$  与 4 号叶脉长度的比例因子由用户给出,记为  $\mu$ ,通过数据测量发现, $\mu$  基本在  $0.2 \sim 0.3$  之间。这样就可以计算出  $G$  点的  $X$  坐标  $G_x$  以及  $Y$  坐标  $G_y$ ,公式为

$$\begin{cases} G_x = d_0 \cos\beta + d_1 \cos(\beta + \theta - 180^\circ) \\ G_y = d_0 \sin\beta + d_1 \sin(\beta + \theta - 180^\circ) \\ d_0 = D_1\rho_{14}\mu \\ d_1 = D_1\rho_{14}(1 - \mu) \end{cases} \quad (2)$$

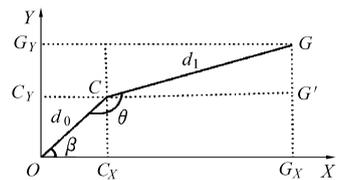


图 3 计算  $G$  点坐标

Fig. 3 Calculation of the  $G$ -point coordinate

得到上述 5 个点的  $X$ 、 $Y$  分量坐标之后,结合各个区域的形态特征计算其他轮廓控制点在  $XY$  平面的坐标。将边缘区域  $L_j$  的形态近似成简单曲线与随机扰动信号的合成, $L_1$  与  $L_6$  用二次曲线模拟, $L_2$  与  $L_5$  表示为直线段, $L_3$  和  $L_4$  则由分段直线段近似,图 4 为生成  $L_4$  的示意图,图中从左至右为分段直线、随机信号和最终形态。这样就可以得到整个轮廓骨架上的控制点。对于中轴骨架上的控制点,只需要在线段  $OE$  上选取若干点即可。

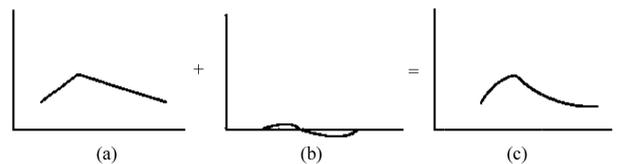


图 4  $L_4$  形态合成

Fig. 4  $L_4$  morphological synthesis

### 2.2 边缘卷曲模拟

将卷曲分为 3 种类型:梯形型、抛物线型以及正弦曲线型。在叶边缘区域  $L_j$  的网格点中选取 5 个点  $p_i(i \in [1,5])$  来进行调控。如图 5 所示,其中  $p_1$  与  $p_5$  之间的距离由参数  $T$  给定,波峰的绝对值由参

数  $A$  给定,通过参数改变  $p_i$  的  $Z$  分量坐标  $p_i(Z)$  如下:

$$\begin{cases} \text{梯形型} & \begin{cases} p_1(Z) = p_5(Z) = 0 \\ p_2(Z) = p_3(Z) = p_4(Z) = A \end{cases} \\ \text{抛物线型} & \begin{cases} p_1(Z) = p_5(Z) = 0 \\ p_2(Z) = p_4(Z) = 0.75A \\ p_3(Z) = A \end{cases} \\ \text{正弦曲线型} & \begin{cases} p_1(Z) = p_5(Z) = p_3(Z) = 0 \\ p_2(Z) = p_4(Z) = A \end{cases} \end{cases}$$

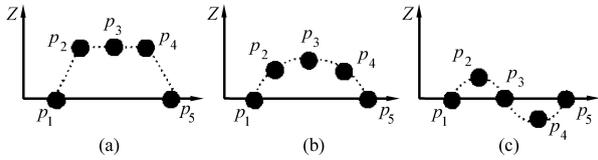


图5 各种形态卷曲控制点在  $Z$  分量上的位置  
Fig.5  $Z$  component of curl control points in various forms  
(a) 梯形型 (b) 抛物线型 (c) 正弦曲线型

进行改变之后,利用拉普拉斯变形技术计算其他网格点的位移。设  $v_1, v_2, \dots, v_n$  为网格上的顶点位置,  $i'$  表示与  $v_i$  相邻的顶点索引集,则顶点  $v_i$  的拉普拉斯坐标  $l_i$  计算公式为

$$l_i = \sum_{j \in i'} \omega_{ij}(v_j - v_i) \quad (3)$$

其中  $\omega_{ij} = \cot \alpha_{ij} + \cot \beta_{ij}$

式中  $\omega_{ij}$  表示  $v_i$  与  $v_j$  所在边  $v_{ij}$  相对于  $v_i$  的权重,  $\alpha_{ij}, \beta_{ij}$  为边  $v_{ij}$  在其所在三角形上对应的角。利用式(3)的  $\omega_{ij}$  表达,可以使叶片网格在边缘卷曲时尽最大程度保持局部形态特征。然后构建误差能量函数,即

$$E = \sum_{i=1}^n \left\| l_i - \sum_{j \in i'} \omega_{ij}(v_j - v_i) \right\|^2 + \sum_{i=1}^5 \left\| (v_i - p_i) \right\|^2 + \sum_{k=1}^m \left\| (v_k - u_k) \right\|^2 \quad (4)$$

其中,  $u_k$  表示中轴点,  $m$  为中轴点个数,通过加入中轴点的约束,可以在模拟边缘卷曲的同时不影响叶片的整体朝向和初始位置。拉普拉斯变形的目的就是找到新的网格点坐标使得上面能量最小。可以利用求解线性最小二乘问题的豪斯荷尔德变换法来解决上述问题。

### 2.3 边缘锯齿生成

黄瓜叶片锯齿多呈三角形。本文参照文献[11]的方法,对锯齿进行建模,该算法通过控制密度参数、高度参数以及锯齿方向3个参数来对锯齿进行参数化控制,但是由于锯齿的数量众多,假如对每个锯齿分别设定高度参数和方向参数十分繁琐,而如果对不同的锯齿都设置相同的参数值,则生成的锯齿较呆板。对该方法的参数设置及建模方法进行改进,将密度参数、高度参数设置为一定范围的

随机量,方向参数则由锯齿所在的三角形决定。

锯齿是在三角网格化之后生成的,生成锯齿的最小单位为构成叶缘轮廓的三角网格边。图6描述了在三角形边上生成锯齿的过程,其中,  $F_0, F_1, F_2$  为所生成锯齿的最高点;  $H$  为锯齿的高,是一定范围的随机量,由参数  $S_L$  确定;  $E_0, E_1, E_2$  为三角形的三个顶点,边  $\overrightarrow{E_0E_1}$  为叶缘轮廓边,锯齿将在该边上生成,生成的锯齿数量由参数  $S_D$  控制,是一定范围的随机量(在0到  $S_D$  之间),  $S_D$  表示该边上可能出现锯齿数量的最大值,0表示在该边上不出现锯齿;点  $f_0, f_1, f_2$  为锯齿着生点,坐标的计算公式为

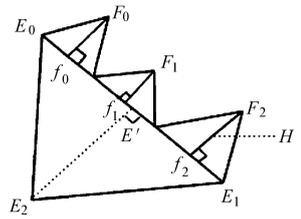


图6 计算锯齿  
Fig.6 Calculation of sawteeth

$$f_i = E_0 + \frac{E_1 - E_0}{2S_D}(i + 1) \quad (i \subseteq [0, S_D]) \quad (5)$$

锯齿方向与  $\overrightarrow{E_2E'}$  的单位向量方向相同,  $\overrightarrow{E_2E'}$  垂直于边  $\overrightarrow{E_0E_1}$ 。  $E'$  坐标的计算公式为

$$E' = (1 - t)E_0 + tE_1$$

其中  $t = \frac{\overrightarrow{E_0E_1} \cdot \overrightarrow{E_0E_2}}{D(\overrightarrow{E_0E_1})} \quad (6)$

式中  $D(\overrightarrow{E_0E_1})$  表示边  $\overrightarrow{E_0E_1}$  的长度。求出  $E'$  之后,  $\overrightarrow{E_2E'}$  就可以求出,归一化后就是锯齿的方向,设为  $dir$ ,则锯齿最高点  $F_0, F_1, F_2$  的坐标计算公式为

$$F_i = f_i + dir \cdot H \quad (i \subseteq [0, S_D]) \quad (7)$$

### 2.4 曲面生成及纹理贴图

计算出骨架控制点之后,利用三次 B 样条曲线生成骨架曲线,之后在曲线上进行采样,获得一系列的边缘点,通过 DeWall 算法实现三角网格化,为使获得的曲面更加光滑,可采用自适应细分方法进行细分<sup>[12]</sup>。

为增加真实感,给叶片模型加入纹理贴图。假定叶片曲面大致平行于  $XY$  平面,对细分后的曲面网格上的每个三角形顶点  $v(X, Y, Z)$  计算纹理坐标,即

$$\begin{cases} \text{TexCoord}X = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \\ \text{TexCoord}Y = \frac{Y - Y_{\min}}{Y_{\max} - Y_{\min}} \end{cases} \quad (8)$$

其中  $X_{\max}$  和  $X_{\min}$  分别为所有的顶点坐标中  $X$  分量的最大值和最小值,同理  $Y_{\max}$  和  $Y_{\min}$  为  $Y$  分量的最大值和最小值。

## 3 结果与讨论

上述算法在 VC++ 2005 和 OpenGL 图形引擎

编程环境下实现,并在配置为 1.96 GHz 的 CPU , DDR 2 GB 内存以及 ATI RHD2400 显卡的 PC 机上进行试验。图 7a 为通过调整参数得到的骨架曲线效果图;图 7b 为三角网格化后的线框图;图 7c 为细分之后的三角线框图。图 8 介绍了叶脉参数对轮廓

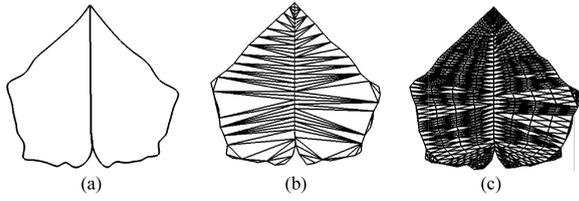


图 7 叶片三维曲线曲面  
Fig. 7 3-D curves and surfaces of leaf

骨架的影响,叶脉长度参数与角度参数的值不同,最后得出的轮廓骨架的形态将发生变化;在图中,右边主叶脉参数保持默认值,左边进行人工调整,最后两边轮廓的形态不同。

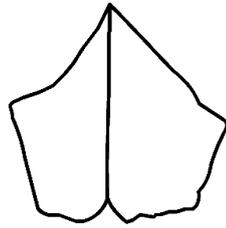


图 8 不同叶脉参数下的骨架曲线模型  
Fig. 8 Skeleton curve model based on different vein parameters

图 9 为不同类别的边缘卷曲效果,在图中加入了纹理贴图。图 10 为不同参数下的卷曲效果,图 10a

参数  $A$  设为 8、 $T$  设为 1,图 10b 参数  $A$  为 1、 $T$  为 1,图 10c 参数  $A$  为 1、 $T$  为 0.4。图 11 为加入锯齿的填充效果图,图 11a 中  $S_d$  参数设为 4、 $S_L$  参数设为 2;图 11b 中  $S_d$  为 4、 $S_L$  设为 4;图 11c 中  $S_d$  设为 10、 $S_L$  设为 2。图 12 为将本文生成的叶片应用到整个黄瓜植株建模中的效果图。

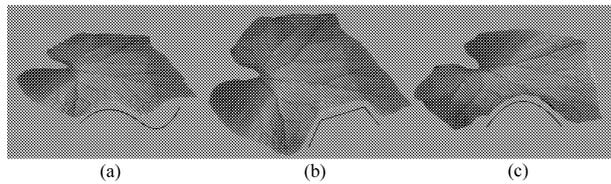


图 9 不同类型的边缘卷曲  
Fig. 9 Different types of edge curl

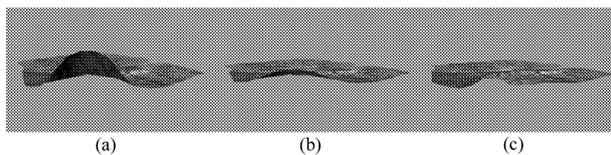


图 10 不同参数下的边缘卷曲效果  
Fig. 10 Effect of edge curl based on different parameters

在进行参数调整的同时,还可以人工调节骨架控制点。图 13 显示了调节过程,用鼠标点选控制点(图 13a),之后拖拉(图 13b),骨架形状就可以任意

调节,同时还可以在任意位置加入控制点,以便细节调节,图 13c 中虚线内就是加入控制点的区域。

对生成的模型与实际数值进行检验,以叶面积为检验指数。选取与数据采集样本同一叶位且长势一致的叶片进行测量。以三维扫描仪扫描得到的叶片面积结果作为检测标准,对比经验公式得到的面积结果,可以看出本文方法得到的叶片面积更加准确。检测结果如表 5 所示。

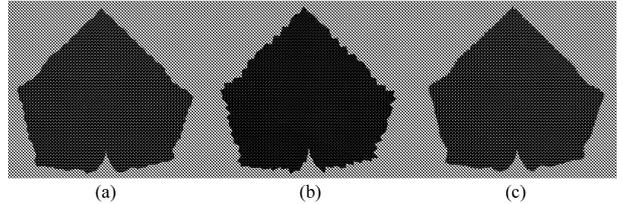


图 11 不同参数下的锯齿效果  
Fig. 11 Effect of sawteeth based on different parameters



图 12 生成的叶片应用到整个植株建模中的效果  
Fig. 12 Generated leaves applied to the cucumber plant model

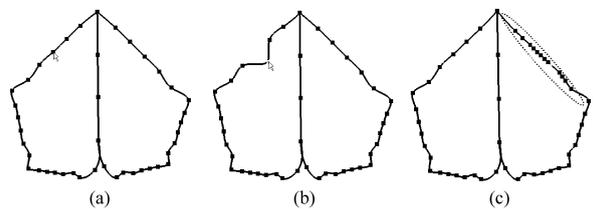


图 13 人工调节控制点  
Fig. 13 Manually adjust control points

表 5 叶片面积对比

Tab. 5 Comparison of leaf areas  $\text{cm}^2$

叶片编号	叶片面积		
	三维扫描	经验公式	本文方法
1	139.1	112.8	137.5
2	151.3	131.3	149.7
3	183.4	169.8	189.1
4	234.7	201.0	220.9
5	221.5	205.5	236.1

## 4 结束语

提出了一种基于数据约束的参数化黄瓜叶片建模方法,结果显示,利用本文方法可以快速生成较真实的三维叶片模型。同以往工作相比,本文方法利

用数据指导参数化设计,使参数设置、参数取值更加符合自然规律,并且得到的模型具有较精确的叶面积指数,容易应用到可视化计算之中;同时通过调控参数构建三维模型,使设计过程自动化,交互方便,建模过程更加迅速。

## 参 考 文 献

- 1 Rozenberg G, Lindenmayer A. Developmental systems with locally catenative formulas [J]. Acta Informatica, 1973, 2(3): 214 ~ 248.
- 2 Rodkaew Y, Lursinsap C, Fujimoto, et al. Modeling leaf shapes using L-systems and genetic algorithms [C]//Proceedings of NICOGRAPH2002, Tokyo, 2002: 73 ~ 78.
- 3 Mündermann L, MacMurchy P, Pivovarov J, et al. Modeling lobed leaves [C] // Proceedings of Computer Graphics International, Tokyo, 2003: 60 ~ 65.
- 4 Lu S L, Guo X Y, Zhao C J, et al. Modeling of organs and structures generating for crops [C]//International Symposium on Crop Modeling and Decision Support, Nanjing, 2008.
- 5 Loch B, Belward J, Hanan J. Application of surface fitting techniques for the representation of leaf surfaces [C] // International Congress on Modelling and Simulation, Melbourne: MODSIM Press, 2005:1 272 ~ 1 278.
- 6 迟小羽, 盛斌, 陈彦云, 等. 基于物理的植物叶子形态变化过程仿真造型[J]. 计算机学报, 2009, 32(2): 221 ~ 230.  
Chi Xiaoyu, Sheng Bin, Chen Yanyun, et al. Physically based simulation of weathering plant leaves [J]. Chinese Journal of Computers, 2009, 32(2): 221 ~ 230. (in Chinese)
- 7 Rodkaew Y, Siripant S, Lursinsap C, et al. An algorithm for generating vein images for realistic modeling of a leaf [C]// Proceedings of Computational Mathematics and Modeling, CMM2002, Bangkok, 2002.
- 8 Runions A, Fuhrer M, Lane B, et al. Modeling and visualization of leaf venation patterns [J]. ACM Transactions on Graphics, 2005, 24(3): 702 ~ 711.
- 9 Wang L F, Wang W L, Dorsey J, et al. Real-time rendering of plant leaves [J]. ACM Transactions on Graphics, 2005, 24(3): 712 ~ 719.
- 10 Baranoski G V G, Rokne J G. Efficiently simulating scattering of light by leaves[J]. The Visual Computer, 2001, 17(8): 491 ~ 505.
- 11 刘畅, 戴仕明, 郭新宇, 等. 植物叶缘形态特征的建模和可视化研究[J]. 计算机工程与设计, 2009, 30(6): 1 435 ~ 1 437, 1 440.  
Liu Chang, Dai Shiming, Guo Xinyu, et al. Simulation and visualization of morphological feature in plant leaf margin [J]. Computer Engineering and Design, 2009, 30(6): 1 435 ~ 1 437, 1 440. (in Chinese)
- 12 陆声链, 郭新宇, 李长锋. 3 维植物叶片精确建模和绘制技术研究[J]. 中国图象图形学报, 2009, 14(4): 731 ~ 737.  
Lu Shenglian, Guo Xinyu, Li Changfeng. Research on techniques for accurate modeling and rendering 3D plant leaf [J]. Journal of Image and Graphics, 2009, 14(4): 731 ~ 737. (in Chinese)
- 13 赵春江, 杨亮, 郭新宇, 等. 基于立体视觉的玉米植株三维骨架重建[J]. 农业机械学报, 2010, 41(4): 157 ~ 162.  
Zhao Chunjiang, Yang Liang, Guo Xinyu, et al. Corn skeleton reconstruction based on stereo vision[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(4): 157 ~ 162. (in Chinese)