

3 维植物叶片精确建模和绘制技术研究

陆声链^{1),2)} 郭新宇¹⁾ 李长锋¹⁾

¹⁾(国家农业信息化工程技术研究中心,北京 100097) ²⁾(上海交通大学 数字农业实验室,上海 200030)

摘要 准确、灵活的叶片模型对植物建模具有重要的意义,但目前大部分植物叶片曲面模型没有提供足够的准确性和细节描述。为了给生成准确、细致的叶片几何模型提供灵活的方法,即首先利用 B 样条曲线来描述叶片的边缘轮廓和主脉;然后用 Delaunay 三角化方法对叶片曲面进行网格化;最后通过改进 Loop 细分规则的自适应细分方法来优化叶片曲面,从而为植物叶片提供了一种灵活的 3 维几何造型描述方法。由于 B 样条曲线能够很好地描述大部分植物叶子的轮廓, Delaunay 三角化方法的使用又解决了包含多个裂片的叶片曲面的网格化问题,而自适应曲面细分方法则不仅使得生成的空间曲面具有更高的光滑度,同时可使得生成的叶片曲面能够进行卷曲变形。实验结果充分表明,该方法是有效的。

关键词 形态建模 3 维植物叶片 B 样条 细分曲面

中图法分类号: TP391.9 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2009)04-0731-07

Research on Techniques for Accurate Modeling and Rendering 3D Plant Leaf

LU Sheng-lian^{1),2)}, GUO Xin-yu¹⁾, LI Chang-feng¹⁾

¹⁾(National Engineering Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100097)

²⁾(Laboratory of Digital Agriculture, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030)

Abstract A variety of models for plant leaf morphogenesis have been reported, but none of them can be generated with great accuracy or level of detail. In this paper B-spline curve is used to describe the silhouette and midvein of plant leaf, and the leaf blade surface is meshed with Delaunay triangulation. Then an adaptive refinement scheme is introduced to smooth the triangular mesh. This may provide a common method for describing the morphology of plant leaf blade. B-spline curves which pass through the control points gives an intuitive mechanism to model the silhouette of a wide variety of plant leaf, and the usage of Delaunay triangulation solves the difficulty of meshing complex leaf blade such as lobbed leaf. In addition, our adaptive subdivision scheme can generate relative smooth leaf surface, and the curled effects can be obtained basing on the subdivided surface. The experimental results verify the validity of the proposed method.

Keywords morphological modeling, 3D plant leaf, B-splines, subdivision surface

1 引言

尽管植物形态建模和可视化已经获得了广泛的研究,但早期的工作大部分都是基于 L-系统^[1]进行的。L-系统主要注重植物的整个形态,而非细节的

模拟。近年来,随着计算机硬件性能的不断提高以及虚拟植物建模、景观设计、游戏等领域的研究不断深入,获得高度真实的植物造型成为可能和必需,同时,植物形态的多样性也吸引了诸多的研究者。正是由于植物叶片具有复杂的生理特征、几何形态和光学特性,因此植物叶片的形态建模和可视化仍然

基金项目:国家“十一五”科技支撑计划项目(2006BAD10A07);北京市优秀人才培养计划项目(20061D020050005)

收稿日期:2007-03-17;改回日期:2007-11-21

第一作者简介:陆声链(1979 ~),男。2008 年获上海交通大学机械工程专业博士学位。主要研究领域为虚拟现实、农业软件工程。

E-mail: lusl@nercita.org.cn

是真实感自然景物模拟中最具挑战的工作之一^[2]。

在计算机图形学中,通常用双三次曲面对单个叶面建模^[3]。但采用双三次曲面建模的一个问题在于单个曲面仅通过少数几个控制点来控制生成图形的形状,难以用来拟合复杂的曲面,特别是有多个裂片的叶子,很难用少数几个曲面拟合。为此,Mündermann 等人提出了一种专门针对有裂片的植物叶子的建模方法^[4],他们通过叶片的数字图像生成叶片的网格曲面,并采用变换、旋转等方法产生 3 维真实感的效果。Lintermann 和 Deussen 通过轮廓线、轴线和弧度定义一个叶片^[5],使用户可交互地对叶片进行调整,以生成各种叶片造型,但他们的方法主要适用于边缘不带裂片的叶子。Runions 等人通过对叶脉的生长进行建模和可视化,从而模拟了植物叶片的动态生长过程^[6],不过他们的算法只实现了 2 维平面的模拟,此外,这种方法生成的叶片边缘也难以控制。为了得到数值上“正确”的叶片造型,Loch 开发了一种叶片曲面拟合方法^[7],即通过数学方法拟合真实叶片的 3 维数据点云来重构叶片的曲面。对一棵植物而言,由于整棵植物有几百甚至上千上万个叶片,各个叶片的形状都不尽相同,要构造或重建数值上“正确”的叶片就需要获取所有叶片的 3 维数据点,这在实际应用中是难以做到的,因此这种方法只适合于需要对单个叶片进行高度真实重建的场合。

上述方法在一些虚拟植物模型或计算机视觉研究中得到了应用,但由于大部分方法都针对特定的植物,因此都不可避免地存在推广性的问题,即这些方法都很难适用于其他植物叶片的形态建模,特别是具有复杂形态叶片的建模。虽然实际应用中可以做简化处理,但细致真实的叶片形态无疑更有助于描述植物的品种特征。同时,大部分现有的方法都只是考虑了叶片在正常生长条件下的形态模型,而对叶片在高温、失水或病虫害等条件下的卷曲、萎缩等形态进行模拟仍然很少涉及。

本文的目的在于为植物叶片的精确几何建模提供一种灵活的方法和工具,以便能够以一种相同的描述方法来生成各种植物叶片的形态结构。笔者希望所建立的叶片模型不仅在视觉上真实,而且能够满足模拟叶片动态生长和某些生理功能的需要,如光截面面积、光合作用产生的干物质数量等的计算。同时,细致的叶面模型应能够支持更进一步研究的需要,如叶片在高温状态下的卷曲、失水条件下的萎

蔫等细节的可视化模拟。实验结果证明,本文提出的 3 维植物叶片建模方法较现有的方法具有更大的灵活性,能够生成各种植物叶片的 3 维几何造型,这种灵活性来自于基于 B 样条曲线的叶片边缘表示和基于 Delaunay 三角化的叶片曲面生成,而在此基础上的自适应细分不仅获得了更光滑的曲面和提高了模型的真实感,而且支持对叶片进行卷曲变形的模拟。

2 基于自适应细分的叶片建模方法

2.1 叶脉骨架的表示和生成

尽管植物叶片的形态千变万化,但大多数叶片都具有一个共同的特征,即叶片上生长着清晰的叶脉。因此,叶片的几何形态可简化为由主脉和边缘轮廓线组成的拓扑结构(如图 1 所示)。本文的思想是用样条曲线来表示叶片的主脉和边缘轮廓,两条边缘线的首尾都与主脉线的首尾重合,以构成叶片的主要框架。由于大部分的植物叶片可以表示为由一条首尾相连的边缘线包围而成的曲面(复叶可以理解为由多个子叶构成),所以只要表示边缘轮廓的曲线足够灵活,就可以用来拟合大部分叶片的边缘。边缘线上的控制点可以利用标准的边缘检测算法或角点检测方法从数字图像中获得,也可以利用 3 维数字化仪从真实的植物叶片上获取。

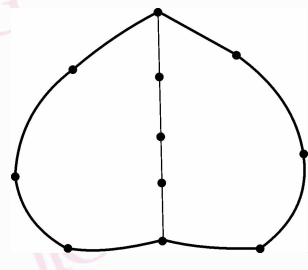


图 1 叶片的主脉和边缘线

Fig. 1 The midvein and silhouette of leaf

此外,也可以利用参数化的方法生成主脉和边缘线,其中主脉的长度、叶片的宽度、曲线控制点的个数等都可以在初始化时用参数指定。初始化得到的只是叶片的一个大概轮廓,而在实际建模中,由于各种植物叶子的形态各异,有些甚至与图 1 相去甚远,因此本文提供了动态调整主脉和边缘线的功能,使用户既可在 3 维空间自由拖动曲线上的控制点,

也可自由地在曲线上插入控制点,以拟合出各种各样的植物叶子形态。此外,用户也可以先载入真实的叶子图像作为背景,再根据图像调整叶片的边缘线。

2.2 叶片曲面的网格化

如图1所示,叶脉分别和两条轮廓线包围的部分组成了叶片的曲面。为了对这部分区域进行网格化,最简单的方法就是先在叶片边缘线和主脉线上取一系列的点,然后两两连接这些点,将叶片划分为一系列的四边形或三角形。但由于植物叶片形态千姿百态,某些叶片还包含裂片,这就表示围成的曲面可能包含凹区域,因此简单地两两连接主脉线和边缘线上的点可能使生成的曲面包含多余的凹区间。为此,本文采用经典的 Delaunay 三角化思想实现了3维不规则多边形的三角化,即对主脉两边的区域,首先按一定的间隔抽取主脉和边缘线上的点,组成一个闭合的多边形;然后对该多边形进行 Delaunay 三角化。图2(a)是对一个黄瓜叶片造型进行三角形网格化的结果,图2(b)则为曲面的渲染效果。

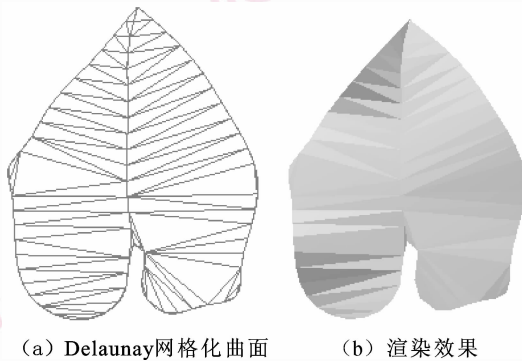


图2 叶片曲面的 Delaunay 三角化网格和渲染
Fig.2 Delaunay triangulation mesh and rendering of the leaf surface

2.3 叶片曲面的自适应细分

基于 B 样条曲线的叶片骨架表示和 Delaunay 三角化方法可以将本文提出的模型用来拟合各种植物叶片的几何形态。但该模型只利用一条主脉线和两条边缘线表示叶片的骨架,然后在这个基础上进行叶片曲面的三角形化,由于真实的植物叶片表面凹凸不平,简单地进行 Delaunay 三角化会将叶片曲面划分为一系列狭长的三角形,且各个三角形的法向量可能相差很大,使得曲面渲染的结果看起来极不光滑(如图2(b)所示),为此需要对生成的初始

三角化曲面进行光滑处理。

2.3.1 Loop 细分规则

为了获得更光滑的曲面,对网格化曲面进行细分^[8-9]是通常使用的一种方法,Loop 算法就是一种经常被采用的面向三角形网格的细分方法^[10]。Loop 算法是一种基于三角网格的面分裂细分模式,其生成的曲面是盒式样条曲面的推广。通常对一个模型进行细分可分为分裂和平均两步。其中分裂是在三角形的每条边上插入新点,并将其两两相连,使每个三角形分裂成4个小三角形;而平均则是重新计算网格上所有顶点在下一层细分中所处的位置。网格边上新插入的点称为奇点,而从前一层网格继承下来的顶点称为偶点,网格上一顶点的边连接数称为该顶点的价。在 Loop 细分模式中,计算奇点和偶点的权值如图3所示(分别称为奇点面具和偶点面具),其中图3(a)是在两个三角形的公共边上插入新点时计算新点坐标的权值,图3(b)是对三角形顶点坐标进行调整时使用的权值,图3(c)和图3(d)是计算边界上的奇点和偶点时使用的权值。

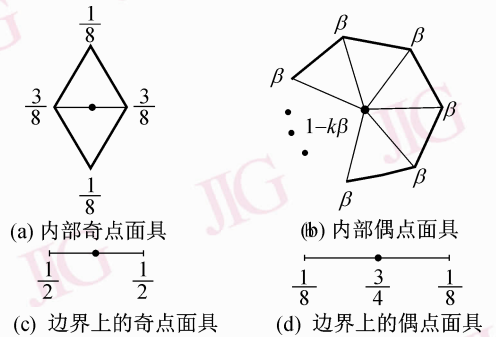


图3 Loop 曲面细分权值
Fig.3 The Loop subdivision masks

由于 Loop 曲面细分在每一层都是全局细分,因此细分1次后三角形的个数将是原来的4倍,这样随着细分次数的增多,网格的面片数将迅速增长,这就导致了在细节层次较高时的巨大计算负担。而实际上通常并不需要通过对整个模型进行细分来获得光滑的曲面,只需对不平坦或曲率较高的区域进行细分,即可使得这部分区域更光滑。再者,对一块原来已光滑的区域进行细分将不会得到明显的效果,只会增加数据量,而且还会影响模型的处理速度。针对此问题,一个解决办法是在细分某一层时,可根据实际需要,在满足精度范围之内,通过控制误差来

确定哪些区域参与下一层细分,哪些区域不参与,这样既可以达到利用细分来获得理想光滑曲面的目的,又可达到尽可能以相对较少的面片来逼近曲面的目的,这就是自适应曲面细分。

2.3.2 自适应曲面细分

一般在自适应细分曲面中,只有部分曲面区域参与下层的细分,而选择哪块区域参与细分则取决于用户的应用目的。在本文的自适应曲面细分中,只选择那些相对不平滑或曲率相对较高的曲面区域参与细分。具体地说,就是在插入奇点前,先计算以该奇点所在的边为公共边的两个三角形之间的夹角,如果夹角大于某个阈值,则不产生该奇点;而在计算偶点的新坐标前,则通过考察与该顶点连接的所有三角形的平坦程度来决定是否对该点坐标进行调整。

定义 1 三角形网格上顶点 v 的法向量定义为其 1 邻域上所有三角形的法向量的平均值,即

$$N_v = \frac{1}{k} \sum_{i=0}^{k-1} N_i \quad (1)$$

式中, N_i 为顶点 v 的 1 邻域三角形中第 i 个三角形的法向量, k 为顶点 v 的阶。如图 4 所示, 顶点 v 的法向量为 4 个三角形的法向量的平均值: $N_v = (N_0 + N_1 + N_2 + N_3)/4$ 。为处理方便, 本文统一将法向量转换为单位向量。

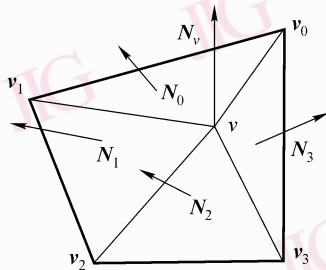


图 4 顶点法向量定义示意图

Fig. 4 The definition of normal vector of a vertex

定义 2 三角形网格上顶点 v 的平坦度定义为其法向量与其 1 邻域上三角形的法向量内积和的平均, 即

$$S_v = \frac{1}{k} \sum_{i=0}^{k-1} (N_i, N_v) \quad (2)$$

式中, (N_i, N_v) 为两个向量的内积。虽然顶点平坦度的定义比两面角稍微复杂些, 但是它考虑了顶点 v 与其 1 邻域上所有三角形的关系。这样就可通过设定一个阈值来控制三角形网格某个顶点的调整策

略, 如果满足用户给定的误差, 就不需要再对其进行进一步的调整。

由于式(2)中的法向量均为单位向量, 因此平坦度 S_v 的绝对值小于 1, 当 S_v 越接近于 1 时, 则说明该顶点的 1 邻域越接近平坦, 如果用户设定的阈值为 λ , 则当 $S_v > \lambda$ 时, 该顶点就不需要进行调整, 即不再计算该顶点的新坐标。而对于内部奇点, 即在两个顶点中插入的新顶点, 则应先计算共享该边的两个三角形的夹角, 若夹角大于某个阈值, 则不在该两个顶点中插入新的顶点。同时, 对于边界上的顶点, 包括边缘线和主脉线, 为保持这些线原有的形态, 可不对这些边界线上的点进行处理。

在计算内部奇点和偶点时, 仍然采用 Loop 细分的权值规则, 即

$$v = (3v_1 + 3v_2 + v_3 + v_4) \quad (3)$$

式中, v_1 和 v_2 是产生奇点的顶点, v_3 和 v_4 分别与这两个点组成 $\Delta v_1 v_2 v_3$ 和 $\Delta v_1 v_2 v_4$ 。而内部偶点, 即原有三角形顶点的计算则采用

$$v = (1 - k\beta)v + \beta \sum_{i=0}^{k-1} v_i \quad (4)$$

式中, k 为顶点 v 的阶, 而 β 的取值如下:

$$\beta = \begin{cases} \frac{3}{16} & k=3 \\ \frac{1}{k} \left(\frac{5}{8} - \left(\frac{3}{8} + \frac{1}{4} \cos \frac{2\pi}{k} \right)^2 \right) & k < 3 \end{cases} \quad (5)$$

在细分过程中, 由于不是简单地在三角形每条边上都插入一个新顶点, 因此每个三角形的分裂包括(如图 5 所示的)4 种情况。若每条边上都插入新顶点, 则分裂为 4 个小三角形; 若插入两个新顶点, 则分裂为 3 个三角形; 若只插入一个新顶点, 则分裂为两个三角形。

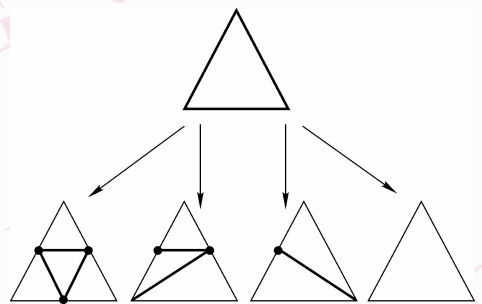


图 5 三角形分裂示意图

Fig. 5 The subdivision of a triangle

根据以上规则,叶片曲面网格的自适应细分方法步骤如下:

(1)利用 Delaunay 三角化方法,通过对叶片曲面进行网格化来得到初始网格;

(2)将包含在叶片边缘和主脉线上的网格线标识为边界;

(3)对于网格中的每个三角形顶点 v ,首先对其 1 邻域三角形顶点集 U 中的每个顶点 u 进行细分,若边 \overline{vu} 为边界,则继续;否则计算以边 \overline{vu} 为共享边的两个三角形的夹角,若夹角小于用户设定的阈值,则应用式(3)在边 \overline{vu} 上插入一个新的顶点,否则不插入新顶点。同时计算顶点 v 的平坦度 S_v ,若 $S_v > \lambda$ (λ 为用户设定的阈值),则应用式(4)重新调整顶点 v 的坐标。

(4)根据图 5 所示的三角形产生规则,利用步骤(3)插入的新顶点和原有的顶点来生成新的三角形网格。重复步骤(3),直到达到指定的循环深度或细分精度。

2.4 纹理映射

在几何造型渲染中,获得真实感的一个最常用的方法是纹理映射。本文的方法中,用来进行叶片边缘拟合的真实数字图像同时也为最终的叶片几何造型提供了纹理素材。具体地说,就是对于细分后的曲面网格上的每个三角形顶点 $v = (x, y, z)$,其纹理坐标用下式计算:

$$x_{\text{texture}} = (v.x - x_{\min}) / (x_{\max} - x_{\min}) \quad (6)$$

$$y_{\text{texture}} = (v.y - y_{\min}) / (y_{\max} - y_{\min})$$

式中, 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} 分别为顶点坐标中 y 分量的最大值和最小值。

3 实验结果和分析

为了演示本文建模方法的效果,应用该方法进行了几种植物叶片的 3 维建模实验。

首先,对图 2(a) 的初始网格进行自适应细分,图 6(a) 是一次细分后的网格,图 6(b) 为三次细分后的网格,而图 6(c) 则为 3 次细分后网格的渲染和纹理映射效果。从图中可以看出,该算法只对不平坦区域中的三角形进行细分,3 次细分后的渲染效果与图 2(b) 相比,光滑度有了极大的提高。

叶片卷曲的模拟是虚拟植物研究中的一个挑战^[11]。要模拟各种叶片卷曲的过程和结果是很困难的,因为它涉及到叶片与环境的交互和叶片的受力分析。为了简化此过程,本文将叶片的卷曲分为叶片两边的曲面绕主脉线旋转的纵向卷曲和叶片的顶部与底部绕叶片中位线旋转的横向卷曲。由于本文方法对叶片曲面进行了细分,因此理论上说,只要细分的次数足够多,就可以对叶片进行任意的卷曲模拟。图 7 是对图 6 的叶片曲面进行卷曲变形模拟的结果,其中图 7(a) 和图 7(b) 为纵向卷曲,图 7(c) 为横向卷曲。需要说明的是,曲面划分得越细,卷曲效果越佳,在叶片曲面细分时,每个三角形均分为 4 个三角形。从图 7 也可以看出,由于本文方法的卷曲变形是在计算好纹理坐标之后进行,因此卷曲变形后仍然可以应用纹理映射,这使得卷曲变换结果具有较高的真实感。

图 8 演示了本文的方法应用于复杂植物叶片形态建模的效果。其中图 8(a) 为边缘和主脉线图,是根据真实的数字图像拟合得到的,图 8(b) 是进行 3 次自适应细分后得到网格,图 8(c) 为纹理映射后的效果。

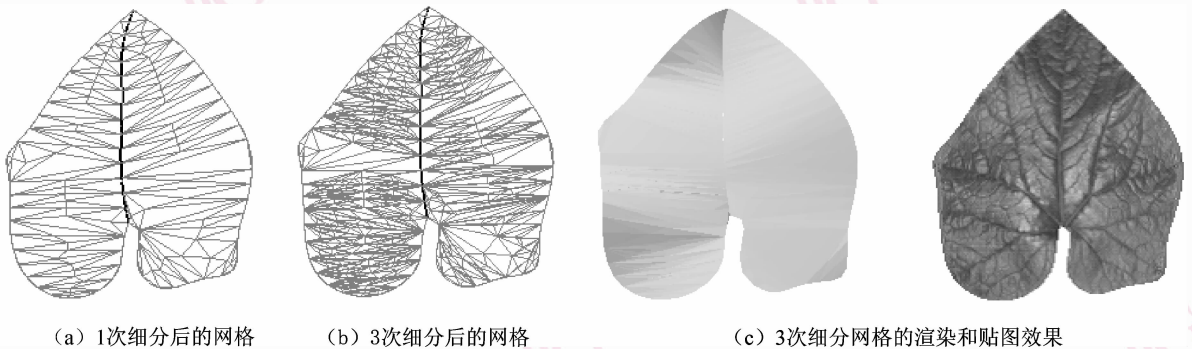


图 6 叶片自适应细分结果示意图

Fig. 6 The result of adaptive subdivision

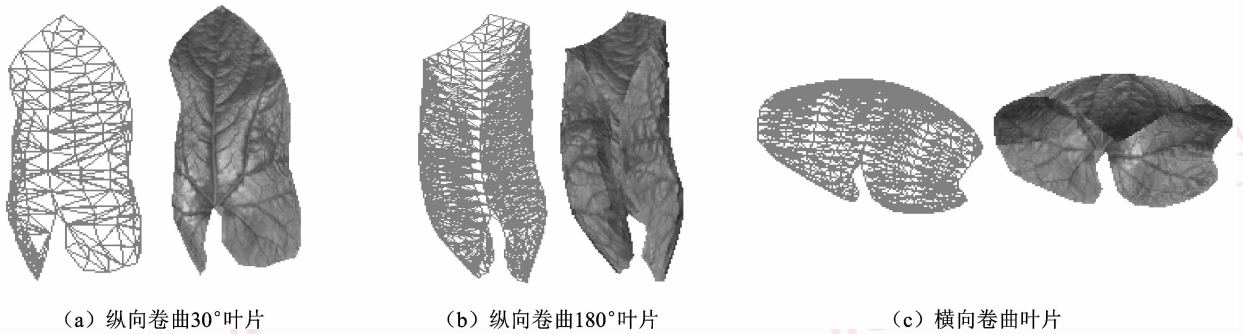


图 7 卷曲变形叶片效果图

Fig. 7 Curling leaf surface

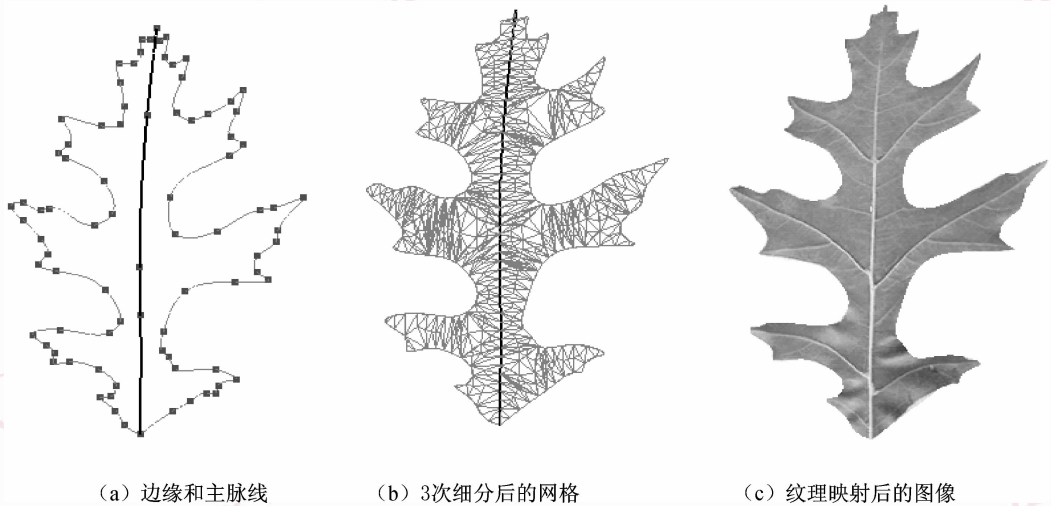


图 8 针状橡树叶片的 3 维建模

Fig. 8 3D modeling pin oak leaf

从上面 3 组实验结果可以看出,基于 B 样条曲线的叶片边缘表示和基于 Delaunay 三角化的曲面生成方法使得本文的方法能够灵活地应用于各种植物叶片的 3 维造型设计中。通过利用改进的自适应网格细分方法对叶片曲面进行光滑处理,可获得较为满意的视觉效果。细分后的曲面能够进行卷曲变换,实验结果也表明了本文提出的卷曲变换方法能够获得较好的建模效果。进一步可见,本文方法是一种交互式的设计方法,用户可自由控制所生成的网格的粗细程度和细分深度,以应用于不同的需要。需要说明的是,本文的细分方法,其生成的曲面的光滑度并不会随着细分次数的增加而显著改善,这主要是由于本文的细分策略只考虑了顶点的 1 邻域三角形。在这一点上,尚不能达到利用 Bézier 曲面和 NURBS 曲面方法生成的叶片模型那样的光滑度。但在大多少应用场合里,本文方法生成的模型已能

够满足视觉效果的需要。更主要的是,无论是 Bézier 曲面,还是 NURBS 曲面,都难以生成包含多个裂片的叶片造型,这也是本文研究一种适应性强的植物叶片 3 维几何造型表示方法的原因之一。

4 结 论

本文提出了一种灵活的植物叶片 3 维造型建模方法。该方法首先利用 B 样条曲线表示叶片轮廓和叶脉;然后采用 Delaunay 三角化方法对叶片曲面进行网格化;最后通过改进 Loop 细分规则的自适应细分方法来生成更光滑的叶片曲面。本文方法实现了植物叶片 3 维造型的统一表示,与其他模型相比,该方法具有以下几方面的优点:

(1) 过控制点的 B 样条曲线可使得生成的叶片轮廓便于进行直观的调整;

(2) Delaunay 三角化方法的使用,使得利用两条边缘线和一条主脉线就可以生成大部分植物叶片3维曲面网格;

(3) 自适应曲面细分方法可使得生成的空间曲面具有更高的光滑度;

(4) 细分后的叶片曲面可用于进行卷曲、萎蔫的模拟。

随着植物建模研究的不断输入,必将需要有更好的方法用来对植物器官进行更灵活的建模和更细致的描述,以支持图形学、农业、游戏等领域的研究和应用上的需求。本工作的主要目的是为了所建立的叶片模型不仅在视觉上真实,而且能够满足更进一步研究的需要,如叶片在失水或高温状态下的萎缩、叶片被害虫吃过后补偿生长等细节的可视化模拟。这都是值得进一步研究的问题。

参考文献 (References)

- 1 Prusinkiewicz P, Lindenmayer A. *The Algorithmic Beauty of Plants* [M]. New York, Berlin: Springer Verlag, 1990.
- 2 Wang L, Wang W, Dorsey J, *et al.* Real-time rendering of plant leaves [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2005, **24** (3): 712-719.
- 3 Godin C, Guédin Y, Costes E, *et al.* Measuring and analysing plants with the AMAPmod software [A]. In: Michalewicz M T, (ed.), *Plants to Ecosystems Advances in Computational Life Sciences* [C], Melbourne, Australia: CSIRO Publishing, 1997: 53-84
- 4 Mündermann L, MacMurchy P, Pivovarov J, *et al.* Modeling lobed leaves [A]. In: *Proceedings of Computer Graphics International Conference* [C], Tokyo, Japan, 2003: 60-65.
- 5 Lintermann B, Deussen O. Interactive modeling of plants [J]. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 1999, **19**(1):56-65.
- 6 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.
- 7 Loch B I. *Surface Fitting for the Modelling of Plant Leaves* [D]. Ph. D Dissertation, University of Queensland, Brisbane, Australia, 2004.
- 8 Smith C. *On Vertex-vertex Systems and Their Use in Geometric and Biological Modeling* [D]. Ph. D Dissertation, University of Calgary, Calgary, Canada, 2006.
- 9 Zhang Y C, Da F P, Song W Z. Piecewise c1 surfaces based on bivariate quartic box-splines for arbitrary triangular meshes [J]. *Journal of Software*, 2006, **17**(10):2211-2220.
- 10 Loop C. *Smooth subdivision surfaces based on triangles* [D]. Salt Lake City, UT, USA: University of Utah, 1987.
- 11 Sung M H, Simpson B, Baranoski V G G. Interactive venation-based leaf shape modeling [J]. *Computer Animation and Virtual Worlds*, 2005, **16**(3-4): 415-427.