

秋季植物叶子表观的模拟^{*}

迟小羽^{1,4}, 盛斌³, 杨猛^{1,4}, 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)

⁴(中国科学院 研究生院,北京 100049)

Simulation of Autumn Leaves

CHI Xiao-Yu^{1,4}, SHENG Bin³, YANG Meng^{1,4}, CHEN Yan-Yun², WU En-Hua^{1,3}

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

²(Autodesk China, Shanghai 200127, China)

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

⁴(Graduate University, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

+ Corresponding author: E-mail: cxy@ios.ac.cn

Chi XY, Sheng B, Yang M, Chen YY, Wu EH. Simulation of autumn leaves. *Journal of Software*, 2009,20(3):702-712. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3299.htm>

Abstract: This paper presents a method for capturing and efficiently simulating of a large number of plant leaves, realistically showing their weathering process in autumn time with various texture patterns and appearances. In generating the texture patterns of leaves, different from the existing technique that models the appearance manifolds from a single input material sample, this paper captures the BRDF and BTDF properties of leaf surface from multiple various samples, which contribute to a final complete aging manifold representing the appearance change through the aging process of the leaves. Combining this aging manifold representing with botanical knowledge, it can synthesize many different leaves' appearance and textures and extrapolate texture patterns out of input samples. The effectiveness of this method is proved in several applications, including subjects with different ages and types. In most cases, it is able to re-produce texture patterns consistent with those observed in nature.

Key words: weathering; texture synthesis; leaf

摘要: 提供了一种采样并生成植物叶子表观的方法,可以非常真实地展现叶子秋季在干枯、老化过程中多种纹理、表观属性的变化。在生成叶子纹理的过程中,有别于以往基于单一材质样本的表观合成技术,采集了大量不同叶子样本表面的双向反射分布函数 BRDF 和双向透射分布函数 BTDF,最终从这些数据中得到叶子衰老过程在老化空间中的表达式和完全分布图。结合植物学知识和所得到的老化空间中的表达式和分布图,可以很好地指导合成秋季不同衰老程度叶子的表观纹理,并能够外插合成采样范围之外的叶子纹理样式。在生成多种不同种类和衰老程度的植物叶子的过程中验证了这种方法的有效性,得到了大量非常接近真实树叶的各种叶子

* Supported by the National Basic Research Program of China under Grant No.2002CB312102 (国家重点基础研究发展计划(973))

Received 2007-11-21; Accepted 2008-03-14

形态和纹理.

关键词: 老化;纹理合成;叶子

中图法分类号: TP391 文献标识码: A

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,与大部分人造物体的最大区别在于:人造物体往往按照人们的审美和应用需求,在制造过程中,其表现纹理特性可以控制,并易于被描述和掌握;而对于自然景物的植物而言,其表现的形成,则是自然界中各种复杂因素,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几何形态和表现属性.尤其是植物的叶子,随着季节与气候的变化,其表现,如透射、反射属性的变化十分显著,这也在相当程度上决定了植物的外观特征.而在以往的计算机辅助建模中,用简单、固定的纹理样式和传统绘制模型真实地表现叶子在不同环境和季节下的特征相对要困难一些.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,很多绘制出来的场景均为基于静态表现的场景,这不仅与自然界的真实情况不符,绘制的真实感不够强,也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主要组成部分之一的植物叶子的表现特征,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.

关于合成各种秋季叶子的颜色,Chiba^[1],Mochizuki^[2]和 Braitmaier^[3]都曾经提出过各自的方法,这些方法大都基于对植物叶子内部化学组成变化而影响到的颜色的分析,并没有告诉我们如何指导叶子上不同位置和细节的表现应该如何生成,但实际上,植物的叶子是一种拥有非常丰富材质细节的物体.当我们搜索关于如何让计算机自动生成秋季植物叶子变化的材质时,发现几乎没有基于纹理合成的相关工作.由于在秋季变化中的植物叶子纹理拥有很强的结构信息,如叶脉水分传播的影响、叶子形状的影响、不均匀化学变化的影响等,因此,以现实世界中拥有各种细节的鲜活叶子为基础来让计算机自动生成叶子的表现是一项相当困难的工作.因此,从模拟的角度上讲,我们工作的价值就在于能够让用户通过一些已有的采样,创建高度真实感的叶子并让其随着时间的变化动态地老化,而无须考虑复杂琐碎的物理、化学反应和生物学变化.近几年来,Wang^[4],Gu^[5]等学者提出了一些数据驱动的模式来采集和重现“空间-时间”变化的材质,这些数据驱动的方法能够极大地提高绘制出材质的真实感.而且这些数据驱动的模式,如文献[4,6]的方法都提供了高度真实感的绘制结果.文献[4]虽然提出了一个很好的想法,却受限于单一的数据输入和缺少有机的细节.我们在这里提出了一种混合的方法,通过数据驱动的引导来合成秋季叶子变化的材质纹理.在我们的方法中,首先拓展了文献[4]提出的技术,在材质建模过程中,通过接受多重叶子样本输入,采样到整个秋季叶子颜色变化过程中大范围的材质变化.然后利用这些采集到的材质来构建一个完整的老化度空间,所得到的老化度空间可以很好地指示出叶子纹理随着时间变化的内在倾向.通过一个完整的变化曲线,此方法可以利用“空间-时间”的老化特征来生成任意时刻的叶子纹理,以及其随时间的变化过程,并可以外插得到一些样本空间之外的老化度表现.由于使用更多输入样本,使得叶子表现的老化度空间(color space)要大于文献[4]方法,从而能够提供范围更广的表现特征和变化.

1 相关工作

1.1 老化模拟

近年来,关于物体、风化模拟的一些研究和工作的,主要是关于物理过程的模拟,比如 Dorsey 和 Hanrahan^[7]关于金属锈迹光泽的工作,Dorsey 等人^[8]的岩石侵蚀,Paquette 等人^[9]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,如文献[10-13].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.

文献[4]的工作弥补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,文献[4]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,尤其是像秋季植物叶子这样的长期变化物体.在 Gu^[5]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^[5]和 Lu^[14]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表面特征,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,我们得到相当完整的植物叶子表现序列.

1.2 纹理合成

自然景物表面的变化可以用纹理合成的方法来模拟.Badler 和 Becky^[15]提出了一种基于分块细分方法的纹理生成技术.与随机样式生成的方法相比,基于过程的方法如 Cook^[16],Ebert^[17]以及基于反应-扩散的方法如 Turk^[18],Witkin 和 Kass^[19],能够生成视觉上更加真实的结果.然而,这些方法都需要很多的人工干预才能得到非常接近自然效果的纹理.Matusik^[20]提供了一种基于数据集的方法,这种方法通过在大批输入纹理所生成的子空间中查寻来生成新的彩色纹理.这个模型的潜力在于它可以很好地用于帮助用户以一大群数据为基础,获得自己想要的静态纹理.但是,为了得到一个连续的老化纹理序列,用户需要精心地选择输入纹理样本,并指导在数据集中的寻找过程.一些基于采样的纹理合成方法,如 Lefebvre 和 Hoppe^[21],Kwatra^[22],可以直接由输入纹理合成新纹理.以上绝大部分方法都适用于合成静态纹理.

Enrique^[23]提供了一种从较小的时变纹理样本合成时变纹理的方法.在这种技术中,需要被合成的纹理必须与输入纹理的维数相同.因此,这种方法很难应用到我们对于秋季植物叶子纹理的合成之中,我们的输入是一系列静态的 13 维纹理(Static SV-BRDF and SV-BTDF),而我们需要生成的纹理是一个 14 维的 TSV-BRDF 加上 TSV-BTDF 纹理.Kwatra^[22]提出了一种纹理优化的方法,通过流场指导的一部分 2 维输入纹理来生成连续的三维纹理序列.但是其生成的纹理均为同性质或相似的纹理,典型的时变纹理所要展现的是纹理在空间和时间上表现特征的变化.为了提供这种渐进式的变化,Zhang^[24]提供的点合成方法能够严格地合成表面上变化的纹理,而静态纹理则由他们自己的方法所生成.

为了合成这种基于多样本输入的表现纹理,我们扩展了现有的纹理合成方法,用以提供在时间和空间上都渐进变化的连续纹理序列.

2 表现采集

为了更加真实地绘制出秋季变化的植物叶子,就需要确定绘制模型和采样模型,并对真实世界中的表现数据进行采样作为分析、合成的输入.

叶子的生物学结构如图 1(a)所示,由上表皮、叶肉和下表皮组成,其中叶肉又由栅栏组织和海绵组织组成,其间也会有一些叶脉和维管束在其中.对于植物叶子这种生物学结构和光学模型,此前,部分绘制的研究认为,叶子可以由 BSSRDF(bidirectional subsurface scattering reflection diffuse function)模型很好地绘制,但在实际情况中,尤其是在大部分场景中叶子的厚度远远小于叶子在水平方向上的尺度,对于表面水平方向分辨率为 1024×1024 像素绘制的叶子,其厚度也就远远小于一个像素,相邻像素之间的光照贡献几乎可以忽略不计,在没有相邻像素散射贡献的时候,BRDF 模型的计算结果和 BSSRDF 模型是一样的.

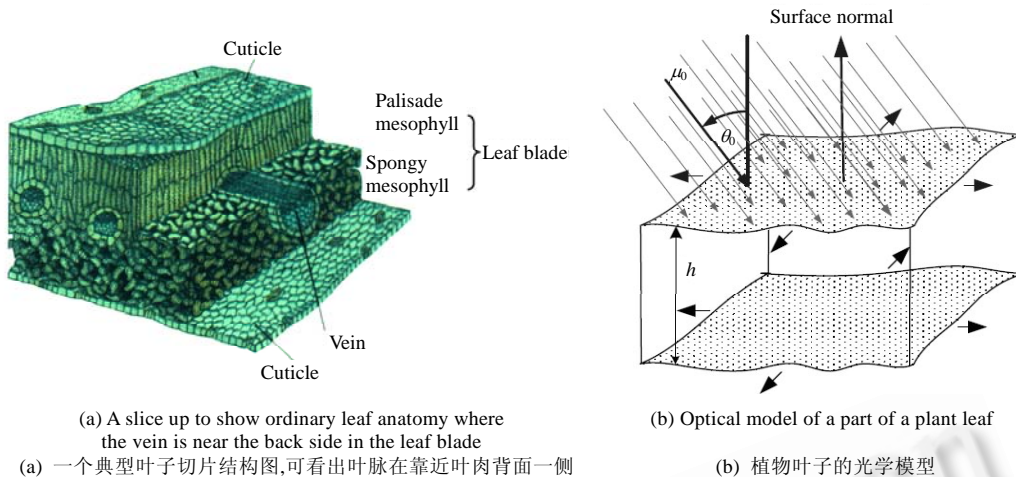


Fig.1
图 1

因此,类似于 Wang^[23]的方法,我们选择 BRDF+BTDF 模型来表达叶子的光学特性,分别采集叶子正面、反面的 BRDF 以及叶子的 BTDF.

为了采集叶子表面的 BRDF 和 BTDF,我们使用 Gardner^[25]的方法,搭建了一套线性光学光度仪系统来采集叶子表面的光学信息.如图 2 所示,线性光学光度仪通过平台驱动线性光源从被采样物体上方移动的过程,改变光源对于物体表面的入射角度,并在整个过程中用相机拍摄图像序列,最后通过对图像序列的分析,得到物体表面的 BRDF 图.同时,我们在被采样物体背面放置了均匀亮度的液晶背光板面光源,来采集物体的 BTDF.我们使用 Nikon D200 相机和 AF-S DX Zoom-Nikkor 18-70mm f/3.5-4.5G IF-ED 光学镜头进行原始图像采样,并用 Capture Control Pro 软件 and 一部分自己编写的程序来控制相机每隔 3 秒钟拍摄一次,将图像传入控制电脑的硬盘中,图像为 Jpeg 格式,分辨率为 3872×2592 像素.

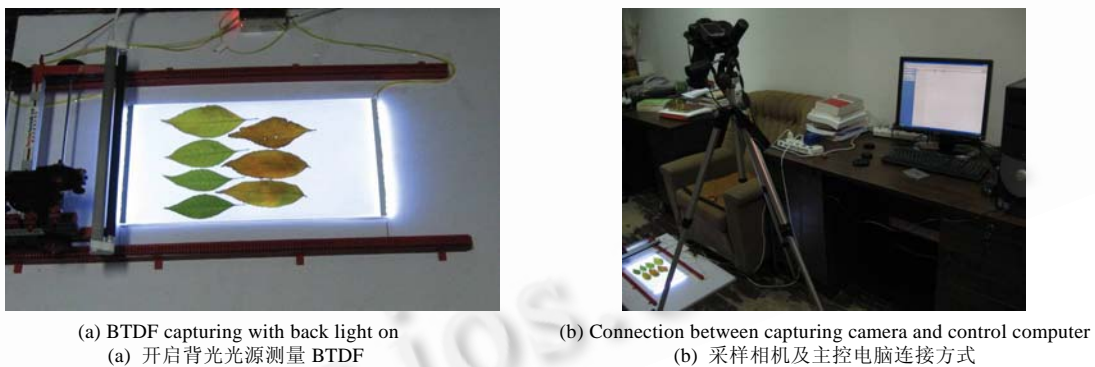


Fig.2 Pictures of the capturing device
图 2 线性光学光度仪采样工作图

图 3 是我们在采样过程中某一像素点 BRDF 反射光线强度的分布,可以很清晰地看出对于绿色植物叶子,其反射光的绿分量要大于其他两个分量,这里在图 3 中所示,最上面浅色曲线(代表绿色分量反射强度),明显大于下面的两条深色曲线(分别代表红色和蓝色分量反射强度),而且反射光线,随光源入射角度发生变化,呈现较均匀变化的趋势,这是因为镜面反射分量相对较小,漫反射分量较大.

采集叶子表观的过程需要将其从植物上取下,从而破坏了它们的自然老化过程,因此很难对一片叶子全部老化过程中的表观进行采样,这里,我们通过对同一种植物的多个叶子样本进行采集来获得更多不同老化程度

下的表现信息.对于某一老化状态下的一片叶子,即某一时刻的一片叶子,我们生成了 7 张图像来表达其被采样时刻的正面、反面的 BRDF 和 BTDF,如图 4 所示,它们分别是这片叶子在这个被采样时刻的正面漫反射图、正面镜面反射图、正面凹凸图、背面漫反射图、背面镜面反射图、背面凹凸图以及透射图.在这里,叶子的镜面反射分量是单色(现实世界中只有金属的镜面反射分量是有颜色的,其他绝大部分材质的镜面反射都是单色灰度图)的,而表面凹凸是一个标量.

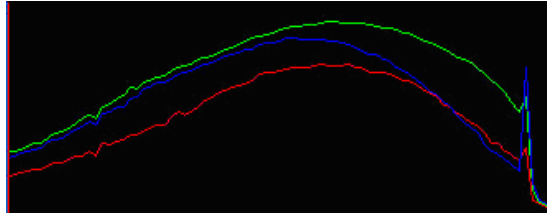


Fig.3 Analyzed data from capturing device. Here the slow changing shows the diffuse of a leaf
图 3 线性光学光度仪采样得到的某一点的数据分布,平缓变化表现出叶子的漫反射分量主导反射出射光

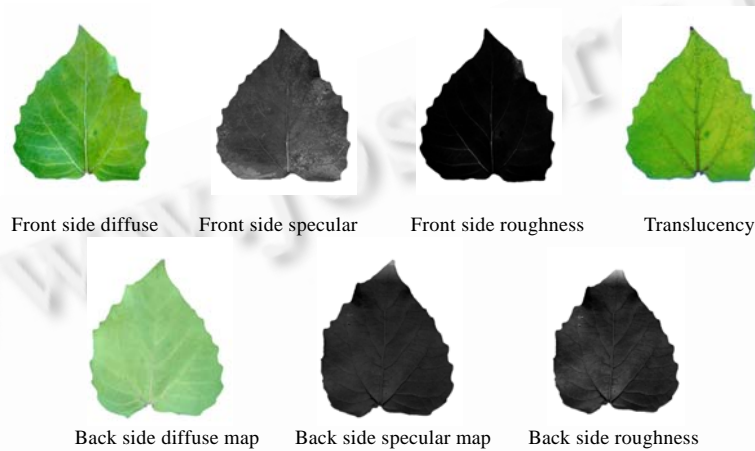


Fig.4 Captured data of a poplar leaves

图 4 对某一时刻杨树树叶进行的采样

对于采样后并分析得到的叶子表观纹理数据,每一个时刻的叶子上的任何一个像素点都是一个 13 维向量(正面漫反射 R,G,B,正面镜面反射,正面凹凸,透射 R,G,B,反面漫反射 R,G,B,反面镜面反射,反面凹凸),而我们对同一种植物不同时期的植物叶子进行采样得到一系列的 13 维向量的纹理,这些纹理所在的空间就是叶子的表观空间,我们需要对表观空间中叶子老化的行为进行分析,才能很好地指导对于植物叶子在不同时间段的纹理的合成.

3 构造表观老化空间/构造表观年龄空间

由上一节的采样设备和分析方法,我们得到了每片被采样叶子的 13 维向量的反射/透射纹理图,将这些 13 维向量投放到一个 13 维的空间中,而这个空间所代表的就是植物叶子表观可能出现的全集.在图 5 中,我们用二维纹理和三维的 RGB 颜色空间来作简单的示意,叶子的二维 RGB 纹理图像即代表 13 维的表现.

Wang^[4]的方法是将输入局限在某个时间点上的一幅输入样本上,而任意时刻的一片叶子是很难充分地带有秋季植物叶子老化过程中大量的老化表观特征.因此,与 Wang^[4]方法相区别的是,我们的方法扩展到一个更多输入样本的空间,我们将这个空间命名为完全老化空间.在这个空间内,我们的方法可以很好地揭示不同样本叶子上采样点之间的老化程度的关系.如图 5 所示,完全老化度空间由不同时期的数片枫叶材质放入 13 维的表观空间所得,不同老化状态的叶子表观信息在空间中构成了一系列的分布,通过这些分析及分布能够得到叶子

表观的老化趋势.同时,观察图 5 中的颜色分布也可以很好地说明,如果使用单一输入样本,既难以覆盖整个老化过程,也不容易分析老化变化的规律.对比 Wang^[4]的方法,我们拥有更大、更完全的老化度空间,从而可以生成颜色更丰富、更具真实感叶子的表观.

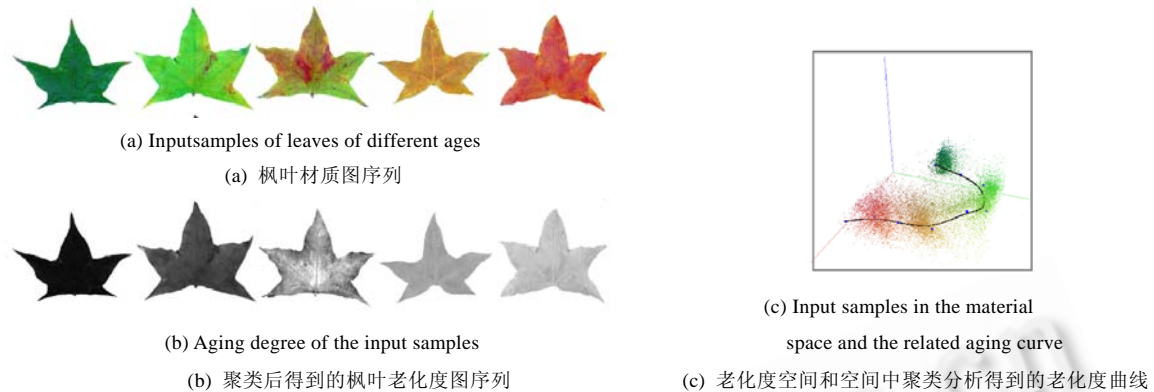


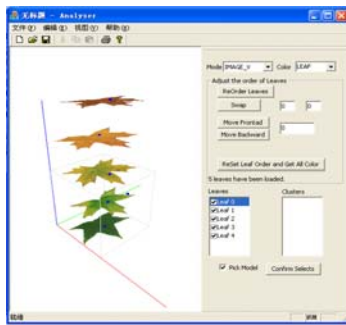
Fig.5 Generating the aging degree maps from the complete aging space

图 5 从完全老化空间中生成老化度图

在通常情况下,植物叶子表面的颜色分布相对连续,因此老化度空间中的采样点分布也相对比较密集.使用 K 均值算法可以很好地将特征相近的采样点集进行聚类.由聚类的结果,我们可以得到一条老化度曲线,如图 5(c)所示.这条老化度曲线,是以聚类后每个簇的均值点为控制点的贝塞尔曲线,而曲线上不同的点则代表了老化过程中不同的年龄.曲线起始点 P_0 和终点 P_n 之间的部分,代表老化过程中年龄从 0 到 n 时叶子的状态.一旦得到老化度曲线,所有采样点都可以通过向老化度曲线方向投影的方式来获得自己的年龄,并且可以沿着自己年龄处老化度曲线曲率方向运动,来推测自己在下一个时间段的表观.在老化运动过程中,超过最后一个时刻样本继续运动,即可以外插得到年龄超过样本之外的老化度图和分布,对于此点 $P, \text{age}_p > \text{age}_{p_n}$.同理,在年龄为 0 的样本处,沿老化度曲线反向运动,可以逆向外插推测出采样样本之前的老化度图,即 $\text{age}_p < \text{age}_{p_0}$.

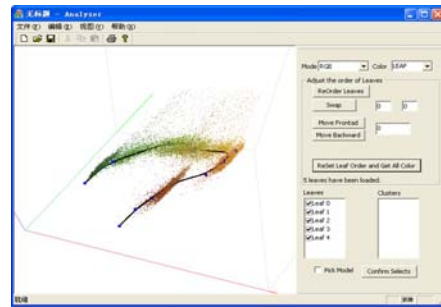
这里,叶子表观的老化并不是一个简单的、线性的过程,老化度并不能简单地由起始点和终点决定,尤其是有些畸形样本的存在并不一定代表真正的老化趋势.因此,我们的方法不仅采用 K 均值聚类方法来获得曲线,而且也允许用户加入一些交互在其中,用来控制曲线的形状和分布,并能够剔除一些明显的畸形和噪声簇.图 5(c)的曲线就是经过用户一定的交互调整后更加平滑的曲线.如图 6 所示,我们编写了一个用户交互界面,可以通过点击选取控制点、编辑移动控制点来编辑控制影响老化度曲线的控制点.同时也可以通过区域选择,剔除和改变一些畸形的采样结果(如仪器光学干扰和采样误差所造成的不正常采样点).由于 K 均值的方法只能归类表观特征相近的点集,不能给出变化的规律和方向,因此在我们的程序中可以由用户去指定一些变化的趋势,如图 6(a)选定老化过程中一些簇的顺序.同样,如图 6(b)所示,通过用户的调整,可以得到一条相对连续和光滑的老化过程曲线,并可以沿着曲线的两端,外插推测出采样范围之外的一部分老化趋势.

通过对每个像素点上表示此点表观的 13 维向量赋予一个老化度年龄,我们可以得到每片叶子的老化度图,如图 5(b)的灰度序列所示,这些老化度图所显示的就是叶子纹理老化度的空间分布和程度.同时所得到的老化度图,也是接下来进行纹理合成的指导信息.



(a) Analyzing of sample leaves

(a) 对采样叶子的分析



(b) Extrapolating and adjusting process for the aging curve in complete aging space

(b) 老化度空间中对老化度曲线的调整和 extrapolation

Fig.6 A user's interfaces to analyze and adjust the aging space

图 6 用来分析老化度空间并进行调整的用户界面

4 表观合成

合成植物叶子的纹理一直是很具挑战性的工作,因为太多的自然因素影响叶子纹理的分布.由于拥有很多的结构性信息,植物叶子表观纹理的分布,并不能很好地吻合 Wei 和 Levoy^[26]所提出纹理的马尔可夫随机场假设.如果直接使用现有的纹理合成技术来生成叶子表面纹理,很容易产生非常不自然的结果.保持叶子的形状信息和叶脉分布结构在合成叶子纹理的过程中,是非常重要的工作.图 7 中的流程图很好地展示了我们的纹理合成系统的工作过程.特别地,工作步骤可以描述为以下一些步骤.

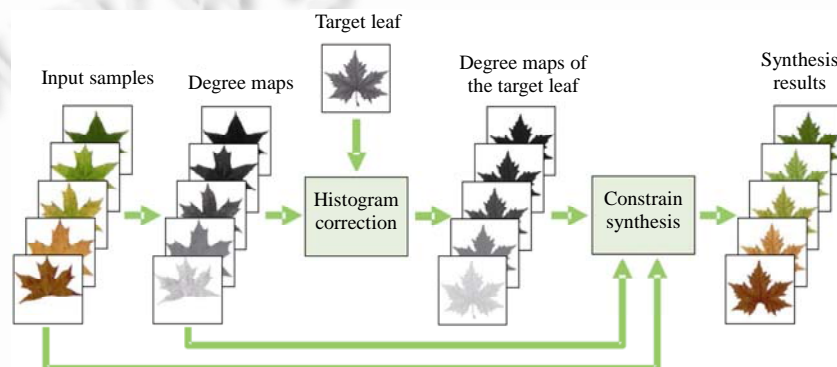


Fig.7 Flowchart of material synthesis

图 7 纹理合成流程图

1. 选择样本集合 S_s , 然后构造表观的老化度空间和空间中的老化度曲线.
2. 通过老化度曲线, 为每个样本图 S_s 生成老化度图 D_s .
3. 为合成目标叶子生成老化度图:
 - (1) 将真实叶脉与我们生成的叶脉对齐.
 - (2) 从样本叶子纹理中克隆叶脉附近的临域信息到目标老化度图 D_{m0} .
4. 对于每个样本 s :
 - (1) 以 D_s 为样本, 以 D_{m0} 为目标, 合成不同的目标图 D_{ts} .
 - (2) 以 S_s 为样本, 以 D_s 为样本的一致度图 (correspondence map), 以 D_{ts} 为目标图 (target map) 来进行纹理迁移 (texture transfer), 最终合成结果纹理 R_s .

在纹理合成和纹理转移过程中, 我们使用 Effros^[27]的块合成和纹理转移方法. 我们的合成方法生成不同年

龄、不同老化程度相当真实的植物叶子纹理.为了保证叶子的老化过程是一个单调不可逆的变化,我们使用了与 Wang^[4]的方法相似的约束,从而保证叶子纹理每个点的变化都是沿着老化方向单调进行.

5 物理模拟生成几何形状

在这里,我们使用了质点-弹簧模型来模拟植物叶子秋季形态的变化,从而使我们的叶子不仅在表观上能够随着时间变化,而且几何模型也随着时间的推移,展现叶子的卷曲、变形等形态变化.

秋季叶子失去水分之后,其细胞的几何形态和相互间的受力情况会发生变化,当叶子以某个形状固定下来时,稳定几何形态的条件是细胞之间的拉力和膨胀力相互平衡,可用下面的方程来表达:

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

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,叶肉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,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.由于植物叶子的叶脉多位于叶子背面,由大量纤维素组成的叶脉在失去水分后形态收缩并不大,因此,我们为叶子构造了上下两层的质点-弹簧模型,用来模拟叶子秋季向上的卷缩.

如图 8 所示,我们用质点弹簧模型来模拟细胞之间的连接和结构.通过构建整个叶子,包括叶脉和叶肉细胞的质点-弹簧模型网络,如图 9 所示,我们对叶子建立了质点弹簧网络模型,上层的叶肉用比较柔软的弹簧表示,在物理模拟的过程中,令其慢慢地收缩,以表示秋季失去水分的叶肉细胞的体积减小;下层的叶脉用较硬的弹簧表示,在物理模拟过程中,这些较硬的弹簧长度变化不大,从而可以模拟叶脉中大量的纤维素保持其体积不变.在物理模拟的过程中,上层弹簧的收缩和下层弹簧的保持不变,这两个行为共同作用的时候,就能模拟出叶子向上方卷曲的状态,如图 9 的上图所示,从而可以模拟叶子在秋季水分流失之后形态的变化,提供更加精确的几何模型来结合我们的表观数据进行真实感绘制.

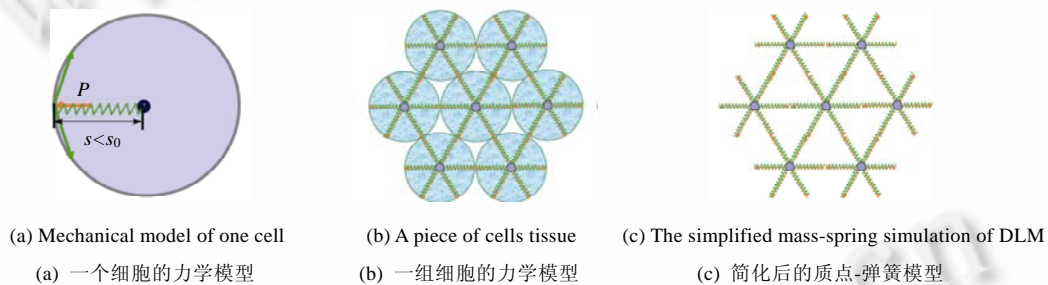


Fig.8 A 2D illustration of the cell mechanical model

图 8 细胞受力模型的二维图示

6 实验结果

这里我们重构了多种形状和纹理样式各不相同的植物叶子.本节将展示不同场景下绘制的秋季植物叶子.其中包括森林中绘制的梧桐、枫叶和椿树叶子,另外还绘制了一系列随着时间变化的秋季植物叶子序列:爬山虎、椿树和梧桐.

不同叶子的形状、采样时的大小和纹理样式都不同,我们将绘制的分辨率统一为 800×600 ,在一台 1.6GHz 的 AMD Athlon64 CPU,1GB 内存,Nvidia 7300Go 的电脑上,使用光子跟踪方法绘制需要 20 分钟左右.叶子纹理的大小是 512×512 像素,之所以选择 512×512 作为叶子纹理的分辨率是因为更小的纹理不足以表现叶子纹理的结构信息和细节,而在一些场景绘制中,由于叶子数量相对较多,更大的纹理没有必要并且会降低绘制效率.在同样配置的机器上,当使用 Effros^[27]的块合成方法进行纹理转移和纹理合成时,对于块大小为 5 像素、边界大小为 3 像素、在 7 幅输入样本纹理的时候,合成每幅需要 23 分钟.

与 Wang^[4]的方法相比,由于对更多样本的采样,从而获得了更大的表现空间和老化度空间,从图 10、图 11 中可以看出,我们能够合成从夏季到秋季整个老化过程中植物叶子的各个状态时候的表现,用得到的表现结果进行真实感绘制,使得绘制结果更具有真实感。

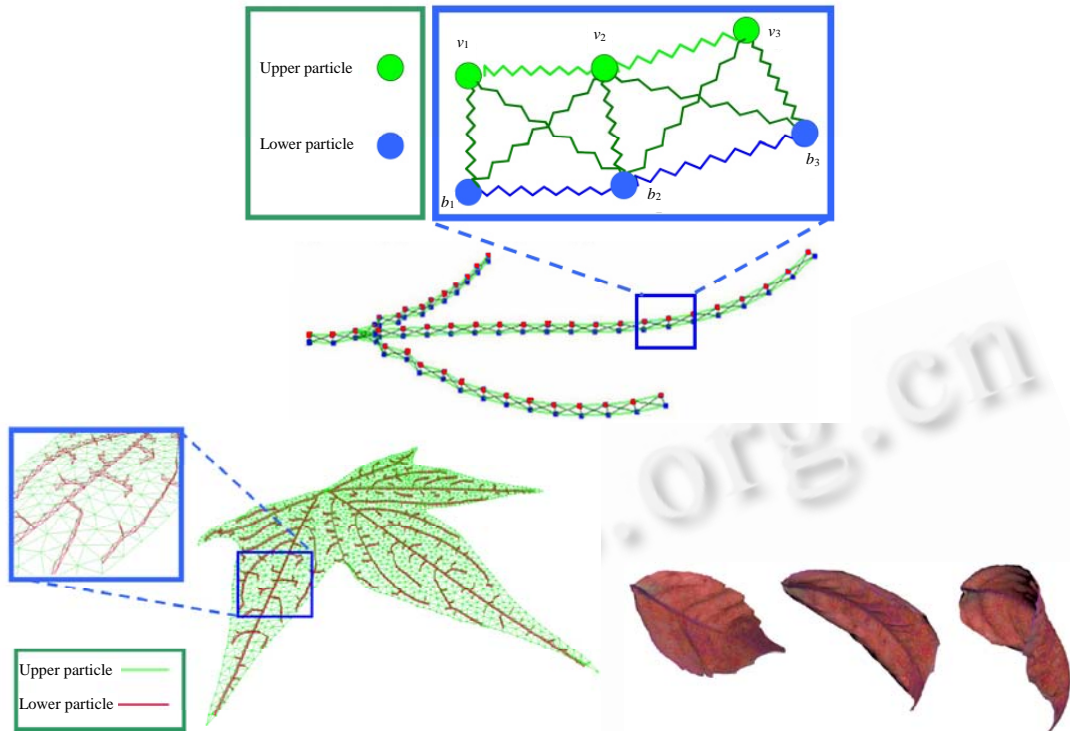


Fig.9 Double layered model: The mass springs in upper layer (light colored) denote the deformable leaf blade, while the mass-spring on the lower layer (deep colored) denote the leaf veins which have relatively rigid property. Demo of curling up phenomenon, whole leaf's mass-spring mesh, deformed creeper

图9 双层模型:上层质点-弹簧模型(浅色)表示叶肉,下层质点-弹簧模型(深色)表示相对更硬的叶脉.上图、左下图、右下图分别表示卷曲现象示意、整个叶子质点-弹簧模型网、卷曲的爬山虎



Fig.10 Generated materials of the creeper leaves (top) and Chinese toon leaves (middle): For each type of leaves, the rendering results for both front and back sides are shown, note that the material are in an age-growing order. Generated deformed shapes of Chinar leaves (bottom): For each generated leaf model, please note that the deformed leaf shapes are in an age-growing order

图10 模拟生成的爬山虎叶子序列(上)、椿树叶子序列(中)和梧桐叶序列(下):
随着时间的变化,叶子的形态和纹理表现进一步的变化

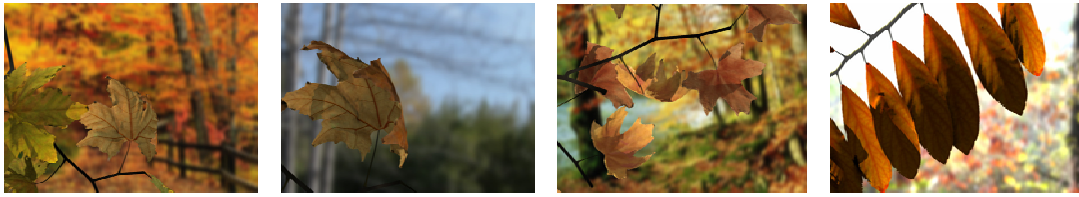


Fig.11 A group of rendered leaves in autumn scene: a single chinar leaf, some withered chinar leaves some maple leaves, and the leaves of chinese toon under sunshine

图 11 一组绘制的自然场景中的叶子:秋季森林中梧桐叶子的老化;秋季森林中多个枫叶变形和老化;逆向光照下的椿树叶,不同的树叶拥有不同的透光率

7 结论与展望

本文提供了一套采样-分析-纹理合成的方法,有效地生成植物叶子的表现,可以非常真实地展现叶子秋季在干枯、老化过程中多种纹理、表现属性的变化.我们在生成多种不同种类和衰老程度的植物叶子的过程中验证了这种方法的有效性,得到大量非常接近真实树叶的各种叶子形态和纹理.

本文目前尚未使用 GPU 进行加速,但是大部分算法都是并行的,将来可以运用 GPU 对本文的纹理合成、采样分析和老化度分析进行加速,提高运算的速度和效率,减少处理时间.

将本方法应用到对于自然场景的采样、建模和真实感绘制工作中,可以构建更加真实感的植物.同样,我们的采样和多样本老化度分析方法可以应用到其他自然场景中的物体,如岩石、树木、土壤等的采样和建模中,能够很好地采集和描述物体在较长时间过程中表面表现信息变化的过程,绘制老化、风化以及侵蚀的物体.

References:

- [1] Chiba N, Ohshida K, Muraoka K, Saito N. Visual simulation of leaf arrangement and autumn colours. *Journal of Visualization and Computer Animation*, 1996,7(2):79-93.
- [2] Mochizuki S, Cai D, Komiri T, Kimura H, Hori R. Virtual autumn coloring system based on biological and fractal model. In: *Proc. of the 9th Pacific Conf. on Computer Graphics and Applications*. IEEE Computer Society, 2001. 348.
- [3] Braitmaier M, Diepstraten J, Ertl T. Real-Time rendering of seasonal influenced trees. In: *Proc. of Theory and Practice of Computer Graphics*. 2004. 152-159.
- [4] Wang J, Tong X, Lin S, Pan M, Wang C, Bao H, Guo B, Shum HY. Appearance manifolds for modeling time-variant appearance of materials. *ACM Trans. on Graphics*, 2006,25(3):754-761.
- [5] Gu J, Tu CI, Ramamoorthi R, Belhumeur P, Matusik W, Nayar S. Time-Varying surface appearance: Acquisition, modeling and rendering. In: *Proc. of the ACM SIGGRAPH 2006*. New York: ACM Press, 2006. 762-771.
- [6] Wang L, Wang W, Dorsey J, Yang X, Guo B, Shum HY. Real-Time rendering of plant leaves. *ACM Trans. on Graphics*, 2005,24(3):712-719.
- [7] Dorsey J, Hanrahan P. Modeling and rendering of metallic patinas. In: *Proc. of the SIGGRAPH'96*, 1996. 387-396.
- [8] Dorsey J, Edelman A, Jensen HW, Legakis J, Pedersen HK. Modeling and rendering of weathered stone. In: *Proc. of the SIGGRAPH'99*. 1999. 225-234.
- [9] Paquette E, Poulin P, Drettakis G. The simulation of paint cracking and peeling. In: *Proc. of the Graphics Interface 2002 Conf*. 2002. 59-68.
- [10] Miller G. Efficient algorithms for local and global accessibility shading. In: *Proc. of the SIGGRAPH'94*. ACM Press. 1994. 319-326.
- [11] Hsu SC, Wong TT. Simulating dust accumulation. *IEEE Computer Graphics & Applications*, 1995,15(1):18-22.
- [12] Wong TT, Ng WY, Heng PA. A geometry dependent texture generation framework for simulating surface imperfections. In: *Proc. of the 8th Eurographics Workshop on Rendering (Rendering Techniques'97)*. 1997. 139-150.
- [13] Chen Y, Xia L, Wong TT, Tong X, Bao H, Guo B, Shum HY. Visual simulation of weathering by gamma-ton tracing. In: *Proc. of the ACM SIGGRAPH 2005*. New York: ACM Press, 2005. 1127-1133.

- [14] Lu J, Georghiades AS, Dorsey J, Rushmeier J, Xu C. Synthesis of material drying history: Phenomenon modeling, transferring and rendering. In: Proc. of the SIGGRAPH 2006: ACM SIGGRAPH 2006 Courses, 6. New York: ACM Press, 2006.
- [15] Badler NI, Becket W. Imperfection for realistic image synthesis. Journal of Visualization and Computer Animation. 1990,1(1): 26-32.
- [16] Cook RL. Shade trees. In: Proc. of the 11th Annual Conf. on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH'84). New York: ACM Press, 1984. 223-231.
- [17] Ebert DS, Musgrave FK, Peachey D, Perlin K, Worley S. Texturing and Modeling: A Procedural Approach. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers, 2002.
- [18] Turk G. Generating textures on arbitrary surfaces using reaction-diffusion. In: Proc. of the 18th Annual Conf. on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH'91). New York: ACM Press, 1991. 289-298.
- [19] Witkin A, Kass M. Reaction-Diffusion textures. In: Proc. of the 18th Annual Conf. on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH'91). New York: ACM Press, 1991. 299-308.
- [20] Matusik W, Zwicker M, Durand F. Texture design using a simplicial complex of morphable textures. ACM Trans. on Graphics, 2005,24(3):787-794.
- [21] Lefebvre S, Hoppe H. Parallel controllable texture synthesis. ACM Trans. on Graphics, 2005,24(3):777-786.
- [22] Kwatra V, Essa IA, Bobick AF, Kwatra N. Texture optimization for example-based synthesis. ACM Trans. on Graphics, 2005,24(3): 795-802.
- [23] Enrique S, Koudelka M, Belhumer P, Dorsey J, Nayar S, Ramamoorthi R. Time-Varing textures: Definition, acquisition, and synthesis. Technical Report, CUCS-023- 05, Columbia University, 2005.
- [24] Zhang J, Zhou K, Velho L, Guo B, Shum HY. Synthesis of progressively-variant textures on arbitrary surfaces. ACM Trans. on Graphics, 2003,22(3):295-302.
- [25] Gardner A, Tchou C, Hawkins T, Debevec P. Linear light source reflectometry. ACM Trans. on Graphics, 2003,22(3):749-758.
- [26] Wei LY, Levoy M. Fast texture synthesis using treestructured vector quantization. In: Proc. of the 27th Annual Conf. on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH 2000). New York: ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., 2000. 479-488.
- [27] Efros A, Freeman W. Image quilting for texture synthesis and transfer. In: Proc. of the ACM Siggraph. 2001. 341-346.



迟小羽(1980—),男,北京人,博士生,主要研究领域为计算机图形学,真实感绘制.



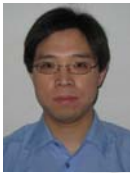
陈彦云(1971—),男,博士,主要研究领域为计算机图形学.



盛斌(1981—),男,博士生,主要研究领域为基于图像的绘制,虚拟现实,几何处理学.



吴恩华(1947—),男,博士,研究员,博士生导师,CCF高级会员,主要研究领域为真实感图形,虚拟现实,科学计算可视化.



杨猛(1982—),男,硕士生,主要研究领域为计算机图形学.