

Journal of Image
and Graphics

中国图象图形学报



ISSN1006-8961
CN11-3758/TB

2012 **5**
Vol.17 No.

中国科学院遥感应用研究所
中国图象图形学学会主办
北京应用物理与计算数学研究所

中国图象图形学报

Zhongguo Tuxiang Tuxing Xuebao

2012年5月 第17卷 第5期(总第193期)

目次

综述

- 中国图像工程:2011 章毓晋(603)
- 植物叶片表面质感建模与真实感绘制研究进展 田原,赵春江,陆声链,郭新宇(613)

图像处理和编码

- 高位有效位概率算术解码的图像密写改进算法 马丽红,吕先明,高小满(621)
- 滑动平均和改进权重函数的快速非局部平均图像去噪算法 熊波,尹周平(628)
- 提升小波的同态滤波在图像烟雾弱化中的应用 范有臣,李迎春,韩意,张来线(635)

图像分析和识别

- 基于彩色模型的重构标记分水岭分割算法 张桂梅,周明明,马珂(641)
- 均衡化特征匹配的非刚体细胞形态跟踪 陈莹,艾春璐(648)
- 图像斑状特征位置与尺寸的自动检测 王志衡,刘红敏(656)
- 改进极化白化滤波的边缘检测 邓少平,张继贤,李平湘,黄国满(665)
- 联合特征在行人检测中的应用 杨阳,杨静宇(671)
- Gabor 相位特征的人脸光照不变量提取 范春年,张福炎(676)

图像理解和计算机视觉

- 保持几何特征的自适应弹性二次曲线模型 蒋建国,郝世杰,郭艳蓉,詹曙,李鸿(682)
- 局部颜色映射的彩色夜视算法 钱小燕,张天慈,王帮峰,黄圣国(689)
- 结合分支定界法和线性规划的摄像机位姿估计 马文娟(694)

金字塔评分改进主方向模板匹配的实时目标检索 洪朝群,朱建科,李娜,卜佳俊,陈纯(700)

计算机图形学

类曲率在曲线相似性判定中的应用 于昊,赵乃良,陈小雕(707)

虚拟现实与增强现实

人机系统中视域评估的可视化 李倩,吉晓民,林文周(715)

遥感图像处理

小波方向子带偏微分方程遥感图像去噪 王相海,李放,王爽(721)

遥感图像理想均衡化及图像质量定量评价 孟天佑,汪云甲(729)

地理信息技术

点要素扇形缓冲区的设计与应用 侯景伟,孔云峰,张迪,吕可文(740)

中国图象图形学报

刊名题字: 宋 健

月刊(1996年创刊)

第17卷 第5期

2012年5月16日出版

主管单位 中国科学院

主 办 中国科学院遥感应用研究所

中国图象图形学学会

北京应用物理与计算数学研究所

主 编 李小文

编辑出版 《中国图象图形学报》编辑出版委员会

北京9718信箱 邮编 100101

电子信箱:jig@irsa.ac.cn

电话:010-68407995 010-82614429

网 址:www.cjig.cn

印刷装订 北京北林印刷厂

广告经营许可证 京朝工商广字第0346号

总 发 行 北京报刊发行局

订 购 全国各地邮局

国外发行 中国国际图书贸易总公司

(中国国际书店)

(北京399信箱 邮编 100044)

Superintended by Chinese Academy of Sciences

Sponsored by Institute of Remote Sensing Application,

CAS China Society of Image and Graphics

Institute of Applied Physics and Computational

Mathematics

Chief editor LI Xiaowen

Editor, Publisher Editorial and Publishing Board

of Journal of Image and Graphics

(P. O. Box 9718, Beijing 100101, China)

E-mail:jig@irsa.ac.cn

Distributed by Beijing Bureau for Distribution of Newspapers

and Journals

Domestic All Local Post Offices in China

Foreign China International Book Trading Corporation

(P. O. Box 399, Beijing 100044, China)

Printed by Beijing Beilin Printing House

ISSN 1006-8961 CN11-3758/TB CODE ZTTFXZ 国内邮发代号: 82-831 国外发行代号: M1406 国内定价: 45.00元

Journal of Image and Graphics

(Monthly, Started in 1996)

Vol. 17 No. 5 May 2012

Contents

Review

- Image engineering in China: 2011 Zhang Yujin (603)
- Advances in appearance modeling and photorealistic rendering of plant leaves
..... Tian Yuan, Zhao Chunjiang, Lu Shenglian, Guo Xinyu (613)

Image Processing and Coding

- Most significant bits probability arithmetic decoding for improved image steganography
..... Ma Lihong, Lv Xianming, Gao Xiaoman (621)
- Fast non-local means for image de-noising on moving average and modified weight function Xiong Bo, Yin Zhouping (628)
- Weakening of smoke for homomorphic filtering Fan Youchen, Li Yingchun, Han Yi, Zhang Laixian (635)

Image Analysis and Recognition

- Image segmentation algorithm for reconstruction labeling watershed in color space Zhang Guimei, Zhou Mingming, Ma Ke (641)
- Non-rigid cell contour tracking method for balanced feature matching Chen Ying, Ai Chunlu (648)
- Automatically detecting position and size of blob features in images Wang Zhiheng, Liu Hongmin (656)
- Improved polarimetric whitening filter for edge detection Deng Shaoping, Zhang Jixian, Li Pingxiang, Huang Guoman (665)
- Pedestrian detection based on compound feature Yang Yang, Yang Jingyu (671)
- Illumination invariant extraction on Gabor phase Fan Chunnian, Zhang Fuyan (676)

Image Understanding and Computer Vision

- Adaptive geometrical-feature-preserving elastic quadratic wire model
..... Jiang Jianguo, Hao Shijie, Guo Yanrong, Zhan Shu, Li Hong (682)
- Color night vision algorithm based on local color mapping ... Qian Xiaoyan, Zhang Tianci, Wang Bangfeng, Huang Shengguo (689)
- Camera pose estimation using branch and bound method with linear programming Ma Wenjuan (694)
- Real-time object retrieval with dominant orientation template matching improved by pyramid scoring
..... Hong Chaoqun, Zhu Jianke, Li Na, Bu Jiajun, Chen Chun (700)

Computer Graphics

- Quasi-curvature and its application in similarity measurement of curves
..... Yu Hao, Zhao Nailiang, Chen Xiaodiao (707)

Virtual Reality and Augmented Reality

- Visualization of the visual range assessment in man-machine system Li Qian, Ji Xiaomin, Lin Wenzhou (715)

Remote Sensing Image Processing

- Remote sensing image de-noising on partial differential equation in wavelet directional subband
..... Wang Xianghai, Li Fang, Wang Shuang (721)
- Ideal equalization of remote sensing images and quantitative assessment of image quality Meng Tianyou, Wang Yunjia (729)

Geoinformatics

- Design and applications of sector buffers for point feature
..... Hou Jingwei, Kong Yunfeng, Zhang Di, Lv Kewen (740)

中图法分类号: TP391.9 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2012)05-0613-08

论文引用格式: 田原, 赵春江, 陆声链, 郭新宇. 植物叶片表面质感建模与真实感绘制研究进展[J]. 中国图象图形学报, 2012, 17(5): 613-620

植物叶片表面质感建模与真实感绘制研究进展

田原^{1,2}, 赵春江¹, 陆声链¹, 郭新宇¹

1. 北京农业信息技术研究中心, 北京 100097; 2. 中国科学技术大学自动化系, 合肥 230027

摘要: 植物外观的真实感建模是计算机图形学领域的重要研究内容, 叶子作为植物最重要的器官, 尤其受到广泛的关注。近年来, 随着计算机硬件技术和图形算法的快速发展以及对植物叶子生理机理研究的不断深入, 植物叶片外观质感建模和真实感绘制的研究取得了很多成果。植物叶片表面光学特性的采集与建模技术是其中的研究热点和难点。从植物叶片真实感质感模型的定义出发, 介绍了近年来国内外在植物叶片表面质感建模和真实感绘制方面取得的最新研究进展, 并给出详细的分析和总结。最后对该领域研究存在的问题和未来发展方向提出了一些看法。

关键词: 质感模型; 植物建模; 真实感绘制; 叶片建模

Advances in appearance modeling and photorealistic rendering of plant leaves

Tian Yuan^{1,2}, Zhao Chunjiang¹, Lu Shenglian¹, Guo Xinyu¹

1. Beijing Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100097, China;

2. Department of Automation, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China

Abstract: Photorealistic modeling of plants appearance is an important research area in computer graphics. Plant leaves receives wide attention as the most important plant organ. Recently, by the rapid development of computer hardware and graphics algorithm and deep research in physiological structure of plant leaves, appearance modeling and photorealistic rendering of plant leaves has reached many good results. Especially, the acquisition of reflectance properties of plant leaves and appearance modeling are hot research topics. Starting from the definition of a photorealistic appearance model, we review the newest research development in plant appearance model and photorealistic rendering algorithm in China and abroad, and we analyze all kinds of algorithms. In the end, we summarize some problems in this research field and proposes an outlook and trends.

Key words: appearance model; plant rendering; photorealistic rendering; plant leaf modeling

0 引言

叶片是植物最重要的器官, 针对它的形态建模和可视化研究越来越多, 尤其是叶片的颜色和纹理。颜色和纹理不仅是植物叶片重要的外在特征, 同时

也是植物内在生理和生长状态的外在表现, 换句话说, 植物叶片的表面颜色和纹理与其生理状态有着密切的关系, 植物的生长年龄、成熟度、营养情况等都可能通过其表面的颜色和纹理来反映。因此, 对植物叶片颜色的建模和可视化仿真具有重要的研究价值, 国内外在这方面已开展了广泛的研究^[1-7]。

收稿日期: 2011-02-21; 修回日期: 2011-10-14

基金项目: 国家农业成果转化基金项目(2009GB2A000001); 国家自然科学基金青年基金项目(61003118); 北京市优秀人才培养基金项目(2010D002020000005)

第一作者简介: 田原(1987—), 男, 德克萨斯大学在读博士研究生, 主要研究方向为图像处理、计算机视觉、图形学等。
E-mail: tianny007@gmail.com

现实世界中,即便不考虑叶子的边缘和脉络结构,仍然可以看到丰富多彩的植物叶子表面质感效果(见图 1)。这些视觉效果是由于复杂的光照条件,即光线在场景中复杂的传播过程以及光线与物体发生的复杂交互过程形成的。这 3 个因素(光环境、光线传播、交互过程)也是真实感图形学的主要研究内容。其中,前两个因素取决于光源和物体在场景中的全局设定(如相对位置、形状等),是真实感绘制的课题;第 3 个因素(光线与物体的交互过程)是场景中物体的本质属性,只与物体的物质构成及分布有关,和场景的全局设定无关,在真实感图形学中,通常将这个因素称为物体的材质模型。图 1 给出了两幅现实世界中的植物叶片图像,因为其材质的光学特性,加之其表面丰富的几何细节,影响了光线在叶片表面及内部的传输过程,包括光线的反射、折射和次表面散射过程,因此有的叶片看起来温润细腻,有的看起来粗糙。



图 1 两种不同视觉效果叶片图像
Fig. 1 Two different kinds of plant leaves

植物叶片所呈现出来的各式各样的表面视觉效果,本质上由其表面及内部介质的物质组成与分布决定,它决定了叶子表面及内部介质与光线发生交互时的行为。植物叶子的内部介质组成十分复杂,图 2 左显示了叶片的生理学结构:其包括上、下表皮,海绵层,栅栏层等。在上、下表皮之间含有大量的色素如叶绿素、胡萝卜素、叶黄素等。图 2 右显示了光线与叶子的交互过程,入射光线一部分在叶表面反射,一部分进入叶子内部;进入内部的光线经过折射后,部分光线会射出叶子表面,部分光线则被吸收。自然界中的光环境包括不同入射方向上的和不同入射位置上的强度分布,对于特定的入射光线会有怎样的出射光线(不同方向,位置的强度分布)会直接影响叶子的表现。而随时间的变化,植物叶片

表面及内部介质的物质组成及分布也会发生变化,最终影响其表面质感,即人眼看到的表面效果。这里根据成因将表面质感分成两类:表面交互过程和次表面交互过程。前者主要考虑表面的光线反射过程和折射过程,后者主要指发生在内部的光线散射和衰减过程。由此可见,叶子的表面质感主要由其内部物质的光学特性决定。

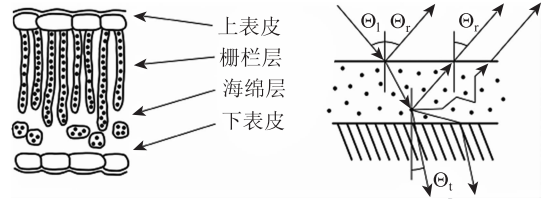


图 2 叶子内部生理结构及光线交互过程
Fig. 2 Physiological structure of plant leaf and the process of light interaction

植物叶片表面质感随时间的变化(包括几何形态和颜色视觉的变化),本质上是由于其物质构成发生了各种物理或化学变化而导致的,这被称为风化(Weathering)过程,包括叶子的老化过程、病斑发生过程等。叶片上不同部位风化程度的不同是由叶子的几何形状、外界环境等全局因素决定的,而在小尺度上特定风化阶段的外观特征是由叶子本身的材质构成以及特定的风化过程的机理所决定,这是材质固有的属性。在计算机图形学中,考虑物质构成随时间变化而产生的外观改变称为时变表面质感。

而什么因素导致植物叶片表面质感随时间变化?如何在模型中考虑到这些因素,实现随影响因素变化而变化的叶子表面质感可视化模拟?Ishikura^[1]指出,叶片的着色主要由 3 种色素构成:叶绿素、类胡萝卜素和花青素;分别对应于绿色、黄色和红色。在叶子刚开始发芽时,没有花青素,只有叶绿素和类胡萝卜素存在,并且叶绿素与类胡萝卜素之比约为 8:1。另一方面,叶绿素减少,当类胡萝卜素处于主导地位,并且糖逐渐转换成花青素,叶片变黄^[2]。

Oh^[10] 则给出了秋天植物叶片颜色变化的环境条件:

- 1) 早晚之间的温差。
- 2) 空气应保持干净,叶片接受足够的光照(特别是紫外线)光合作用的。
- 3) 空气保持适当的湿度。如果太干燥,叶片将

死;如果天气太湿,将压制叶片色素产生。

Mochizuki 等人^[3]假设,因为糖转变成花青素导致叶片变红,而光照量决定光合作用产生糖的数量,因此光照是季节性着色的关键因素。许多学者采用这个假定建立植物着色的老化过程模型。总体而言,目前关于植物叶片质感建模的研究主要包括质感静态模型与时变模型两个方向,对于每个方向,本文再分别进行归类和分析。

1 叶片表面质感静态模型

早在 20 世纪 60、70 年代,Lindenmayer^[5-6]就通过引进通过数学模型给出了植物生长建模的第一个真实感绘制方法,Lindenmayer 和 Prusinkiewicz^[7]则探讨了植物结构与表观的数学描述,为后人提供了复杂树可视化的基础。Peyrat 等人^[8]开发了基于 L 系统^[7]和 2 维广义图的 2Gmap L 系统(2Gmap)模拟植物表观。该系统扩展了 L 系统的基本语法,可自动地生成叶片的三角网格表示以及进行纹理映射,此方法可以更好地处理参量,并通过写脚本和具体规则对模型进行控制。由于叶片的几何模型可通过大量的技术实现,而本文专注于描述叶片的颜色等视觉表观信息,因此本文只讨论与叶片几何形态无关的质感模型。

从生理学的角度,叶片的着色受到其色素含量与分布的影响,并与其内部结构相关,且每个物种的植物叶子都具有多样性,不存在表观完全相同的叶子;而从物理学的角度,则是光线与叶片的物理交互过程产生的颜色表观,不仅如此,交互过程还产生了很多诸如背光、色彩浸润以及漫反射等物理现象。

1.1 基于图像合成的质感模型

对于植物叶子的颜色与纹理表观,很多方法通过图像采样或者模拟内部颜色生成机理来合成多样性的叶子图像,并通过着色器模拟光照效果等方法来增加真实感。Max^[9]选择用多次 Z 缓冲来增加真实感、减少人工感。Lluch 等人^[10]提出了一种基于图像的渲染叶片法,建立了一种称作纹理树的分级数据结构来存储纹理数据,在对每一帧进行渲染时,通过对纹理树提取合适的叶片图像集合与现有图像集合混合,实现快速的不同层次细节的表观渲染。Mochizuki 等人^[11]基于窃取颜色算法(CSA)^[12],从秋季植物图像中提取颜色,并通过基于分形方法的

两步迭代函数系统(IFS)在新图像中合成秋季着色的大量表观图像(见图 3)。



图3 基于分形迭代的窃取颜色算法(CSA)生成的植物叶子表观效果

Fig. 3 Appearance of plant leaves using CSA algorithm based on fractal model

除了颜色纹理样式,植物叶片上另一个重要的表观特征是叶脉。对于多样性的叶脉结构的建模和模拟,目前存在大量基于图像合成的方法实现。第 1 个叶脉结构的数学模型是 Meinhardt^[13]提出的反应-扩散模型,根据生长素沿叶脉发散的规则,在叶子上散布生长素引导叶脉生长。此模型可产生典型的网式叶脉图像,但缺乏结构真实感。Rolland-Lagan^[14]基于 Mitchison 的运河网模型^[15],提出通过模拟生长素在叶脉中的运输机制,这种生成叶脉的方法可很好地控制单一叶脉的尺度问题。此后,Rodkaew^[16]的方法通过在叶子上散布粒子,并迭代粒子运动向指定目标点移动,最终根据粒子移动路径生成叶脉。Runions 等人^[17]的方法类似于散布生长素的方法。首先在叶片平面上散布荷尔蒙点,根据周围的荷尔蒙点分布情况,叶脉生长点自叶片基部生长并最终布满整个叶片;同时,考虑到叶脉随叶子生长而变化,该算法加入荷尔蒙点的随时间变化和叶脉结构的分布变化,使得迭代过程产生出各式各样极具真实感的叶脉样式(图 4)。

1.2 基于光学特性的质感模型

在不同的光环境下,某一时间的静态叶子也会显示出不同的光学特性,进而产生不同光环境下的颜色表观。因此精确的叶片光函数描述,理论上可以进行真实的叶片表面质感可视化模拟,实现高度



图 4 Runions^[17]方法生成叶脉的植物图像, 生成的叶脉细节在左下的小图显示

Fig. 4 A poplar branch using the method of Runions^[17], the outlined detail vein area is shown magnified in the inset

具有真实感的渲染效果。1977 年, Nicodemus^[4] 提出了 8 维的双向表面扩散反射分布函数 (BSSRDF), 它描述了特定位置沿特定入射方向的单位光强在另一个特定位置沿另一特定方向出射的量, 这个函数可以描述完整的表面质感光学特性。理论上其可以直接采样和图形学绘制, 但因该函数维数太高, 所需存储量太大, 采样周期长达几周甚至更长时间, 使得这种方法不切实际, 因此后来衍生出了很多 BSSRDF 的简化模型如双向反射分布函数 (BRDF)^[4]。BRDF 为描述叶片的半透明次表面反射提供了相对精确的表面质感光学描述:

$$S(x_o, \omega_o, x_i, \omega_i) = \delta(\|x_i - x_o\|) \rho_{\text{BRDF}}(\omega_i, \omega_o) \quad (1)$$

光线在物体内部的传播过程可以用 Ishimaru^[18-19] 提出的辐射度传输方程 (radiative transport equation) 来描述:

$$(\omega \cdot \nabla) \phi_d(x, \omega) = \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_{4\pi} p(\omega, \omega') \phi_d(x, \omega) d\omega' - \sigma_t \phi_d(x, \omega) + \phi_i(x, \omega) + \phi_s(x, \omega) \quad (2)$$

式中, σ_t 耗损系数是同具体物质相关; ϕ_s 是物体自发光的光场, 通常认为是 0; ϕ_i 是入射光在物体内部的分布, 称为弱入射光强 (reduced incident intensity); ϕ_d 是入射光在物体内部发生散射传输后形成的光场分布, 被称为漫射光强 (diffuse intensity)。这里的位置 x 值是包括物体内部的 3 维空间。 $p(\omega, \omega')$ 是相函数 (phase function), 它描述

了光线在发生一次散射时散射光线沿各个方向的出射能量分布, 也可以理解成一个光子在发生一次散射时它的运动方向朝各个方向发生偏转的概率。相函数的类型主要有 3 种: 前向性, 较多光线在散射后继续向前传播; 各向同性, 散射后的光线方向分布与散射前的方向无关; 后向性, 较多光线在散射后朝反方向继续传播。由于这种次表面交互过程的存在, 出射光线将不仅来自出射点处的入射光线, 更多的是来自周围甚至是物体上更远的其他位置。这样出射光线的能量不仅取决于出射点物体的光学特性也取决于该点周围物质的光学特性, 从而产生色彩浸润效果, 同时也与物体的其他位置入射光强有关, 这样就产生背光效果。

根据式(2)可利用蒙特卡罗方法 (Monte Carlo simulation)^[20] 来模拟光子的物理传播过程, 实现任意材质的渲染。Hanrahan 和 Krueger^[21] 将叶部建模为分层表面, 使用蒙特卡罗光线追踪方法实现了 BRDF 的渲染效果, 这是次表面反射现象首次被引入图形学。Baranoski 和 Rokne^[22] 提出了一种算法 BDF (bidirectional distribution function) 模型: ABM (algorithm BDF model), 其考虑了影响叶子内部光的传播和吸收的生理因素, 取得了近似符合叶子光学特性的真实感效果。之后, Baranoski 和 Rokne^[23] 又引入了叶部散射模型: FSM (Foliar scattering model), 通过预先计算反射率和透射率值, 并应用了一个简化的散射模型。ABM 与 FSM 都是基于蒙特卡罗光线追踪方法。最近, Franzke 和 Deussen^[24] 使用一个简化的次表面散射模型使用光线追踪方法获得了很好的渲染速度。Wang 等人^[25] 提出利用全局光照系统实时渲染植物叶片。他们引进一个参数模型, 根据空间变量的 BRDFs 和 BTDFs (bidirectional transmittance distribution function) 描述叶片。通过综合分析叶片组织内部的表层下散射和叶表面的散射, 可以从真正的叶片中获取这些 BRDFs 和 BTDFs 模型。更加重要地, 这个描述是压缩性的, 可以被装载入图形硬件中, 进行快速的阴影演算, 对达到高帧率非常重要。对于光计算, 他们提出一种算法将辐射转移预计算法 (PRT) 推广到所有频率光, 并特别考虑了低频率环境光和高频率光照的综合作用。这一类基于光线追踪的叶部模型可以获得比较好的真实感渲染效果, 但是难以提供实时渲染需要的高速度的着色计算。

2 叶片表面质感时变模型

叶片随着植物生长以及周围环境因素变化,其内部物质构成会发生变化,从物理角度看,是其光学特性以及半透明程度随时间发生变化。时变过程可以看成是静态光线交互过程的时间函数。在任一时间点上,其光线交互过程的物理机制和静态光线交互过程完全相同。

2.1 基于变化机理的时变模型

根据叶子着色的非均匀或不规则性, Mochizuki 等人^[3]基于生物和分形维进行建模,实现了植物叶子在空间和时间上的真实感季节性着色。这种方法使用叶片纹理图像,利用混沌算法或任意迭代算法绘制秋天叶子的自然色彩。Zhou 等人^[26]则基于生物学驱动系统,模拟季节性变化的枫叶场景。该系统包括3步:环境配置、气候影响模拟和叶片纹理获取。在叶片颜色季节性变化过程中设置几个关键点,划分成3个典型的阶段:从黄绿色到艳橙色、最后成明红色。叶绿素(绿色)、胡萝卜素(黄色)和花青素(红色)这三者的密度,是计算叶片纹理像素点颜色的主要参量,光照、温度和降水量则作为叶片纹理的决定参数。近期,Zhou 等人^[27]建立了一个花色样式建模和可视化系统。此系统建立了可交互的图像合成和真正的植物样式之间的连接并提供灵活的控制,允许用户建模各种花色样式。相对于很多改进真实感渲染技术的文献,他们更注重简化花色样式建模过程和提高多样性。

现有技术已经能够绘制出具有较强真实感的叶色,然而应用到那些颜色变化不同于上述阶段的植物种类时,会有较大局限性。因为这仅仅给出了叶子的颜色变化现象,而非其生长过程模型。Desbenoit 等人^[28]用开放马尔可夫链模型(Open Markov Chain)来模拟这个过程(图5)。图5中的节点 $S_i (0 \leq i \leq n)$, 代表可能的叶片状态,并且存放了一个指向叶片地图集模型的指针,其中 n 表示结点的个数。在开放马尔可夫链模型中,转化概率由环境函数 e 和时间 t 决定,因而可表示为 $P_{ij}(e, t)$ 。整个老化过程如下:给出时间 t 和初始状态 S_i 叶片,转化概率 $P_{ij}(e, t)$ 根据温度和湿度得到;通过计算 p 点的温度 $T(p)$ 和湿度 $W(p)$ 获得环境函数 e 的值;然后,根据计算得到的概率检验叶片的演变过程。

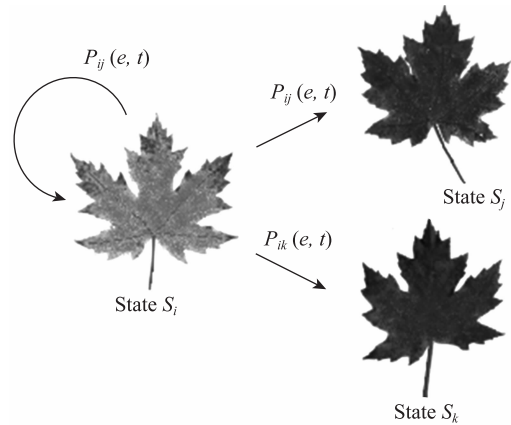


图5 叶色变化的开放马尔科夫链模型

Fig. 5 Open Markov chain model for leaf color

Braitmaier 等人^[29]基于叶子内部的色素变化机理,选取了叶绿素、胡萝卜素等几种主要影响因子并使用响应指数函数描述色素变化,最后通过变化时期的色素的反射光谱来计算最后呈现的 RGB 三通道颜色。

2.2 基于光函数的时变模型

Wang 等人^[30]提出一种不考虑物理准确性的方法,来构造植物叶子风化过程的高度真实感时变表面质感。该方法假设特定时刻的叶子样本,其外观的表面变化是与其各处的风化程度对应,通过文献[31]中的线性光源反照度测定仪(LLS)来采集植物老化叶子的表面 BRDF 与透射率,利用各处不同的表面质感本来建立表观流形,以此有效地近似风化程度的分布。最终逐点的表面质感在风化过程中的演变趋势可以反演,结合空间上点的风化程度分布,可以合成材质在不同时刻的质感。通过修改其风化程度分布图(图6),并通过实时预览的交互系统,可以得到一个时变质感序列。

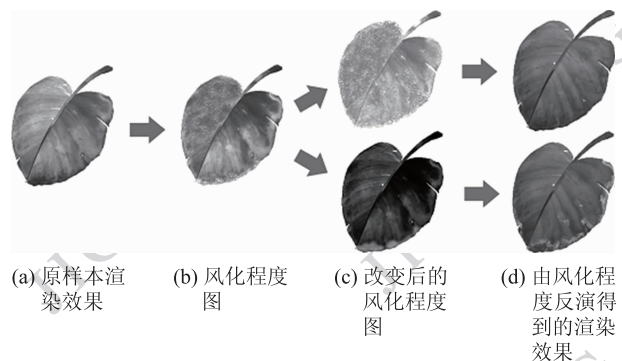


图6 风化程度分布的改变影响颜色变化

Fig. 6 Weathering distribution map influences the color change

此外, Gardner^[31]通过光度学立体视觉的方法同时获取物体的形状和反射属性(SVBRDF)。该方法首先假设物体由一系列有限种类的基础材质组成,物体的表现是由基础材质的混合并与光进行交互产生的。通过单一视点多光源的一系列图像,首先利用光度学方法获得初始法向分布图以及材质权重图,然后对基础材质的SVBRDF进行求解与优化,重建得到的渲染结果如图7所示。该方法可以将不同的材质或形状信息迁移到其余任意物体上,因此也适用于叶片质感变化建模,通过BRDF与形状信息的合成和迁移操作,模拟叶子老化过程。

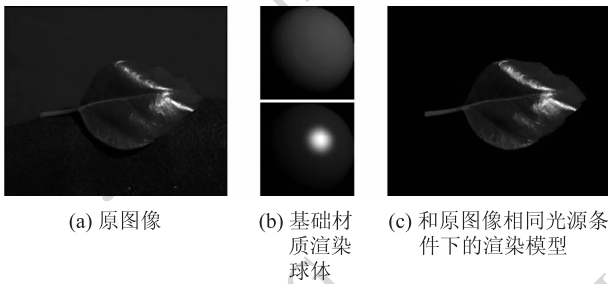


图7 渲染对比

Fig. 7 Comparison between result image and source image

迟小羽等人^[32]对大量输入叶子样本进行了分析,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。他们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,类似Wang等人^[30]提出的流形分析,使用了聚类算法对不同风化程度的点进行聚类,并使用样条曲线来描述不同类之间变化方向。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,通过纹理合成实现秋季不同衰老程度叶子的表现纹理,并能够外插合成采样范围之外的叶子纹理样式。

3 讨论与总结

在许多影视、动画作品中,植物都是重要的对象。因此,关于植物叶片的表面质感建模及其真实感绘制在数字娱乐、广告宣传、科普教育等领域具有广泛的应用需求。目前,关于植物叶子的质感模型尤其是静态模型有了长足的进步,如Desbenoit^[28]的开放马尔可夫链模型,可实现叶子老化过程的动画

模拟。每个场景的叶片的总数从14 302到25 202不等,叶子老化的模拟在不到一秒钟内完成,叶片填充需要半小时到1小时。这些模型大都停留在图形学模拟的程度,缺乏特定种类的生理支持。而基于光学特性的质感模型(如BRDF)虽然具有较强真实感和一定的物理真实性,但是其数据采集复杂、数据量大,难以推广应用。

很多早期方法如分形方法,因缺乏真实感的季节性变化而不能满足包括环境影响的高质量可视化的需要。当然这也可以归因于当时计算机硬件的性能和植物叶子材质的复杂性。使用近年来不断进步和普及的高性能图形硬件,可以构建更具真实感的植物叶片质感模型,同时可满足实时交互的需要。具体而言,关于植物叶片质感模型和真实感绘制,未来的研究预期在如下几个方面得到加强:

3.1 基于物理真实性的时变模型

目前,在物体材质的高级建模领域,已经有了很多的尝试。近年来,关于物体、风化模拟的研究主要是基于物理过程的模拟,如Dorsey和Hanrahan^[33]关于金属锈迹光泽的工作,Dorsey等人^[34]的岩石侵蚀,Paquette等人^[35]关于油画、壁画碎裂和脱皮的模拟等。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观老化效果^[36-39]。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。

在Gu^[40]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(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。目前的难点在于,对于获取植物叶子的质感变化序列,自然界中有太多的影响因素,如风、阳光、水分、温度等都会对其产生微妙的影响,另外叶子的形态和位置也会在质感变化时候也发生变化,因此很难用类似Gu^[40]和Lu^[41]等人的全程跟踪方法。因此,未来的方向之一,就是寻找全程跟踪植物叶子的老化、病害等变化过程的精确方法,并建立精确的质感描述。

3.2 实时渲染

在计算机上进行3维植物叶子绘制,既要保持物理真实感,又要高速显示,目前尚未有很好的方法。虽然现在已经能够实现包含细微表面细节的植

物叶片实时渲染,但最终的视觉效果仍然不够自然。这也是植物叶片绘制研究中待解决的主要问题之一。理论上,人们希望找到一个能高质量和实时模拟所有植物叶片光学特性及其效果的算法。不过现有的大多数算法只能兼顾其中一二。例如,如果需要实时动画,只支持植物叶片或分支的方法将很难集成;基于图像合成方法也是如此,因其常包括离线生成纹理等预处理过程,影响实时渲染速度。与其他场景渲染方法对比,通常植物叶子的图表硬件填充率或带宽局限是瓶颈,因此上述许多方法有巨大的CPU消耗。未来在计算机图形学中,对植物时变模型的实时渲染需要更多的硬件加速的支持。

参考文献 (References)

- [1] Ishikura N. Physiology of autumn coloring [J]. *Plants and Nature*, 1979, 13 (11):32-35.
- [2] Shimizu K. Artificial autumn coloring [J]. *Plants and Nature*, 1983, 17 (11):7-9.
- [3] Mochizuki S, Cai D, Komori T, et al. Virtual autumn coloring system based on biological and fractal model [C]//*Proceedings of Pacific Graphics*. Tokyo, Japan, IEEE Computer Society Press, 2001: 348-354.
- [4] Nicodemus F E, Richmond J C, Hsia J J, et al. Geometric considerations and nomenclature for reflectance, NBS Monograph 160 [R]. Washington, DC: National Bureau of Standards, 1977.
- [5] Lindenmayer A. Mathematical model for cellular interaction in development [J]. *Journal of Theoretical Biology*, 1968, 18: 280-315.
- [6] Lindenmayer A. Development systems without cellular interaction, their languages and grammar [J]. *Journal of Theoretical Biology*, 1971, 30: 455-484.
- [7] Prusinkiewicz P, Lindenmayer A. *The Algorithmic Beauty of Plants* [M]. Berlin: Springer Verlag, 1990.
- [8] Peyrat A, Terraz O, Merillou S, et al. Generating vast varieties of realistic leaves with parametric 2Gmap L-systems [J]. *Visual Computer*, 2008, 24: 807-816.
- [9] Max N, Ohsaki K. Rendering trees from precomputed Z-buffer views [C]//*Proceedings of the 6th Eurographics Workshop on Rendering*, New York, USA: Springer-Verlag, 1995: 45-54.
- [10] Lluch J, Fernandez S, Vivo R. Image-based multiresolution model for real time foliage rendering, Technical Report DSIC-24/01 [R]. Valencia, Spain: Valencia University of Technology, 2001.
- [11] Mochizuki S, Horie D, Cai D. Stealing Autumn Colors [C]//*ACM SIGGRAPH 2005 Posters*. Los Angeles, California, USA: ACM Press, 2005.
- [12] Barnsley M. Ergodic theory, fractal tops and colour stealing [EB/OL]. (2005-03-10)/[2011-01-02]. http://gan.anu.edu.au/~barnsley/pdfs/fractal_tops.pdf.
- [13] Meinhardt H. Morphogenesis of lines and nets [J]. *Differentiation*, 1976, 6: 117-123.
- [14] Rolland-Lagan A G, Prusinkiewicz P. Reviewing models of auxin canalisation in the context of vein pattern formation in Arabidopsis leaves [J]. *The Plant Journal*, 2005, 44(5):854-865.
- [15] Mitchison G J. A model for vein formation in higher plants [C]. *Proceedings of the Royal Society of London (B)*. London: Biological Sciences, 1980, 207: 79-109.
- [16] 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*. Bangkok, Thailand: Springer-Verlag, 2002.
- [17] Runions A, Fuhrer M, Lane B, et al. Modeling and visualization of leaf venation patterns [C]//*Proceedings of ACM SIGGRAPH 2005*. Los Angeles, California: ACM Press, 2005: 702-711.
- [18] Ishimaru A. *Wave Propagation and scattering in random media: Single Scattering and Transport Theory* [M]. New York: Academic Press, 1978.
- [19] Ishimaru A. *Wave Propagation and scattering in random media: multiple scattering, turbulence, rough surface and remote sensing* [M]. New York: Academic Press, 1978.
- [20] Pharr M, Hanrahan P. Monte carlo evaluation of non-linear scattering equations for subsurface reflection [C]//*Proceedings of ACM SIGGRAPH 2000*. New Orleans, USA: ACM Press, 2000:75-84.
- [21] Hanrahan P, Krueger W. Reflection from layered surfaces due to subsurface scattering [C]//*Proceedings of ACM SIGGRAPH '93*. Anaheim, California: ACM Press, 1993:165-174.
- [22] Baranoski G, Rokne J G. An algorithmic reflectance and transmittance model for plant tissue [J]. *Computer Graphics Forum*, 1997, 16(3): 141-150.
- [23] Baranoski G V G, Rokne J G. Efficiently simulating scattering of light by leaves [J]. *The Visual Computer*, 2001, 17(8): 491-505.
- [24] Franzke O, Deussen, O. Rendering plant leaves faithfully [C]//*Proceedings of ACM SIGGRAPH '03 Sketches & Applications*. San Diego, California, USA: ACM Press, 2003.
- [25] Wang L, Wang W, Dorsey J, et al. Real-time rendering of plant leaves [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2005, 24(3): 712-719.
- [26] Zhou N, Dong W, Mei X. Realistic simulation of seasonal variant maples [C]//*International Symposium on Plant Growth, Modeling, Simulation, Visualization and Their Applications*. Beijing, China: Tsinghua University Press, 2006: 295-301.
- [27] Zhou N, Dong W, Wang J, et al. Modeling and visualization of flower color patterns [C]// *Proceedings of 10th IEEE International Conference on Computer Aided Design and Computer Graphics*. Beijing: Tsinghua University Press, 2007:

- 150-155.
- [28] Desbenoit B, Galin E, Akkouche S, et al. Modeling autumn sceneries [C]//Proceedings of Eurographics '06. Vienna, Austria; Eurographics Association, 2006; 107-110.
- [29] Braitmaier M, Diepstraten J, Ertl T. Real-time rendering of seasonal influenced trees [C]//Proceedings of Theory and Practice of Computer Graphics. Los Alamitos, California, USA: IEEE Computer Society Press, 2004; 152-159.
- [30] Wang J P, Tong X, Lin S, et al. Appearance manifolds for modeling time-variant appearance of materials [J]. ACM Transactions on Graphics, 2006, 25(3): 754-761.
- [31] Gardner A, Tchou C, Hawkins T, et al. Linear light source reflectometry [J]. ACM Transactions on Graphics, 2003, 22(3): 749-758.
- [32] Chi X Y, Sheng B, Yang M, et al. Simulation of autumn leaves [J]. Journal of Software, 2009, 20(3): 702-712. [迟小羽, 盛斌, 杨猛, 等. 秋季植物叶子表观的模拟[J]. 软件学报, 2009, 20(3): 702-712.]
- [33] Dorsey J, Hanrahan P. Modeling and rendering of metallic patinas [C]//Proceedings of ACM SIGGRAPH '96. New York, USA: ACM Press, 1996; 387-396.
- [34] Dorsey J, Edelman A, Legakis J, et al. Modeling and rendering of weathered stone [C]//Proceedings of ACM SIGGRAPH '99. Los Angeles, California, USA: ACM Press, 1999; 225-234.
- [35] Paquette E, Poulin, P, Drettakis G. The simulation of paint cracking and peeling [C]//Proceedings of Graphics Interface '02. Calgary, CA: IEEE Computer Society, 2002; 59-68.
- [36] Miller G. Efficient algorithms for local and global accessibility shading [C]//Proceedings of ACM SIGGRAPH '94. Orlando, FL, USA: ACM Press, 1994; 319-326.
- [37] Hsu S C, Wong T T. Simulating dust accumulation [J]. IEEE Computer Graphics and Application, 1995, 15(1): 18-22.
- [38] Wong T T, Ng W Y, Heng P A. A geometry dependent texture generation framework for simulating surface imperfections [C]//Proceedings of the Eurographics Workshop on Rendering Techniques '97. London, UK: Springer-Verlag, 1997; 139-150.
- [39] Chen Y, Xia L, Wong T T, et al. Visual simulation of weathering by r-ton tracing [J]. ACM Transactions on Graphics, 2005, 24(3): 1127-1133.
- [40] Gu J, Tu C I, Ramamoorthi R, et al. Time-varying surface appearance: acquisition, modeling and rendering [J]. ACM Transactions on Graphics, 2006, 25(3): 762-771.
- [41] Lu J, Georghiadis A S, Rushmeier H, et al. Synthesis of material drying history: phenomenon modeling, transferring and rendering [C]//Proceedings of Eurographics Workshop on Natural Phenomena. Dublin, Ireland: Eurographics Association, 2005; 9-16.