

基于物理的植物叶子形态变化过程仿真造型

迟小羽¹⁾ 盛 斌³⁾ 陈彦云²⁾ 吴恩华^{1),3)}

¹⁾(中国科学院软件研究所计算机科学国家重点实验室 北京 100190)

²⁾(欧特克软件(中国)有限公司 上海 200127)

³⁾(澳门大学科学技术学院电脑与资讯科学系 澳门)

摘 要 文中提供了一种对植物叶子造型的新方法,可以非常真实地展现叶子在干枯、老化过程中几何形态的变化.基于植物学和物理原理,文中引入了双层结构模型表达叶子的力学结构,很好地模拟了不同种类植物叶子形状的多样性.文中首先分析了叶子形状变化的原因,即在叶子枯萎过程中,叶肉和叶脉由于各自不同的组织结构,导致了收缩比例不同,从而在物理模拟中,通过建立关于叶子基本结构的双层质点-弹簧模型,并对上下两层的不同参数的合理设置,很好地表现了叶肉和叶脉的不同力学特性.双层模型的相互作用,决定了叶子最终变形的方式和效果,由此可以得到非常接近真实树叶的各种叶子形态.

关键词 物理模拟;质点-弹簧模型;叶子

中图法分类号 TP391

DOI号: 10.3724/SP.J.1016.2009.00221

Physically Based Simulation of Weathering Plant Leaves

CHI Xiao-Yu¹⁾ SHENG Bin³⁾ CHEN Yan-Yun²⁾ WU En-Hua^{1),3)}

¹⁾(State Key Laboratory of Computer Science, Institute of Software, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

²⁾(Autodesk, Shanghai 200127)

³⁾(Department of Computer and Information Science, Faculty of Science and Technology, University of Macau, Macao)

Abstract This paper presents a method for the efficient simulation of a large number of plant leaves, realistically showing their weathering process in autumn time, with various deformed shapes. In modeling various shapes of leaves for weathering, the authors introduce a botanically and physically based method is introduced for simulating variations of leaf shape by using a double layered model (DLM). This model takes advantage of the key observation that the withered shapes of leaves are caused by different shrinkages between the mesophyll cells and vein cells during the aging process of leaves. By setting up the mass-spring system in two interconnecting layers, different kinetic manners of mesophyll and veins can be simulated respectively. Meanwhile the double layers affect each other and determine together the deformed shape of leaves.

Keywords physically-based simulation; mass-spring; leaf

1 引 言

在计算机图形学中,对于自然场景中植物的建

模和绘制一直是绘制技术发展过程中的重点.对植物进行造型、材质表达以及真实感绘制,一直是极富挑战性的研究工作.

众所周知,植物往往由很多具有不同外形特征

收稿日期:2007-08-27;最终修改稿收到日期:2008-12-10. 本课题得到国家“九七三”重点基础研究发展规划项目基金(2002CB312102)资助. 迟小羽,男,1980年生,博士研究生,主要研究方向为计算机图形学、真实感绘制. E-mail: cxy@ios.ac.cn. 盛 斌,男,1981年生,博士研究生,主要研究方向为基于图像的绘制、虚拟现实和几何处理学. 陈彦云,男,1971年生,博士,工程师,主要研究方向为计算机图形学. 吴恩华,男,1947年生,博士,研究员,博士生导师,主要研究领域为真实感图形、虚拟现实、科学计算可视化等.

的器官组成,如茎、叶子、花、果实等.而自然界中的植物,与大部分人造形体的最大区别在于:人造形体往往按照人们的审美和应用需求,在制造过程中,其几何形状是可以控制的,并易于被描述和掌握;而对于自然景物的植物而言,其几何形状的形成,则是自然界中各种复杂内外因素,如外部病虫害入侵、气候因素、人为影响等,经过长时间互相影响、共同作用的结果.因此,作为自然界中的植物,通常拥有非常特殊的形态.尤其植物的叶子,随着季节与气候的变化,其形态变化十分显著,这也在相当程度上决定了植物外观特征.而在以往的计算机辅助建模中,用简单、固定的几何图形很难真实地表现叶子在不同环境和季节下的外形特征.同时,由于现有技术的限制,在计算机图形学真实感绘制领域中,大部分绘制出来的场景均为静态场景,即场景中的物体几何形状并不能随时间的变化而变化,这不仅与自然界的真实情况不符,绘制的真实感不强,也极大地限制了植物仿真技术的进一步发展.因此,我们对作为自然场景中最主要组成部分之一的植物树叶的几何形态的特征,以及它们随时间变化而变化的情况进行了分析,使叶子的绘制结果更加贴近自然真实.通过这些研究,就能在虚拟现实的相关应用中构建更加逼真的场景,也可以让植物的真实感绘制在游戏、影视、生物、环保等领域得到进一步应用.

虽然基于物理的几何变形在计算机图形学中已经有了很长的研究历史,但植物仿真中却很少采用基于物理的方法.其主要原因在于植物叶子的物理学和生物学机理在计算机图形学中尚无深入的分析研究,导致植物绘制中许多叶子的几何造型带有人工制造的痕迹.在植物老化、枯萎过程中,其叶子的卷曲、变形主要是由于叶肉与叶脉在失水过程中具有不同的收缩比率而造成的.为解决这一问题,我们提供了一种基于生物和物理学的双层模型(DLM),该模型可以很好地模拟各种植物叶子在季节变化中的几何形状的变化.双层模型用一个上层网状模型来模拟叶肉细胞的收缩变形,用一个下层叶脉模型来模拟叶脉的收缩变形,并通过建立起上下两层模型互相联结的方式来最终决定随时间变化时叶子的最终形态.同时,通过对真实植物叶子的观察,我们发现,随着时间的变化,叶子的不同空间变形情况也在一定程度上取决于叶脉在叶子表面的分布.为此,我们将叶子变形仿真中的参数设置为随时间-位置变化的量.实验结果证明,通过设置在时间-位置域上变化的参数,我们能够真实地模拟叶子在不同环

境下的不同变形过程.

质点弹簧模型曾经被普遍地用于对织物的物理模拟,这里我们通过改变其结构,将其引入对植物叶子的模拟,从而更真实的模拟叶子在变化中的形态.通过双层质点-弹簧模型的物理模拟,利用叶子的生物学结构对其进行了变形运算.同时,我们还得到了一组设置物理模拟中各种参数和系数的一套方法和交互调整手段,此外,仿真系统还实现了对于变形参数交互设置,这就很好地表现了植物叶子的力学特性.实验结果表明,双层模型可以逼真地模拟真实世界中叶子的多种变形效果.而且,与其他对于植物构型和模拟的工作不同,我们的工作主要研究了随时间变化的情况下,植物叶子形态的变化,即在秋天,随着气温和湿度的变化,叶子的形态也会产生相应的变化,我们的方法很好地模拟了这一过程.

2 相关工作

2.1 物体老化模拟

关于物体、风化模拟的一些研究和工作,主要是关于物理过程的模拟,比如 Dorsey 和 Hanrahan (1996)关于金属锈迹光泽的工作,Dorsey(1999)的岩石侵蚀,Paquette(2002)关于油画、壁画碎裂和脱皮的模拟等等.而另一些用于生成随时间变化而变化的表面特征的方法,主要基于对几何可达性的建模,从而模拟暴露在物体表面的外在老化效果,如 Miller(1994)、Hsu 和 Wong(1995)、Wong(1997)、Chen(2005)的方法.以上这些技术主要关注如何计算表面上某一位置的老化度,而并没有太多关注一旦获得此点的老化度之后,如何确定这一点的实际表现.尤其是,这些方法不能提供足够的信息来模拟一些自然物体,如我们工作中所要模拟的植物叶子.

Wang(2006)的工作,补足了以前这些方法中,如何决定物体表面大尺度老化度下不同表现的工作,因此可以很明显地提升局部表现的质量.然而,Wang(2006)的采集表现的工作是基于一个输入样本,从另一个角度讲,现实世界中绝大部分材质、表现发生变化的物体,通常很难在一个采样中包含其老化过程中的全部特征,尤其是如秋季植物叶子这样的长期变化物体.在 Gu(2006)的工作中,提供了一种随着时间变化,采集时间-空间变幻的双向反射分布函数(Time-Spatial-Variant BRDF,TSV-BRDF)的方法,并通过对时间和空间部分进行参数化,从而可

以很好地编辑所采集到的 TSV-BRDF. 但是, 对于获取秋季植物叶子的表现, 自然界中过多的因素, 如风、阳光、水分、温度等都会对其产生微妙的影响, 因此很难用类似 Gu(2006)和 Lu(2005)等人的线性参数化方程来精确地模拟. 因此, 我们的工作提供了一种不同而有效的方法来收集整个秋季中植物叶子老化过程中多种不同的特征, 并且可以针对不同种类的叶子分别进行处理. 通过对大量输入叶子样本的分析, 我们用高维-多输入纹理合成的方法, 合成想要得到的植物叶子表现. 而且通过对大量 BRDF (Bidirectional Reflection Diffuse Function) 和 BTDF (Bidirectional Transmission Diffuse Function) 的采样, 我们得到了相当完整的植物叶子表现序列.

2.2 自然场景的模拟

对于自然物体外观仿真在近四十年来自然场景中植物的模拟和绘制得到了广泛的应用. 此前关于植物建模方面的研究工作主要包括: Honda^[1]、Weber^[2]等提出的参数化建模方法; Reeves^[3]提出的基于粒子系统的仿真; Bloomenthal^[4]、Holton^[5]基于 spline 骨架的造型; Fournier^[6]、Viennot 等^[7]提出的基于随机系统的建模方法; Lintermann 和 Deussen^[8]提出的基于图结构的建模; de Reffye 等^[9]、Prusinkiewicz 和 Lindenmayer^[10]提出的重写 (rewriting) 规则的系统; Lefebvre 和 Neyret^[11]、Federl 和 Prusinkiewicz^[12]提出的基于物理的植物纹理模拟. 其中 Lintermann 和 Deussen 在他们的 Xfrog 交互式植物模型系统中结合了植物的位置信息, 沿轴向方向采样点的位置信息可以影响节点和枝条的长度、分支的角度和数量以及它们的特征.

Hong^[16]提出过一种通过三角形网格构建植物叶子表面, 并通过用户交互界面来编辑植物叶子变形的的方法, 其生成的模型结果具有很强的真实感, 但是其方法缺乏很好的植物学和物理学依据, 变形结果由人为设定.

直接对于叶子形态进行构型的工作目前还不多见, Judd^[14]等人给出了一个描述叶子形状的表达方法, 此后被广泛应用. 而对于植物叶脉的造型过程, Dengler 和 Kang^[13]的研究表明, 叶脉的模型与叶子的形状具有强烈的相关性, 因此必须考虑叶脉与树叶形状之间的关系. 2005 年的 SIGGRAPH 会议上, Runions 和 Prusinkiewicz 等人^[15]提出了一种更加有效的叶脉构造方法, 用以生成与叶子外形相关的叶脉模型. 基于对生长中叶子的植物学特性观察, 这种方法在叶肉模型表面上均匀地布置了一些营养

点. 然后, 假设叶脉的生长的目的是到达每一个营养点, 并由此可为叶肉上的每个细胞输送水分和营养, 进而决定整个叶脉的生长的方式. 用这种叶脉模型生成方法可以得到真实感很强的叶脉构型, 不过 Runions 方法的不足之处在于, 其生成的叶脉结构仅仅在空间分布和生长形态上与真实叶脉接近, 但其生成的结果仅是叶脉的平面效果, 即是一个二维纹理. 此外, 叶脉的宽度也并非叶脉的真实直径, 这样很难对整个叶子做出合理的受力和变形分析, 因此在物理模拟叶子变形中往往由于主脉和叶脉根部力学强度不够而出现非正常的弯曲和变形. 为此, 本文改进了 Runions 对于叶脉的生成方法, 通过对叶子的观察和一些植物学的研究表明, 大部分叶子的中脉一般最先生成, 其它分支叶脉都是由中脉分化生长出来. 因此, 中间的主脉在优先生长的作用下, 其维管束的数量和叶脉的径向强度要远远大于分支叶脉, 生长速度也大于其他分支叶脉. 对此, 我们改进了 Runions 的方法, 在叶脉生长过程中通过交互界面的控制, 相应提高了主叶脉的生长速度, 并改变了各级叶脉之间物理强度的参数比, 从而能够生成更加接近真实状况的叶脉结构, 并由此得到叶子在老化过程中的合理变形效果.

3 植物叶子变形的力学原理

树叶在不同的季节展现出来的是不同的形态, 当夏季阳光和水分非常充足的时候, 树叶会伸展开, 呈现上表面凸出的形态. 而秋季来到时, 很多阔叶植物的叶子会由于气温的下降和水分的流失而向内卷曲, 空气中湿度的变化、植物体内水分的变化以及其他一些条件的变化都会使叶子在几何形状上发生有规律的变化.

植物的细胞会由于外界环境的变化而变形, 而植物叶子的变形正是叶子上众多细胞共同变形的结果. 通过对植物叶子的观察, 我们发现, 在微观尺度上, 绝大部分植物的叶子主要由上表面的叶肉和大部分位于植物后表面的树状结构的叶脉组成. 叶肉主要由上表皮、栅栏组织、海绵组织和下表皮组成, 叶脉主要由众多维管束组成. 通过图 1 我们可以很好地观察到叶子切面的微观结构.

维管束和叶肉细胞有着十分不同的硬度和物理结构. 叶肉细胞在水分流失的时候会有很明显的体积收缩, 而在相同情况下, 维管束的体积变化却相对小得多. 这主要是由于维管束的细胞之间含有很多

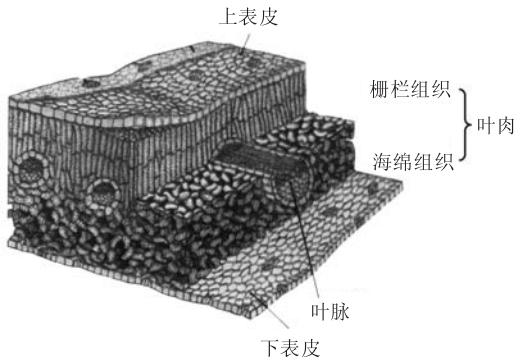


图 1 普通植物叶子的切片,叶脉一般处于叶片的下方的木质和纤维。

当季节发生变化时,如秋季,随着植物叶水分的散失,物理结构不同的叶脉和叶肉就会产生不同程度的变形.由于叶脉具有很多沿叶脉径向的维管束,这些径向的维管束中含有大量径向的纤维结构,就会导致在水分流失过程中,叶脉的收缩比率并不大;而叶肉由大量的饱含水分的叶肉细胞组成,细胞与细胞之间并没有强有力的纤维结构来保持形态不变,因此随着水分在秋季的流失,叶肉部分的细胞在沿叶肉平面的切向方向面积大幅收缩。

这种不相等的收缩比例在叶子的每个微小结构中都会发生着,包括叶脉到达的每个位置.最终它会导致叶子局部向叶子上表面方向自身弯曲,即三维空间中几何形态的变化.最终变形的结果,也是叶子所有部位变形受力后共同作用的结果。

4 叶脉的构造

在真实的自然环境中,植物叶子的变形会受到多种多样的内外因素的影响,为了方便研究且不失一般性,我们考虑其中最主要的影响因素——叶子的水分供给.因为在叶子的老化、枯萎的过程中,叶脉的模型对叶子的几何构型有着非常重要的影响.而建立逼真的叶脉分布是我们真实模拟植物叶子变形的基

础。对此,Runions^[15]曾提出了一种有效的生成叶脉的方法.该方法根据叶子生长中所表现出来的一些植物学现象,在叶子的表面均匀地分布一些代表营养物质的“生长素点”,并由此假设叶脉的生长的目标就是到达并连接叶子上的各个生长素点,从而为生长中的叶肉上的每个细胞运送水分和营养物质.这样,叶片的外形和营养点的分布就决定了叶脉生长的方式,这样就很好地把叶脉的构型和叶子形状有机联系起来。

Runions 的技术可以用来真实地生成很多种类叶子所具有的叶脉结构,包括玉兰叶、樱桃叶、枫叶和梧桐叶等形状的叶子.虽然 L-系统也可以生成类似的叶脉结构,但往往缺乏植物学上的理论依据。

在植物学中,绝大多数双子叶植物的叶子,在生长的初期,叶子中连接叶根部和叶顶端的中脉就已经形成,而肋状的分支叶脉都是从中脉分化生长出来,因此中脉的物理强度和几何直径都远大于其他分支叶脉.同样,在趾状叶子生长过程中,每个趾结构会形成一个自身的中脉,并逐渐生长出基于该中脉的分支叶脉结构.利用这种影响,我们可以改进 Runions 的叶脉生成方法,即提高模拟过程中主脉和中脉的强度和生长速度,因为真实叶子的主叶脉能够达到和叶子轮廓基本相同的生长速度,而比次级叶脉的生长速度快.这样,就可以确保所生成的叶脉结构能够有更现实的叶脉结构物理强度.此外,速度生长很快的中脉和主脉可以通过它们的空间分布影响次级叶脉的生长方式.通过调整和测试,我们可以生成叶脉结构和形状分布更加逼真的效果.如图 2。



图 2 叶脉结构

5 双层模型

5.1 细胞力学模型

这里我们提出采用弹性力学模型来简化模拟叶肉细胞的物理受力情况.假定叶子上面的一个细胞主要受到两种力,一种是由细胞质所产生的细胞内部的膨胀力 f_{in} ,另外一种是由细胞壁产生的细胞外部的张力 f_{out} ,如图 3 所示。

为了更精确地描述叶子细胞所受的这两种物理力,我们可以构建收缩弹簧来表示细胞的膨胀力,同理,也可以采用拉伸弹簧来表示细胞之间的张力.由此可知,一个细胞处于稳定几何形态的条件是这两种力相互平衡,可用下方方程表达:

$$f_{in} = -f_{out} = -k(s - s_0) \tag{1}$$

其中, s 和 s_0 分别表示细胞饱满状态下的弹簧静止长度和细胞在失水收缩之后的弹簧长度,而收缩之

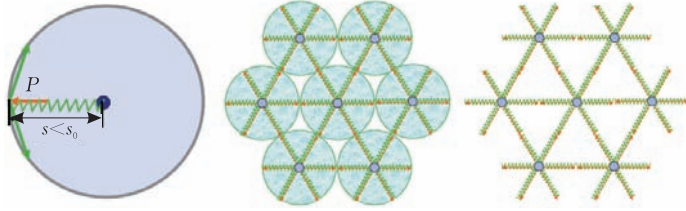


图 3 细胞受力模型的二维图示(从左到右分别为一个细胞的力学模型;一组细胞的力学模型;简化后的质点-弹簧模型)

后的长度 s_0 也恰恰决定细胞的大小. k 表示的是弹簧的弹性系数. 通过实际观察发现,细胞内的液泡会随着秋季的到来,由于水分流失而显著缩小,由此就导致了细胞内部膨胀力 f_{in} 的减少,细胞弹簧的静止长度 s 也随之减小.

按照上面的简化模型,叶肉细胞组织可以由图 3 右侧的质点-弹簧网状结构来模拟. 基于如上的植物学观察,我们提出一种基于物理模拟的双层力学模型 DLM(Double Layered Model)来模拟叶子的变形. 构建双层模型的基本思想源于一个自然界里的基本事实:绝大部分叶脉是位于叶子背面,尤其对于一些阔叶植物来说,并且叶脉也凸出于叶子表面. 而在双层模型中,我们采用上层网络表示收缩率很高的叶肉上的细胞,而下层结构则用来表示非常硬且不易收缩的叶脉上的细胞. 同时这样的两层结构模型还通过互相连接来保证力学上的稳定性,连接的弹簧结构代表了叶肉和叶脉细胞相连的结构. 在具体仿真过程中,采用质点-弹簧系统可以实现这种双层模型的模拟,其中代表叶肉细胞的上层模型由一层较软的弹簧相互连接,组成网络,而代表叶脉细胞的下层模型由包含交叉结构的较硬弹簧所组成,如图 4 所示. 这样,两层结构再由弹簧垂直相连,最终构成叶子的整体力学结构,如图 5 所示.

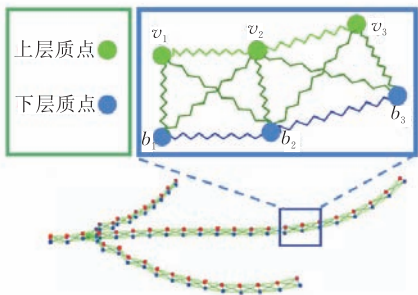


图 4 连接上下层弹簧的交叉结构

5.2 上层模型

为了构造模型中上层的质点-弹簧网络,我们用文献[16]中的方法来获得叶子的轮廓,并对叶子表面均匀分布一定数量的采样点,然后对叶面上的这

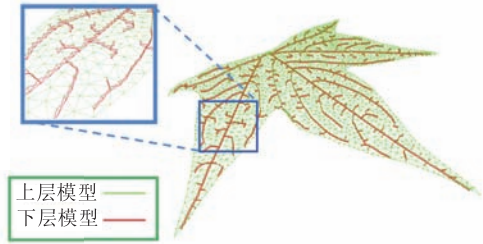


图 5 双层模型(上层模型表示容易收缩的叶肉;下层模型表示刚性很高不易收缩的叶脉)

些采样点进行 Delaunay 三角化,从而得到一张三角网格结构,网格的顶点表示细胞,作为质点,而网格中的边表示连接相邻质点的弹簧,用以表达细胞的力学结构. 由此我们可以构建这样一个质点-弹簧网络,其中的弹簧可以保证叶片形状的基础结构.

我们用 s_{ij} 来表示连接质点 i 和质点 j 的一段弹簧,其中 p_i 和 p_j 分别表示质点 i 和质点 j 这两个质点的位置. 通过对质点 i 的受力分析,弹簧 s_{ij} 作用在其上可以由胡克定律得到

$$f_{ij} = - \left[h_{ij} (|l_{ij}| - r_{ij}) + d_{ij} \frac{\dot{l}_{ij} \cdot l_{ij}}{|l_{ij}|} \right] \frac{l_{ij}}{|l_{ij}|} \quad (2)$$

其中 l_{ij} 表示从 p_i 到 p_j 的向量, h_{ij} 表示弹簧 s_{ij} 的弹性系数, d_{ij} 表示弹簧 s_{ij} 的阻尼系数. r_{ij} 表示弹簧 s_{ij} 的静止长度. 这里的静止长度 r_{ij} 在模型中是一组随时间变化的参数. \dot{l}_{ij} 表示质点 i 和 j 的相对运动速度,即 l_{ij} 对时间的导数. 这里还可以知道 $\dot{l}_{ij} = v_i - v_j$, v_i 和 v_j 分别表示质点 i 和 j 的速度.

在方程(2)中,弹簧力的大小成比例于两质点实际长度与静止长度的差,阻尼力成比例于两个质点 i 和 j 的相对速度. 这样,一个弹簧所连接的两个质点,受到大小相同、方向相反的力. 弹簧的阻尼作用对称地作用于弹簧所连接的两个质点上,并不影响两个质点共同质心的运动.

质点 i 与相邻的若干质点相连,作用在质点 i 上的力由这些质点的合力 $f_i = \sum_{p_j \in S_i} f_{ij}$ 决定. 这样,我们建立了一个静止长度 r_{ij} 由方程(1)中变量 s 决定,并且弹性系数 h_{ij} 随时间变化的质点弹簧系统. 最终上层模型的模拟方程可以描述为

$$f_i(t) = - \sum_{p_j \in S_i} \left\{ h_{ij}(t) [|l_{ij}| - r_{ij}(t)] + d_{ij} \frac{\dot{l}_{ij} \cdot l_{ij}}{|l_{ij}|} \right\} \frac{l_{ij}}{|l_{ij}|} \quad (3)$$

质点 i 的动态加速度 a_i 可以表示为 $a_i = \frac{f_i(t)}{m_i}$,

这里 m_i 是质点 i 的质量. 这里的弹簧静止长度 r_{ij} 是一个随时间和空间分布而变化的变量, 我们将在本文第 6 节详细讨论.

5.3 下层模型

下层模型表示叶子叶脉的树状结构, 而叶脉的结构也正是决定整个模拟过程中最重要的环节. 这里, 我们给出一种特殊的交叉结构来构建下层模型. 每个交叉结构都由 6 根弹簧构成, 下层模型就主要由这些相互连接的交叉结构组成. 如图 4 所示, $s_{b_1 v_2}$, $s_{b_2 v_1}$, $s_{b_2 v_3}$, $s_{b_3 v_2}$, $s_{b_1 b_2}$ 和 $s_{b_2 b_3}$ 这些连接质点的下层较硬的弹簧结构表示叶脉. 同时, $s_{b_1 v_1}$, $s_{b_2 v_2}$ 和 $s_{b_3 v_3}$ 是连接上下层结构的弹簧, 用来控制叶肉和叶脉之间的相对位置和方向关系, 保证同一位置的叶脉和叶肉结构之间可以严格地上下邻接.

由于模型中所有弹簧都遵守胡克定律, 因此可用方程(3)来进行变形模拟. 我们注意到, 由于现实世界中, 叶脉在不同季节随着水分含量的变化, 会导致其物理特性的变化, 如硬度、延展力、体积等的变化. 因此在下层叶脉模型中, 理论上讲, 较硬弹簧的弹性系数和阻尼系数是随着时间变化的, 并且空间分布也不同, 也就是说随时间-空间变化的, 这与上层模型的情况相同. 但是, 为了简化整个系统中的参数设置, 下层模型的变形系数被简化设置为不随时间发生改变. 通过我们进行的一系列测试, 这种简化可以很好地接近真实结果.

图 4 的右上部分展现了当上层叶肉结构收缩

时, 整个叶脉结构是如何向上弯曲的. 图 4 下半部分展示了沿叶脉纵切面向上卷曲的形状模拟.

6 随时间变化的参数设置

对于叶子的变形模拟系统, 在上层结构中, 弹簧的静止长度 $r_{ij}(t)$ 和弹簧的硬度 $h_{ij}(t)$ 是由叶肉细胞中水分的含量决定的. 而在下层结构中, 弹簧的静止长度 $r_{ij}(t)$ 被定为常数, 而代表叶脉弹簧的硬度的 $h_{ij}(t)$ 不仅由叶脉的含水量决定, 也由叶脉的直径 d 决定. 我们根据 Murray^[17] 提出的 Murray 定律来对结构中叶脉的直径进行设置:

$$d_{\text{parent}}^n = d_{\text{child1}}^n + d_{\text{child2}}^n,$$

这里 d 表示了叶脉段的直径, 也就是叶脉的宽度. Runions^[15] 在他的工作中用 $n=3$ 来求得叶脉宽度进行叶子的绘制. 而在本文物理模拟模型中系统中, 经过实验发现 $n=1$ 或者 $n=2$ 更加准确一些, 更加接近真实. 在此基础上, 我们进一步在整个模拟的过程中, 假定每段叶脉分别的直径 d 也是一个不变的常量, 最初的叶脉硬度成比例于叶脉的横截面积 $\pi(d/2)^2$.

我们使用 3 组可编辑的曲线的交互方式来进行参数设定. 如图 6 所示, 图中右侧顶部和中间的曲线叶根部和顶端边缘水分含量随时间的变化情况, 而叶子中其他部分细胞可以通过对其对根部和最近边缘的分别距离, 进行线性插值, 从而得到一条类似的水分变化曲线. 右侧底部的曲线是用来按照水分流失的程度设置细胞弹簧的硬度, 从而模拟木质化和其他一些植物学过程.

虽然我们的时间-空间变化的参数设置相对比

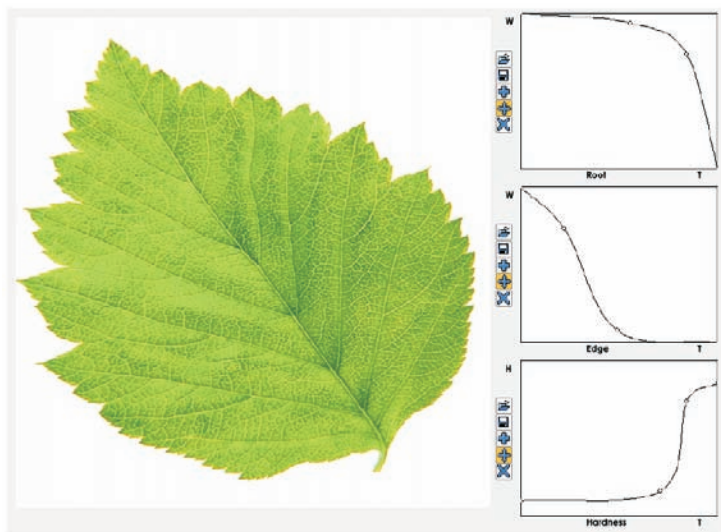


图 6 设置变形参数的用户界面: 用户可以详细确定时间-空间变化的变形参数

较简单,但是可以很好地模拟植物叶子各种不同情况、程度与特征的形状变化,如图 7 所示.



图 7 通过 DLM 双层模型得到的各种不同样式的叶子的变形

7 生物特征相似叶子的批建模

用上述方法生成叶子的几何模型,虽然造型的逼真度很高,但是如果生成具有多种形态的一组叶子模型,则需要大量的物理模拟运算,花费比较长的时间.因此,为了快速生成较大量的不同样式的叶子,我们引入了一种基于参数化随机变换的方法来生成同一种类的、在一定程度上随机拥有不同几何形状的叶子.从而不必消耗大量的运算,用物理仿真的方法再次模拟叶脉生长和叶子的变形.

注意到同一种类的不同的叶子在叶脉形状和强度结构上都具有很大的相似性,然而由于生长条件因素的不同,比如水分的差异、光照的差异等.正是这些生长条件的不同导致其具体结构在细节上必然存在一定的区别.同时,这种叶脉结构、强度、分布等的差异也导致了叶子几何形变的程度的不同.对于相似度非常高的同一种类的叶子,为了减少这种重复运算,本文引入一种基于特征值提取的方法,随机地生成大量几何细节上不同但主体特征相似的几何模型.其具体算法主要由二维流型上的拉普拉斯算子特征函数来完成,该方法的数学可靠性证明可见文献[18].

首先根据 DLM 物理模型生成的叶子变形的几何模型的初始顶点集合 P ,按照如下程序操作:

- 对于 n 个顶点的采样点集 $P = \{(x(i), y(i), z(i)) : i = 1, 2, \dots, n\}$ 构造其特征基 $\{v_1 \cdots v_n\}$.
- 将坐标函数投影到特征基上: $c_x(j) = \sum_{i=1}^n v_j(i) x_i$, $c_y(j) = \sum_{i=1}^n v_j(i) y_i$, $c_z(j) = \sum_{i=1}^n v_j(i) z_i$.
- 构造一组正态分布随机变量组 R ,其均值 $\mu=1$,标准差 $\sigma=0.4$. 对上一步得到的投影后的系数进行随机化: $c'_x(j) = c_x(j) R$, $c'_y(j) = c_y(j) R$, $c'_z(j) = c_z(j) R$, $j = 1, 2, \dots, n$.
- 原坐标系下的新生成的几何模型点集合的坐标为

$$x'(j) = \sum_{i=1}^n c'_x(i) v_i(j), y'(j) = \sum_{i=1}^n c'_y(i) v_i(j), z'(j) = \sum_{i=1}^n c'_z(i) v_i(j), j = 1, 2, \dots, n.$$

这样,在最后的绘制阶段,用新生成的顶点坐标集代替原坐标集,即可得到新的特征相似叶子几何模型.同时,对于一组点集的特征基拉普拉斯特征函数和特征基的生成方法,可参见本文附录.

我们利用这种方法对于大约由 5000 质点和 7000 弹簧组成的植物叶子物理变形模型进行了实验.结果表明,通过这种数学上的近似随机方法,可以在已有的物理模拟结果的基础上,以大约 10~20min 的速度生成新的特征相似、几何细节上略有区别的同类叶子模型,大大提高了模型生成和构造的速度,从而使得我们能够快速生成大量植物叶子.相比而言,完全根据物理仿真的方式,对从最开始夏季水分饱满的状态到秋季干枯失水状态的变形仿真过程,则大约需要数小时完成.

8 实验结果

根据本文中的基于生物和物理的仿真系统,我们构造了不同种类的叶子在不同季节中的各种形态.图 8 展示了其中的 3 个实验场景:爬山虎叶子的变形序列、梧桐叶子变形的序列和椿树叶子变形的序列.我们同时将不同季节的叶子纹理应用到我们变形后的模型上.其中,椿树和爬山虎叶子都展示了正面和背面观察的变形效果.由于各种叶子的形状、大小和纹理的不同,绘制结果的成像分辨率定为 800×600 . 所有实验结果均在 1.6GHz Athlon CPU,1GB 内存和 Nvidia 7300 显卡的普通 PC 上,并采用 Ray tracing 算法绘制.

大部分叶子结构的质点弹簧模型由 1500 到 5000 个质点构成,由于质点弹簧模型在模拟的过程中,通过阻尼振动,逐渐到最后的稳定状态,因此其计算过程通常需要较长时间,具体的模拟时间如表 1 所示.

表 1 模拟时间				
	质点数	弹簧数	收缩模拟步数	物理模拟总耗时
爬山虎	3247	4184	50	3h 21min 52s
椿树	1412	2574	50	1h 15min 17s
法国梧桐	5024	7314	100	6h 23min 22s
枫叶	1973	3695	100	4h 50min 33s

这里值得注意的是,叶子的物理模拟过程可以通过 GPU 来辅助实现,由于本文方法中的质点弹

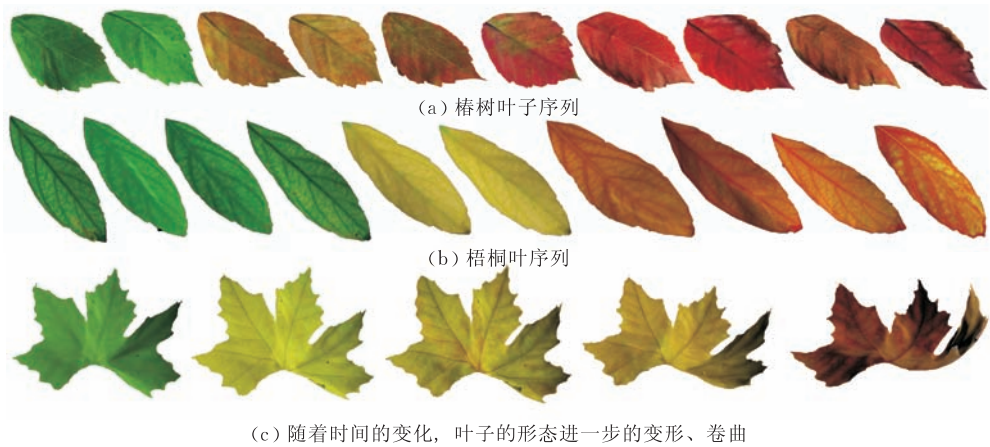


图 8 物理模拟变形生成的爬山虎叶子序列



图 9 一组绘制的自然场景中的叶子

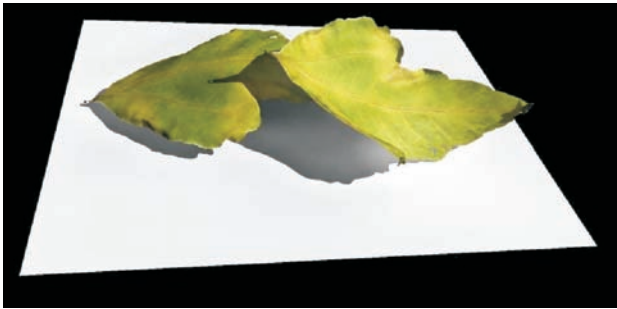


图 10 全局光照下植物叶子的变形

簧模型的运算都可并行处理,从而在硬件上可以并行加速.我们在今后的工作中将继续作进一步研究与改进.

9 结论与展望

我们本文主要描述对自然界中叶子几何形状进行建模与仿真的新方法,并模拟叶子随时间而产生的几何形态变化.这种方法通过运用力学模型对变形的叶子进行仿真,同时采用基空间的随机参数化方法生成大量变形叶子的序列,不仅可以用来模拟生成多种植物的叶子,而且可以为未来在更普遍意

义上模拟植物以及其它各类有机生物模型提供新的技术基础.

本文结合了质点弹簧系统和 DLM 双层模型,保证了叶子的变形是由其内部物理受力所决定,并且,通过用户交互,还可以动态设定随时间-空间变化的弹簧硬度,用来指导对叶子的物理仿真,会得到各种不同季节和不同气候条件下的叶子变形.同样,本文提出的物理模拟方法也可以用在其他领域中模型的生成与编辑中.

本文目前采用的 DLM 双层模型在物理模拟中是由质点弹簧模型构成,而并没有几何的表面信息.这种处理虽然能大量减小物理模拟的运算量,但是当叶子变形程度非常大的时候,有可能造成其卷曲过程中错误的自相交.在今后的研究工作中,我们会提供变形仿真过程中的碰撞检测的功能.同时,由于本文方法目前尚未进行 GPU 加速,其速度还不能达到产生大规模模型并构建模型数据库的需求,利用 GPU 加速技术实现模型的交互式造型也是今后有待进行的工作.

此外,一个未来有意义的研究方向是,将本文的方法运用到虚拟现实和大规模场景的建模过程中,

从而实现大规模虚拟现实场景中植物随时间变化的模拟。

参 考 文 献

[1] Honda H. Description of the form of trees by the parameters of the tree-like body. *Journal of Theoretical Biology*, 1971, 31: 331-338

[2] Weber J, Penn J. Creation and rendering of realistic trees//SIGGRAPH'95: Proceedings of the 22nd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. New York, NY, USA, 1995: 119-128

[3] Reeves, W T, Blau R. Approximate and probabilistic algorithms for shading and rendering structured particle systems//Proceedings of the SIGGRAPH. New York: ACM Press, 1985: 313-322

[4] Bloomenthal J. Modeling the mighty maple//Proceedings of the SIGGRAPH. New York: ACM Press, 1985: 305-311

[5] Holton M. Strands, gravity, and botanical tree imagery. *Computer Graphics Forum*, 1994, 13(1): 57-67

[6] Fournier A, Grindal D A. The stochastic modeling of trees//Proceedings of the Graphics Interface'86/Vision Interface'86. Toronto, Ont., Canada: Canadian Information Processing Society, 1986: 164-172

[7] Viennot X G, Eyrolles G, Janey N, Arqués D. Combinatorial analysis of ramified patterns and computer imagery of trees//Proceedings of the SIGGRAPH. New York: ACM Press, 1989: 31-40

[8] Lintermann B, Deussen O. Interactive modeling of plants. *IEEE Computer Graphics and Application*, 1999, 19(1):

56-65

[9] de Reffye P, Edelin C, Françon J, Jaeger M, Puech C. Plant models faithful to botanical structure and development//Proceedings of the SIGGRAPH. New York: ACM Press, 1988: 151-158

[10] Prusinkiewicz P, Lindenmayer A. *The Algorithmic Beauty of Plants*. New York: Springer-Verlag, 1990

[11] Lefebvre S, Neyret F. Synthesizing bark//Proceedings of the Rendering Techniques (Eurographics Workshop on Rendering). Pisa, Italy, 2002

[12] Federl P, Prusinkiewicz P. Finite element model of fracture formation on growing surfaces//Proceedings of the International Conference on Computational Science. 2004: 138-145

[13] Dengler N, Kang J. Vascular patterning and leaf shape. *Current Opinion in Plant Biology*, 2001, 4(1): 50-56

[14] Judd W W, Campbell C S, Kellogg E A, Stevens P F, Donoghue M J. *Plant Systematics: A Phylogenetic Approach*. Sunderland, MA: Sinauer Associates, 1999

[15] Runions A, Fuhrer M, Lane B, Federl P, Rolland-Lagan A G, Prusinkiewicz P. Modeling and visualization of leaf venation patterns. *ACM Transactions on Graphics*, 2005, 24(3): 702-711

[16] Hong Sung Min, Simpson Bruce, Baranoski Gladimir V G. Interactive venation-based leaf shape modeling//Proceedings of the CASA 2005. Chichester, UK, 2005: 415-427

[17] Murray C D. The physiological principle of minimum work//Proceedings of the National Academy of Sciences. 1996, 12: 207-214

[18] Lafon S S. *Diusion maps and geometric harmonics* [Ph. D. dissertation]. Yale University, 2004

附 录. 流型上拉普拉斯算子的特征函数.

对于一个点集 P , 其近似的特征基是基于对这组点集 P 的当前平均核 k 的频域分解得到的, 我们定义点集的核 k 如下:

$$k_{\epsilon}: P \times P \rightarrow R, \quad k_{\epsilon}(x, y) = \exp\left(-\frac{|x-y|^2}{\epsilon}\right) \quad (*)$$

其中 $|\cdot|$ 表示欧拉距离, 由于 k 是一组离散点集上的核, 因此其可以表示为一个对称矩阵. 同时, 由于指数函数 $\exp(\cdot)$ 衰减速度非常快, 因此, 这个对称矩阵在大部分应用中都是相当稀疏的. Lafon^[18] 的研究表明, 如果这个核 k 正确的正规化, 则当 $\epsilon \rightarrow 0$ 时, 流型上拉普拉斯算子的特征函数就可以由这个核对称矩阵的特征值恢复. 近似特征向量的完整求法如下:

1. 核矩阵 k_{ϵ} , 由式 (*) 给出.
2. 对矩阵 k_{ϵ} 每行求和: $S(i) = \sum_j k_{\epsilon}(i, j), i = 1, 2, \dots, n$.

3. 对矩阵 k_{ϵ} 重新正规化: $k'_{\epsilon}(i, j) = \frac{k_{\epsilon}(i, j)}{S(i)S(j)}, i, j = 1, 2, \dots, n$.
4. 对新矩阵 k'_{ϵ} 每行求和: $S'(i) = \sum_j k'_{\epsilon}(i, j), i = 1, 2, \dots, n$.
5. 再次对矩阵 k'_{ϵ} 正规化: $k''_{\epsilon}(i, j) = \frac{k'_{\epsilon}(i, j)}{S'(i)S'(j)}, i, j = 1, 2, \dots, n$.

6. 计算对称矩阵 k''_{ϵ} 的特征值. 另 $u_1 \cdots u_n$ 为降序排列的特征值所分别对应的特征向量.

7. 拉普拉斯算子的特征函数就可以近似地表示为 $v_i = \frac{u_i}{u_1}, i = 1, 2, \dots, n$

对于顶点数量 800 的点集, 此方法在一般 PC 用 1min 以内时间求出其特征函数. 该方法的详细证明过程, 见参考文献[18].



CHI Xiao-Yu, born in 1980, Ph. D. candidate. His research interests focus on computer graphics.

SHENG Bin, born in 1981, master candidate. His research interests focus on computer graphics.

CHEN Yan-Yun, born in 1971, Ph. D. . His research interests focus on computer graphics.

WU En-Hua, born in 1947, Ph. D. , professor. His research interests include realistic image synthesis, scientific visualization and virtual reality.

Background

The authors' work on weathering leaves is a part of research on realistic rendering of natural scene. Recent years, people mainly concentrate on the modeling of plant itself, but few researchers made deep investigation into changing shapes of plants through the changing weather or season. So the plants or leaves shape changing in the weathering process is almost a blank.

The algorithm proposed in this paper gives out a solution to deal with leaves' shape changing during autumn, although is just a algorithm for off-line computer. However, it could

produce leaf shapes in high realistic.

This work here could give a new algorithm to make leaf models for realistic rendering for natural scene, where we could get more beautiful and realistic result images and video especially in details of the scene to branches and leaves. The algorithm solves a branch problem of modeling of natural scene. Combined with the authors' previews successful results of the realistic rendering of nature scene such as realistic rendering algorism and large scale scene rending, we could make a new real virtual world.