

一种基于叶脉形状函数的叶片形态模拟改进方法

王 华

(浙江工业大学计算机科学与技术学院 杭州 310023)

摘 要 植物叶片的薄片状结构使得叶片的二维形态更加引人注目,但叶片的弯曲、凹凸等三维形态特征同样是叶片形态的重要组成部分。文章对 Runions 等提出的二维平面内植物叶片形态的模拟方法做出了改进,提出了一种基于叶脉形状函数的叶片形态模拟方法,将叶片形态的模拟扩展至三维空间。首先,用 B 样条曲线为不同等级的叶脉指定其在第三维方向的形状函数,得到具有三维形态的叶脉;之后,根据叶脉结构移动叶片边缘,得到边缘的三维形态。再用约束 Delaunay 三角化算法和 Loop 细分算法分别对叶面进行三角化、网格平滑细分处理,生成叶面网格模型。最终得到具有三维形态的植物叶片模型。实验表明,该方法能够有效地生成多种形态的三维植物叶片模型,可用于真实植物叶片的形态模拟。

关键词 植物建模,形状函数,L 系统,B 样条曲线,约束 Delaunay 三角化,Loop 细分

中图分类号 TP391 **文献标识码** A

Improved Method for Blade Shape Simulation Based on Vein Shape Function

WANG Hua

(School of Computer Science and Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

Abstract The shape of plant leaves is mostly flaky, which makes the two-dimensional shape of the leaves more attractive. However, the three-dimensional shapes of the leaves, such as bending and concave and convex, are also an important part of the blade morphology. Based on the simulation method proposed by Runions et al. for plant leaf morphology in a two-dimensional plane, a three-dimensional blade shape simulation method based on vein shape function was proposed. Firstly, the B-spline curve is used to specify the shape function in the third dimension for different grades of veins, and the veins with three-dimensional shape are obtained. The blade edge is then moved according to the vein structure to obtain the three-dimensional shape of the edge. Then the edge and the vein are sampled. The constellation Delaunay triangulation algorithm is used to construct the foliar triangle mesh, and the Loop subdivision algorithm is used to perform the mesh smooth subdivision processing to generate a smooth foliar mesh model. A plant leaf model with a three-dimensional morphology can then be obtained. Experiments show that this method can effectively generate three-dimensional plant leaf models of various forms, which can be used for morphological simulation of real plant leaves.

Keywords Plant modeling, Shape function, L-system, B-spline curve, Constrained Delaunay triangulation, Loop subdivision

1 引言

植物本身种类繁多、形态结构复杂且差异性较大,是计算机图形学中三维建模的重要对象。植物三维模型的建立又为探究植物形态的形成机理、农作物的生长规律提供了重要的工具和方法。因此,如何构建植物三维模型成为了计算机图形学、植物学、农学等领域共同的研究热点。

叶片是最常见的植物器官之一,构建其三模型,是构建植物三维模型的关键。目前在叶片三维建模方面,国内外的工作者已经积累了许多方法:基于几何工具的建模方法^[1-4]、基于图像的建模方法^[5-7]、基于点云的建模方法^[8-12]。基于几何工具的建模方法灵活高效,能根据需求构建各种形态的叶片模型,但对叶片的细节部分表达不足。基于图像的方法能够利用少量的图像信息构建叶片模型甚至整株植物模型,但模型质量也容易受到图像拍摄的角度、光照等因素的影响。基

于点云的叶片建模方法能够构建真实叶片的高精度模型,但模型精度受限于点云数据的采集设备。此外,这些方法一般以构建某一种形态植物叶片在某一生长周期的静态模型为目标,无法表现植物叶片形态的形成过程。

植物叶片形态的形成过程是一个复杂的生理变化过程,植物所处生长环境、生长周期的变化,使得不同种类之间、同一种类的不同生长周期之间的叶片形态结构表现出巨大的差异性,这些差异性使得构建叶片形态形成过程的三维模型十分具有挑战性。对此,Runions 等^[13]主要从植物学角度入手,利用 L 系统^[20]模拟真双子叶植物叶片形态形成的发生机理。使得针对同一初始形态的叶片,通过不同的参数设置能够生成各种形态的叶片模型,并且能表现其形态的形成过程。但该方法仅将叶片形态的形成视为二维平面内的变化过程,未考虑叶片的三维形态特征,并且该方法的参数设置较为复杂。

自然界中的植物叶片形态均是以三维方式呈现的,若仅

考虑其二维平面形态,不仅脱离了实际情况,而且丧失了叶片的弯曲、叶表面的凹凸变化等一系列复杂多样的三维形态特征。因此,相关二维研究无论是在科研领域还是实际应用领域都受到了一定的限制。基于以上原因,本文在 Runions^[13]方法的基础上,结合几何建模工具灵活便捷的特性,提出了一种基于 B 样条曲线形状函数的三维叶片建模方法。该方法针对二维平面内的叶片形态,以多条 B 样条曲线作为不同等级叶脉在第三维方向的形状函数,根据二维叶片的叶脉形态计算得到三维叶片的叶脉形态,之后经过边缘移动、叶面网格化等步骤,最终得到叶片的三维形态模型。利用本文方法得到的叶片三维模型与真实叶片具有一定的相似性,可用于真实植物叶片形态的模拟;同时,以 B 样条曲线作为叶脉形状函数比参数设置的方法更直观。

2 形态发生素影响下的二维叶片形态模拟

Runions 等^[13]提出了一种模拟二维叶片形态及其形成过程的方法。该方法首先使用连续变化的张量场来模拟叶面的连续生长,再利用分布于叶片边缘上的形态发生素对叶片的边缘形态进行影响,并结合形态发生素收敛点(convergence point)的形成指导新叶脉的形成,然后依据形成的叶脉为叶片的生长提供方向、动力以及支撑,最终模拟出叶片形态的动态形成过程。

他们采用的叶片结构仅限于二维平面内,忽略了叶片的卷曲及叶片厚度。叶片边缘表示为开放的多边形结构,包含一系列被称为采样点(sample points)的顶点序列。采样点按照类型分为普通采样点、形态发生素收敛点。叶脉表示为开放的二维树状结构,该结构的根部位于叶基部分,叶脉的终端会与叶片边缘的收敛点相连接;叶面则表示为三角网格。叶片的整体结构如图 1 所示。

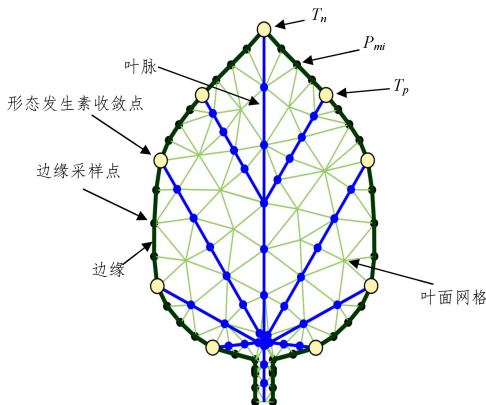


图 1 叶片结构

利用循环的生长过程模拟叶片的形成过程。一个循环过程包括:叶脉系统生长、边缘模拟、新叶脉的引入。叶脉的生长包括叶脉尖端的生长以及已有叶脉部分的生长两部分。前者由叶脉生长率来决定,后者由相对基本生长率(Relative Elementary Rate of Growth, RERG)^[14-15]决定:

$$RERG(P) = \frac{\Delta l}{l \Delta t}$$

其中, l 是点 P 处一叶脉段的弧长, Δl 是 Δt 时间内叶脉长度的增长量。根据 $RERG(P)$, 叶脉上点 P_1 到 P_2 之间的长度增长量表示为一段线积分 $\Delta l_{P_1 P_2}$ 。

$$\Delta l_{P_1 P_2} = \int_{P_1}^{P_2} RERG(P(s)) ds$$

边缘模拟包括边缘生长和边缘形状模拟。边缘生长主要由叶脉系统生长驱动,首先将边缘分割为若干段,每段随着收敛点的出现,动态关联到其所包围的叶脉上。随着叶脉系统的生长,在叶脉方向上的生长是边缘点正交投影到关联的叶脉上,并随之移动相同的距离。在宽度方向上的生长,则是沿着边缘采样点的法向量方向生长^[16]。

边缘形状的模拟,首先利用边缘采样点将边缘离散化为若干段线段,再通过边缘采样点与线段之间的关系将边缘形状的拉伸与弯曲量化地表达为拉伸量和弯曲量,最后通过最小化这些变量之和求得采样点的移动向量。不断迭代该过程,移动采样点的位置,进而模拟出不同形状的边缘。

是否引入新的叶脉,则依据计算所得的边缘模式来确定。新叶脉由新形成的收敛点连接到已有的叶脉系统形成。叶脉的连接方式依赖于两条启发式规则:1)两个连接点之间的叶脉短且直^[17],并且叶脉选择使得水分和光合作用产物在叶片中的传播阻力最小的路径^[18];2)限制新叶脉与边缘点 P 处法向量之间的角度 σ 在 $[-\sigma_{\max}, \sigma_{\max}]$ 之间,以防止叶脉与边缘之间出现不自然的角度。

植物叶片的薄片状结构使得植物叶片的二维形态显得更加重要,如图 2 所示。然而,叶片的三维特征同样是叶片形态的重要组成部分。Runions 等的方法仅适用于叶片二维形态的建模,因此本文在其基础上加以改进,提出了一种叶片三维形态的模拟方法。

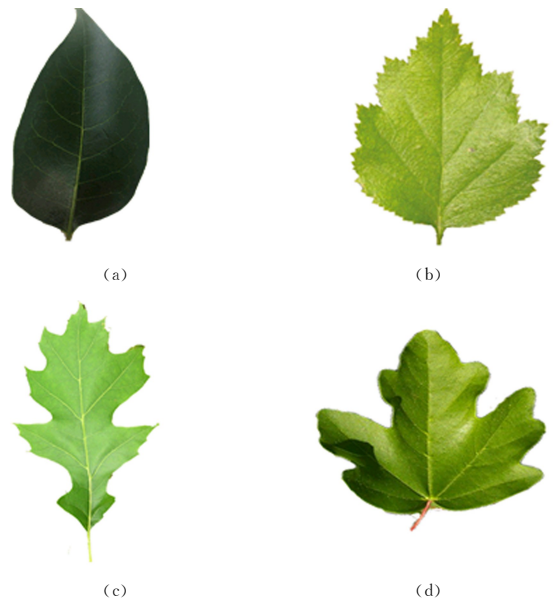


图 2 4 种不同形态的真实植物叶片

3 叶片形态模拟算法的改进

Runions 等^[13]对叶片二维形态的模拟是以叶片形态的形成机理为基础,主要模拟了叶脉、边缘、叶面三部分。本文将叶片形态的模拟扩展至三维,同样从叶脉、边缘、叶面三部分入手分别做出改进。叶脉部分,根据叶脉等级的不同指定不同的 B 样条曲线作为形状函数,根据二维平面内的叶脉形态以及叶脉缩放因子得到叶脉三维形态。边缘部分,根据三维叶脉尖端位置,通过边缘移动将边缘形状扩展至三维。叶面部分,以叶片边缘作为轮廓约束,以叶脉采样点作为内部点进

行叶面三角化,构建叶面网格,之后进行网格细化,得到叶面网格。算法流程图如图3所示。

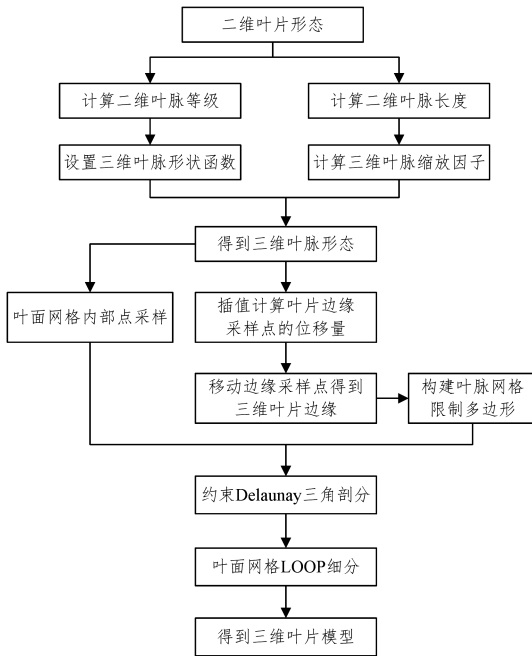


图3 算法流程图

本文中叶片的结构表示仍采用 Runions^[13]的方法,并将其应用于三维情况,但不考虑叶片重叠的情况。此外,假定三维叶片形态位于 xyz 坐标系中,二维叶片位于 xoy 平面内,以便于描述。

3.1 叶脉生成

叶脉由于其自身的相对刚性,为叶片形态结构提供支撑的同时,在一定程度上决定了叶片的形态。对于二维平面中的叶片,叶片边缘的形状与叶脉的长度以及排列共同决定了叶片的主要形态。而在三维空间中叶脉形态还决定叶片的弯曲、凹凸等叶面的起伏变化,因此叶脉形态更加重要。

在 Runions^[13]的方法中,叶脉被表示为平面内的直线段,叶脉的排列方式主要考虑了关于主叶脉对称的叉状叶脉(如图2中的(a),(b),(c))和主叶脉两侧交错排列的叶脉两种(如图2)。而在三维空间中叶脉形态灵活多样,因此多采用几何工具进行模拟。文献[1]用B样条曲线模拟西瓜叶片的主叶脉,文献[4]用球B样条曲线模拟烟草叶片的叶脉。

本文对叶脉的模拟也主要考虑叶脉在三维空间的形态变化,因此选择以B样条曲线作叶脉在方向的形状函数,对不同等级的叶脉指定不同的形状函数。三维空间中,每一等级的叶脉形态由叶脉的二维形态、叶脉形状函数和叶脉缩放因子共同决定。叶脉等级则根据每一个叶脉分支的起点到叶基的距离^[13]指定,到叶基的距离越长则叶脉等级越高,具有相同的到叶基距离的叶脉具有相同等级。叶脉缩放因子则与叶脉长度相关。第 i 级叶脉上的一点 P_i 在 t 时刻的 z 坐标 P_i^z 由式(1)计算:

$$P_i^z = B_i \left(\frac{P_i^{xy} - O_i^{xy}}{T_i^{xy} - O_i^{xy}} \cdot \frac{t}{t_f} \right) \cdot \omega_i + \sum_{i=2}^i B_{i-1} \left(\frac{O_i^{xy} - O_{i-1}^{xy}}{T_{i-1}^{xy} - O_{i-1}^{xy}} \cdot \frac{t}{t_f} \right) \cdot \omega_{i-1} \quad (1)$$

其中, B_i 是第 i 级叶脉对应的形状函数, P_i^{xy} 是点 P_i 对应的 xy 坐标, O_i^{xy} 是第 i 级叶脉的起点坐标, T_i^{xy} 是 i 级叶脉的尖端坐标, t_f 是模拟结束时的叶龄, ω_i 是用于控制叶脉对叶片

形状影响权重的缩放因子。缩放因子的大小与叶脉长度相关,根据对一般叶片的观察,长度越短的叶脉对叶片形状的影响越小。因此,缩放因子 ω_i 的大小由每段叶脉在 xy 平面的投影长度决定,长度越短, ω_i 越小。

叶脉的宽度绘制则采用 Runions^[19]等人提出的管道模型,管道模型的公式^[20]为:

$$r^n = r_1^n + r_2^n \quad (2)$$

其中, r 是在叶脉分支点以下的半径, r_1 和 r_2 是在叶脉分支点以上的半径, n 用于控制这些量之间的异速生长关系。宽度的计算从叶脉尖端开始,假定叶脉尖端的宽度为 r_{min} , 随着向叶片底部的推进,在每个分支点上,宽度以 r_{inc} 的比率与叶脉长度成比例地增加。

在二维平面中,叶脉的绘制是根据管道模型将其细分为长度不同的平面矩形。在三维空间,叶片形态的变化会造成叶片遮挡平面表示的叶脉的问题,本文采用将叶脉改进为用半径不同的圆柱体进行表示的绘制方式,同时能够增强叶脉绘制的真实感。

3.2 边缘形状的模拟

叶片边缘的形状主要是指边缘的凹陷程度,也可表示为边缘对叶脉的包围程度。叶片边缘的形状也是影响叶片形态的重要因素。

对于二维平面内的叶片,Runions^[13]通过对边缘几何形状的离散化表示来模拟不同的边缘形状。对于三维空间中的叶片,边缘的形状主要是指边缘凹陷随着叶片的弯曲而移动,使得边缘形状贴合于叶片形状。如图2中图(a)到图(d)边缘深度不断加大,同时叶片边缘会随着叶片的卷曲变化而变化。本文中叶片在三维空间的弯曲是由叶脉决定的,因此边缘的位置也由叶脉的尖端位置决定。对于每个边缘采样点的位置,根据采样点与相邻叶脉尖端的位置关系,采用均匀插值的方法来计算。边缘采样点 P_{mi} 在 z 方向的位置 P_{mi}^z 为:

$$P_{mi}^z = T_n^z + \frac{T_p^z - T_n^z}{C_m} \cdot C_{mj} \quad (3)$$

其中, T_p^z 表示与 P_{mi} 相邻的前一个叶脉尖端的 z 坐标, T_n^z 表示与 P_{mi} 相邻的后一个叶脉尖端的 z 坐标。对于对称叶片,靠近主脉尖端的叶脉靠前,反之靠后。 C_m 表示两个相邻叶脉尖端之间的采样点个数,从1开始计数,不包含两边的采样点。 C_{mj} 则表示 P_{mi} 是两个相邻叶脉尖端之间的第 j 个采样点,如图1所示。

3.3 叶表面模拟

本文中叶面结构依然采用三角网格表示,因此需要对叶面进行三角化处理。由于叶片边缘形状不同,叶片可能是一个包含凹区间的多边形,因此不能直接使用经典的 Delaunay 三角化方法^[39]。约束 Delaunay 三角化算法^[22-24]适用于包含凹区间的多边形的三角剖分,也适用于凸多边形的三角剖分,同时不需要对包含凹区间的多边形进行额外的处理步骤。我们以叶片边缘轮廓作为限制多边形、叶脉采样点作为内部点来构建边缘不规则的叶片的三角网格,具体步骤如下。

Step 1 连接叶片边缘采样点,构建待三角化区域的限制多边形。

Step 2 对叶脉进行采样,在待三角化区域内部插入叶脉采样点。

Step 3 进行约束 Delaunay 三角化剖分。

Step 4 初始情况下,将经过三角化的所有区域标记为-1。

Step 5 根据三角面片与限制多边形的关系进行区域标记更新,限制多边形外层标记为0,内层为1。

Step 6 标记为1的区域即为不规则多边形的三角化网格。

经过以上步骤可以得到叶面的三角化网格,但仅由三角剖分得到的网格十分粗糙,为了得到光滑叶面,需要对叶面网格进行细分处理,这里采用常用的 Loop 细分方法^[25]。Loop 细分方法是一种通过不断将原三角形1分为4,并在分裂过程中更新原三角形顶点位置的经典三角网格细分方法。

4 实验结果与分析

本文实验在 Windows 10 操作系统下使用 VMware 虚拟机安装 Fedora27 操作系统完成。在 vlab 平台下使用 L+C 语言开发,开发过程中用到了 CGAL^[23-24,26]。虚拟机的硬件配置设置为4核CPU,4GB内存。宿主计算机的硬件配置为 Intel i7-6700k(4 GHz)CPU,16 GB 内存,Intel HD Graphics 530 显卡。

实验过程首先指定二维叶片形状生成参数,再使用 B 样条曲线指定叶脉在 z 方向的生长函数。这里二维叶片形态的生成参数选用 Runions^[13] 提供的5种形态差异较大的叶片生成参数。此外,还寻找了形态相似的真实植物叶片作为实验结果对照,结果如图5所示。

在实验结果的图片序列中,(a1)–(a5)为真实植物叶片;(b1)–(b5)是利用 Runions^[13] 方法生成的二维植物叶片;(c1)–(c5),(d1)–(d5),(e1)–(e5),(f1)–(f5)分别是使用本文方法生成的三维植物叶片模型的正视图、左视图、俯视图和斜视图。

在叶面网格细分阶段,由于 Loop 细分算法对尖锐特征的模拟不足^[27],当叶面形状起伏变化过大时,Loop 细分之后会导致叶脉与叶面网格分离。为尽可能保证网格与叶脉一致,本文分别以每段叶脉投影长度的 $1/200, 1/100, 1/25, 4/25$ 作为采样间隔进行实验,并根据实验结果最终选定 $1/200$ 作为采样间隔。实验结果表明:只需进行1次 Loop 细分处理,即可得到光滑的植物叶片模型。从对比实验结果来看,本文生成的植物叶片模型,其二维形态与 Runions^[13] 的结果一致;三维形态上表现出了叶片的弯曲、叶表面的凹凸起伏变化,并且与真实叶片具有一定相似性。

此外有两点需要说明,(1)等级的划分依据的是每一分支叶脉起始点到叶基的距离。选择这样的规则同样基于两点,1)可以更好地标识叶脉,如果对左右对称的叶脉用正负号加以区分,则可以为每一分支的叶脉提供不同的标识,这在为叶脉指定形状函数时提供了更好的灵活性。(2)到叶基的距离越长,叶脉越处于叶片边缘位置,对叶片形态的影响越小,据此可以更好地绘制叶脉形状函数。然而随着叶片的生长,这样的等级划分是动态变化的,因此本文的形状函数指定方法只对最终的叶片形态有效。当使用基于父子关系的叶脉等级指定规则时,虽然能够保持叶脉等级的稳定性,但同时也丧失了灵活性。目前尚未找到解决这一问题的有效办法,因此本文倾向于选择最终模型结果的叶脉等级指定方式。2)本文选择基于形状函数的三维叶脉生成方法而未考虑叶脉的形成机理,这是由于在三维空间中叶脉的形态除了受到形态发生素的影响外,还受重力等外界环境的影响,而目前这些影响因素的作用机理并不完全清楚。

结束语 本文提出了一种三维形态植物叶片模型生成方法。该方法基于二维植物叶片的形态生成过程,通过为不同等级的叶脉指定在第三维方向的生长函数,能够生成多种形态不同的三维植物叶片模型。实验结果表明利用本文方法生成的三维植物叶片模型形态多样,并且与真实植物具有一定的相似性,该方法具有一定的普适性。但仍存在一些问题:首先,目前的叶脉等级指定方法不是能很好地表现三维叶片的动态形成过程;其次,本文仅考虑了叶片形态的模拟,未考虑叶片的纹理、光照等表现参数的模拟,这些问题是今后的研究重点。

参 考 文 献

- [1] 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(12):4155-4163.
- [2] 刘晓东,蒋立华.基于 Bezier 曲线的植物形态建模和显示[J].计算机工程与应用,2002,38(13):97-98.
- [3] 刘晓东,曹云飞,刘国荣,等.基于 NURBS 曲面的水稻叶形态建模[J].微电子学与计算机,2004,21(9):117-119.
- [4] 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.
- [5] QUAN L, TAN P, ZENG G, et al. Image-based plant modeling [C]//ACM SIGGRAPH. ACM,2006:599-604.

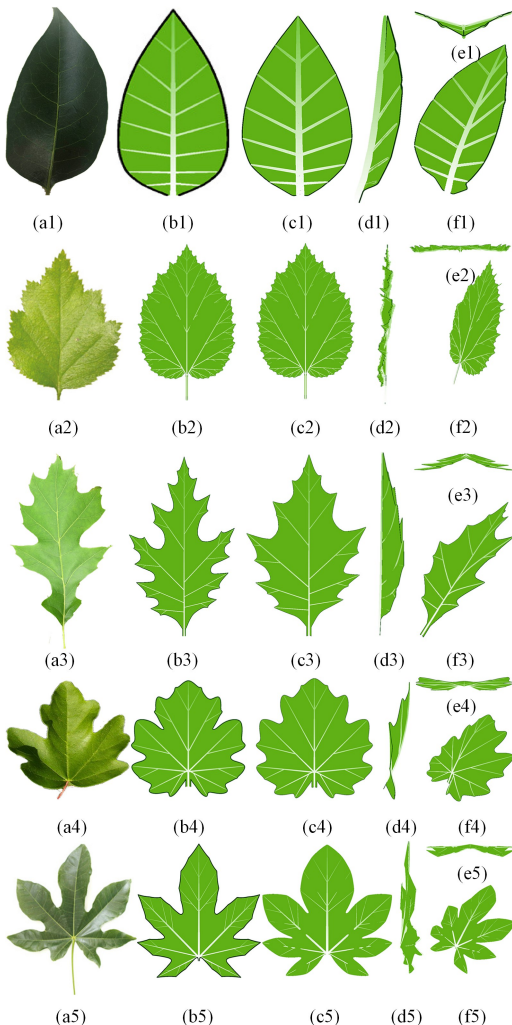


图5 实验结果对比

- [6] MUNDERMANN L, MACMURCHY P, PIVOVAROV J, et al. Modeling lobed leaves[C]// Computer Graphics International, 2003. IEEE, 2003; 60-65.
- [7] 杨亮, 郭新宇, 陆声链, 等. 基于多幅图像的黄瓜叶片形态三维重建[J]. 农业工程学报, 2009, 25(2): 141-144.
- [8] LOCH B. Surface fitting for the modeling of plant leaves [D]. Brisbane: University of Queensland, 2004; 26-38.
- [9] LOCH B I, BELWARD J A, HANAN J S. Application of Surface Fitting Techniques for the Representation of Leaf Surfaces [C]// MODSIM05. 2005; 1272-1278.
- [10] OQIELAT M, BELWARD J A, TURNER I W, et al. A Hybrid Clough-Tocher Radial Basis Function Method for Modelling Leaf Surfaces[C]// Proceedings of the International Congress on Modelling & Simulation. 2007.
- [11] 孙智慧, 陆声链, 郭新宇, 等. 基于点云数据的植物叶片曲面重构方法[J]. 农业工程学报, 2012, 28(3): 184-190.
- [12] 曾兰玲, 张巍, 杨洋, 等. 基于有限细节的植物叶片多密度点云重建算法[J]. 计算机科学, 2016, 43(8): 292-296.
- [13] RUNIONS A, TSIANTIS M, PRUSINKIEWICZ P. A common developmental program can produce diverse leaf shapes[J]. New Phytologist, 2017, 216(2): 401-418.
- [14] RICHARDS O W, KAVANAGH A J. The analysis of the relative growth gradients and changing form of growing organisms: illustrated by the tobacco leaf[J]. The American Naturalist, 1943, 77(772): 385-399.
- [15] HEJNOWICZ Z, ROMBERGER J A. Growth tensor of plant organs[J]. Journal of Theoretical Biology, 1984, 110(1): 93-114.
- [16] BILSBOROUGH G D, RUNIONS A, BARKOULAS M, et al. Model for the regulation of Arabidopsis thaliana leaf margin development [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2011, 108(8): 3424-3429.
- [17] BAYER E M, SMITH R S, MANDEL T, et al. Integration of transport-based models for phyllotaxis and midvein formation [J]. Genes & development, 2009, 23(3): 373-384.
- [18] SACK L, SCOFFONI C. Leaf venation: structure, function, development, evolution, ecology and applications in the past, present and future[J]. New Phytologist, 2013, 198(4): 983-1000.
- [19] RUNIONS A, FUHRER M, LANE B, et al. Modeling and visualization of leaf venation patterns [J]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2005, 24(3): 702-711.
- [20] SHINOZAKI K, YODA K, HOZUMI K, et al. A quantitative analysis of plant form—the pipe model theory: I. Basic analyses [J]. Japanese Journal of ecology, 1964, 14(3): 97-105.
- [21] CIGNONI P, MONTANI C, SCOPIGNO R. DeWall: A fast divide and conquer Delaunay triangulation algorithm in Ed [J]. Computer-Aided Design, 1998, 30(5): 333-341.
- [22] CHEW L P. Constrained delaunay triangulations [J]. Algorithmica, 1989, 4(1-4): 97-108.
- [23] YVINEC M. 2D Triangulation [EB/OL]. <https://www.cgal.org>.
- [24] SHUUE L J A. 3D Surface Subdivision Methods [EB/OL]. <https://www.cgal.org>.
- [25] LOOP C. Smooth subdivision surfaces based on triangles [D]. University of Utah, 1987.
- [26] HEMMER M, PION S. Modular Arithmetic [EB/OL]. <https://www.cgal.org>.
- [27] 江焯林, 黎绍发, 贾西平, 等. 典型三角网格细分算法[J]. 计算机工程, 2009, 35(6): 7-10.

(上接第 207 页)

结束语 基于自制足底三维扫描仪, 本文根据点云数据的采集方式、信息特点以及存储形式构建了深度图像模型。所重建的曲面相对复杂, 为充分描述足底形态并考虑到点云为单值曲面, 论文基本保留了所有测量数据, 只删除了部分噪点, 省略了少数非关键信息点, 没有涉及精简数据的相关问题, 边界提取后的光顺方法可借鉴已有文献^[8-11]进一步处理。论文主要依次提出多步预处理手段, 为主要的曲面剖分重构提供前提。本文提出的细节化三角剖分重构技术目前只针对单一视点曲面点云数据, 算法实验效果较依赖激光采样分辨率。实验证明: 提出的三角剖分方法以简明的运算逻辑较充分地展示了足底曲面的三维几何特性, 为后续足底医学矫正的建立奠定了坚实的基础。

参 考 文 献

- [1] 李晓志, 李晓久, 王玉秀. 基于人体扫描线点云的光顺去噪[J]. 纺织学报, 2010, 31(3): 133-138.
- [2] 吴福生, 丁玉成, 卢秉恒. 基于点云数据复杂曲面产品的快速开发[J]. 西安交通大学学报, 2002, 36(11): 1151-1155.
- [3] 周富强, 李章, 张广军. 基于三维测量扫描线点云的表面重建[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(6): 619-623.
- [4] 孙晓鹏, 李思慧, 王璐, 等. 耳廓点云形状特征匹配的路径跟踪算法[J]. 软件学报, 2015, 26(5): 1251-1264.
- [5] 张爱武, 孙卫东, 李风亭. 基于激光扫描数据的室外场景表面重建方法[J]. 系统仿真学报, 2005, 17(2): 384-387.
- [6] 王建军, 魏宗信, 黄龙传. Z-map 模型点云的边界提取及光顺[J]. 机床与液压, 2010, 23(12): 41-44.
- [7] 孙殿柱, 刘华东, 史阳, 等. 基于核密度估计的散乱点云边界特征提取[J]. 农业机械学报, 2013, 44(12): 275-279.
- [8] 高翔, 王华, 陈关龙. 面向复杂形面匹配的边界特征提取方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016, 48(7): 46-50.
- [9] 张旭, 王青, 柯映林. 基于模板的点云边特征提取技术[J]. 计算机集成制造系统, 2008, 14(6): 1175-1181.
- [10] 丁丽娟, 程纪元. 数值计算方法[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2005: 101-164.
- [11] 李兰友. Visual C++ .NET 图形图像编程[M]. 北京: 电子工业出版社, 2002: 253-257.