



JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS

主办: 中国科学院遥感与数字地球研究所
中国图象图形学学会
北京应用物理与计算数学研究所

中国图象图形学报

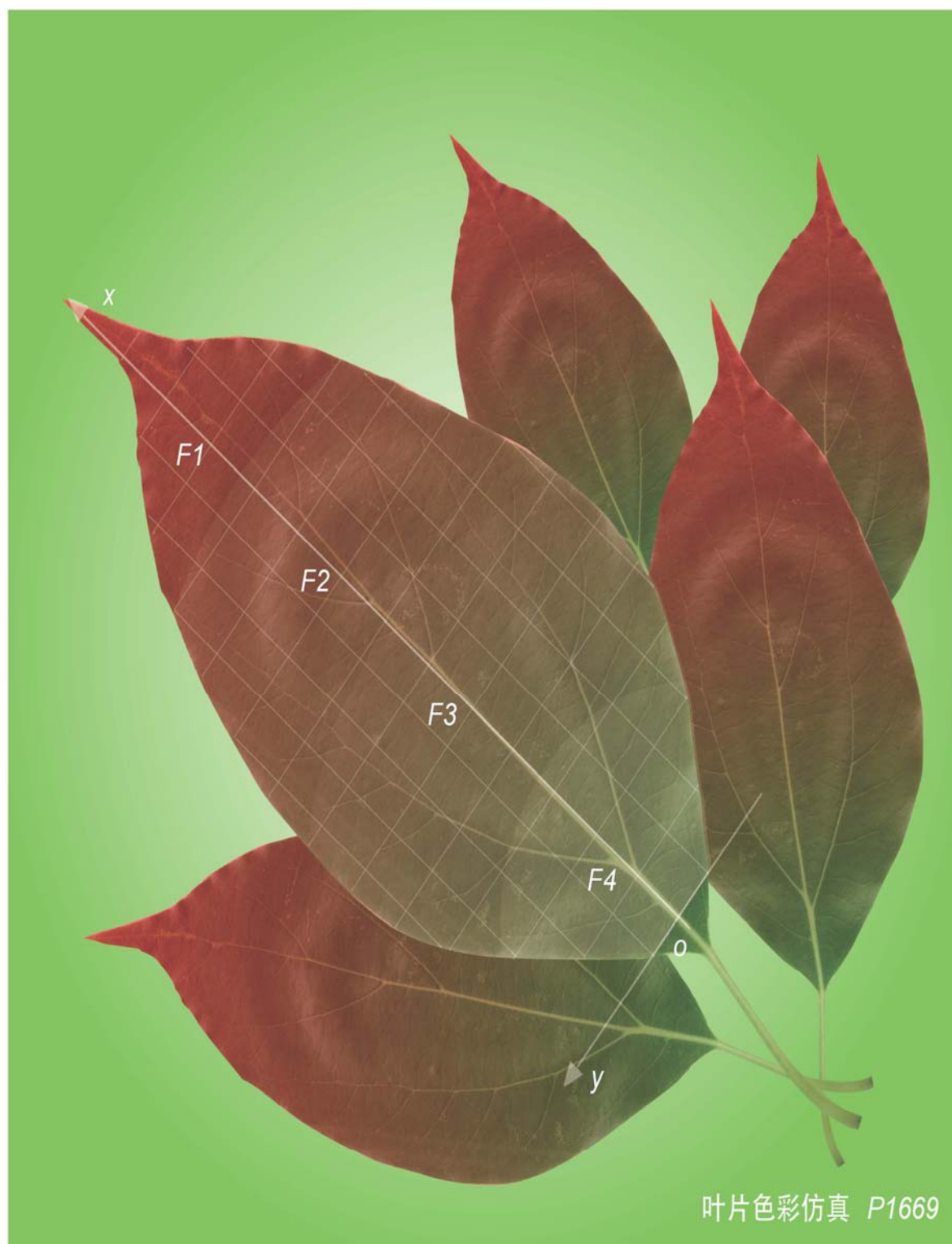
2014

11

VOL.19

ISSN1006-8961

CN11-3758/TB



叶片色彩仿真 P1669



第19卷第11期（总第223期）

2014年11月16日

中国精品科技期刊
中国国际影响力优秀学术期刊
中国科技核心期刊

版权声明

凡向《中国图象图形学报》投稿，均视为同意在本刊网站及CNKI等全文数据库出版，所刊载论文已获得著作权人的授权。本刊所有图片均为非商业目的使用，所有内容，未经许可，不得转载或以其他方式使用。

Copyright

All rights reserved by Journal of Image and Graphics, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS. The content (including but not limited text, photo, etc) published in this journal is for non-commercial use.

主管单位 中国科学院

主办单位 中国科学院遥感与数字地球研究所
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

邮政信箱 北京9718信箱

邮 编 100101

电子信箱 jig@irsa.ac.cn

电 话 010-64807995

网 址 www.cjig.cn

广告经营许可证 京朝工商广字第0361号

总 发 行 北京报刊发行局

订 购 全国各地邮局

海外发行 中国国际图书贸易集团有限公司
(邮政信箱：北京399信箱 邮编：100048)

印刷装订 北京科信印刷有限公司

Journal of Image and Graphics

Title inscription: Song Jian

Monthly, Started in 1996

Superintended by Chinese Academy of Sciences

Sponsored by Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS
China Society of Image and Graphics

Institute of Applied Physics and Computational Mathematics

Editor-in-Chief LI Xiaowen

Editor, Publisher Editorial and Publishing Board of Journal of
Image and Graphics

P.O.Box 9718, Beijing, P.R.China

Zip code 100101

E-mail jig@irsa.ac.cn

Telephone 010-64807995

Website www.cjig.cn

Distributed by Beijing Bureau for Distribution of Newspapers and Journals

Domestic All Local Post Offices in China

Overseas China International Book Trading Corporation
(P.O.Box 399, Beijing 100048, P.R.China))

Printed by Beijing Kexin Printing Co., Ltd.

CN 11-3758/TB

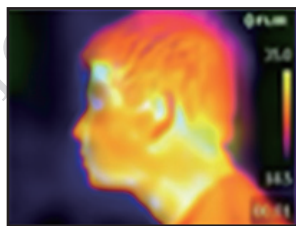
ISSN 1006-8961

CODEN ZTTXFZ

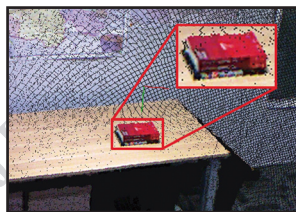
国外发行代号 M1406

国内邮发代号 82-831

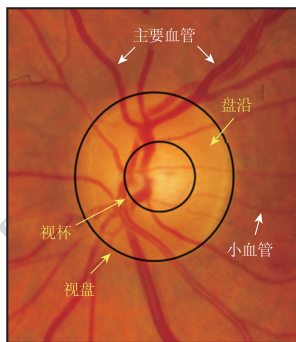
国内定价 50.00元



红外热像视频的细微变化放大(第1577页)



Kinect传感器的彩色和深度相机标定(第1584页)



多相主动轮廓模型的眼底图像杯盘分割(第1604页)

综述

多媒体技术研究: 2013——面向智能视频监控的视觉感知与处理

黄铁军, 郑锦, 李波, 傅慧源, 马华东, 薛向阳, 姜育刚, 于俊清 1539

图像处理和编码

基于高阶奇异值分解和均方差迭代的图像去噪

胡文锐, 谢源, 张文生 1563

小波域中双稀疏的单幅图像超分辨

杨波, 吴纪桃, 谢晓振 1570

红外热像视频的细微变化放大

付传卿, 谷小婧, 顾幸生 1577

图像理解和计算机视觉

Kinect传感器的彩色和深度相机标定

郭连朋, 陈向宁, 刘彬 1584

空间统一调制模型的轮廓检测

肖洁, 蔡超, 郭照立 1591

图像分析和识别

结合相似性拟合与空间约束的图像分割

张峥嵘, 詹天明, 韦志辉 1596

多相主动轮廓模型的眼底图像杯盘分割

郑嫻, 范慧杰, 唐延东, 王琰 1604

精确局部特征描述的表情识别

胡敏, 江河, 王晓华, 陈红波, 李堃, 任福继 1613

Gabor小波和改进LBP的零件表面粗糙度识别

胡海锋, 陈苏婷 1623

可扩展的花卉种类识别

苗金泉, 曹卫群 1630

医学图像处理

基于提升小波变换的医学图像融合

李俊峰, 姜晓丽, 戴文战 1639

遥感图像处理

基于压缩感知的SAR图像鲁棒编码传输

侯兴松, 田文文, 龚晨 1649

第11届全国智能CAD与数字娱乐学术会议专栏

大规模DVE场景对等传输机制研究新进展

王明飞, 贾金原, 张晨曦 1657

自然环境下的植物叶片智能色彩推理仿真

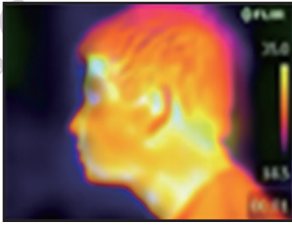
宋建文, 邱锦明 1669

3个控制顶点的类三次Bézier螺线

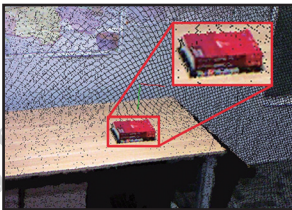
高晖, 寿华好, 缪永伟, 王丽萍 1677

CONTENTS

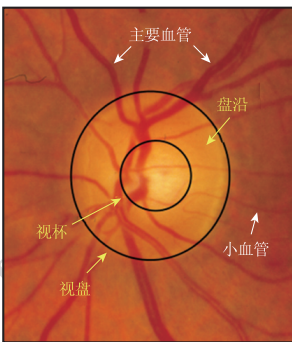
JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS



Magnifying imperceptible variations in infrared thermal videos(P1577)



Calibration of Kinect sensor with depth and color camera (P1584)



Automatic segmentation of optic disc and cup using multiphase active contour model in fundus images(P1604)

Review

Visual perception and processing for intelligent video surveillance:a review

Huang Tiejun, Zheng Jin, Li Bo, Fu Huiyuan, Ma Huadong, Xue Xiangyang, Jiang Yugang, Yu Junqing

1539

Image Processing and Coding

Image denoising based on high order singular value decomposition and mean square error iteration

Hu Wenrui, Xie Yuan, Zhang Wensheng

1563

Single image super-resolution in wavelet domain with double sparse

Yang Bo, Wu Jitao, Xie Xiaozhen

1570

Magnifying imperceptible variations in infrared thermal videos

Fu Chuanqing, Gu Xiaojing, Gu Xingsheng

1577

Image Understanding and Computer Vision

Calibration of Kinect sensor with depth and color camera

Guo Lianpeng, Chen Xiangning, Liu Bin

1584

Contour detection based on spatially unified modulation model

Xiao Jie, Cai Chao, Guo Zhaoli

1591

Image Analysis and Recognition

Image segmentation by integrating similarity fitting and spatial constraint

Zhang Zhengrong, Zhan Tianming, Wei Zhihui

1596

Automatic segmentation of optic disc and cup using multiphase active contour model in fundus images

Zheng Shan, Fan Huijie, Tang Yandong, Wang Yan

1604

Precise local feature description for facial expression recognition

Hu Min, Jiang He, Wang Xiaohua, Chen Hongbo, Li Kun, Ren Fuji

1613

Recognition of work piece surface roughness based on Gabor wavelet and improved LBP

Hu Haifeng, Chen Suting

1623

The scalable flowers category recognition

Miao Jinqun, Cao Weiqun

1630

Medical Image Processing

Medical image fusion based on lifting wavelet transform

Li Junfeng, Jiang Xiaoli, Dai Wenzhan

1639

Remote Sensing Image Processing

Robust coding transmission for SAR image based on compressive sensing

Hou Xingsong, Tian Wenwen, Gong Chen

1649

Column of CIDE' 2014

Survey on transmission mechanism of large scale DVE scene based on P2P overlay network

Wang Mingfei, Jia Jinyuan, Zhang Chenxi

1657

Intelligent color reasoning simulation of plant leaf based on the natural environment

Song Jianwen, Qiu Jinming

1669

The quasi-cubic Bézier spirals with three control points

Gao Hui, Shou Huahao, Miao Yongwei, Wang Liping

1677

中图法分类号: TP301 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2014)11-1669-08

论文引用格式: Song J W, Qiu J M. Intelligent color reasoning simulation of plant leaf based on the natural environment[J]. Journal of Image and Graphics, 2014, 19(11): 1669-1676. [宋建文, 邱锦明. 自然环境下的植物叶片智能色彩推理仿真[J]. 中国图象图形学报, 2014, 19(11): 1669-1676.] [DOI:10.11834/jig.20141115]

自然环境下的植物叶片智能色彩推理仿真

宋建文¹, 邱锦明²

1. 中国美术学院互动艺术与技术研究所, 杭州 310024; 2. 三明学院信息工程学院, 三明 365004

摘要: **目的** 在分析当前相关研究成果的基础上, 提出植物叶片基于自然环境的色彩粗规律模型, 为大场景植物动态仿真提供算法和理论依据。 **方法** 该方法利用函数 S-粗集, 通过 $(F, \bar{F})$ -色彩粗规律给出动态色彩系统 U 的色彩生成算法和植物叶片色彩推理仿真, 建立基于自然环境的植物叶片动态色彩系统建模理论。 **结果** 实验结果表明, 在基于双向 S-粗集函数的植物叶片动态色彩系统理论中, 对于阔叶植物叶片, 当调整外部因素(如光照度、温度、湿度等)时, 叶片的色彩也随之产生相应的变化, 验证了植物叶片色彩粗规律理论的可靠性与有效性。 **结论** 在植物叶片的智能仿真系统中, 当外部因素变化时, 植物叶片色彩的动态变化基本上符合自然环境中叶片的基本规律, 是一种基于 Billboard 技术的用于解决大场景植物叶片色彩动态变化模拟和仿真的有效方法。

关键词: 自然环境; 函数 S-粗集; 植物叶片; 色彩粗规律; 智能色彩; 推理仿真

Intelligent color reasoning simulation of plant leaf based on the natural environment

Song Jianwen¹, Qiu Jinming²

1. Interactive Arts and Technology Institute of the China Academy of Art, Hangzhou 310024, China

2. School of Information Engineering, Sanming University, Sanming 365004, China

Abstract: **Objective** This study proposes a plant leaf model based on the color rough law of the natural environment. This study provides algorithms and theories that can be used for large-scale plant dynamic simulation. **Methods** The functional S-rough set is used through $(F, \bar{F})$ color rough law and the color coarse rule of the natural environment, which provide a color generation algorithm based on a dynamic color system and plant leaf color reasoning simulation. This study proposes a system modeling theory for dynamic plant leaf colors based on the natural environment. **Results** The developed dynamic color system theory is shown as a function of two direct S-rough sets for broad leaves. Leaf color changes with the adjustment of external factors (e. g., light, temperature, and humidity). This adjustment verifies the reliability and validity of the plant leaf rough law theory. **Conclusion** In the intelligent simulation system of plant leaves, the dynamic change in leaf color is consistent with the natural law of leaves. This system can be used for large-scale plant dynamic simulation based on the billboard technology. The current algorithm simulates leaves; however, its applications are still limited. For example, the time and space complexities of the algorithm have not yet been analyzed. In addition, the algorithm has yet to be used to simulate uneven spots on leaves. Future studies on grove simulation should include random functions to obtain the desired effect. The light, temperature, and humidity factors considered in this study are only for simple calculations. Normal calculation methods, such as large-scale simulation, should be performed. Simple methods should be included in future studies. This

收稿日期: 2014-03-31; 修回日期: 2014-05-30

基金项目: 福建省自然科学基金项目(2012J01282); 浙江省哲学社会科学规划项目(11XKJ16)

第一作者简介: 宋建文(1959—), 男, 副教授, 1983 年于山东冶金工业学院工民建专业获学士学位, 主要研究方向为虚拟现实、色彩数字化及其应用。E-mail: songjw888@126.com

study has shown through simulation that the color of plant leaf surface varies under the influence of scene appearance factors. The results of this study may be used as a basis for the large-scale simulation of forest fire and vegetation emergency management plan design under drought disasters.

Key words: natural environment; function S-rough sets; plant leaf; color rough low; intelligent color rough set; reasoning simulation

0 引言

基于自然环境的树木和植物仿真技术在商业上已经有了许多应用,其中最成功的是美国 IDV (Interactive Data Visualization, Inc.) 公司研发的 Speedtree, 其开发工具包在游戏和仿真环境被普遍采用, 国际上最大的游戏引擎公司美国 Epic (Embedded Platform for Industrial Computing) 开发的 UDK (unreal development kit 虚幻引擎开发工具包) 也嵌入了 Speedtree SDK (software development kit)。

近年来,关于植物及其叶片的仿真研究方法主要分为:1) 基于光学特性的质感模型和基于物理真实性的时变模型^[1];2) 基于环境因素的植物叶片算法^[2-6];3) 基于 Billboard 技术^[7];4) 在大场景中植物仿真算法研究等^[7]。

前两种方法的技术基础是以曲线节点或三角面片构建叶片表面,根据双向反射分布函数 (BRDF) 和双向透射分布函数 (BTDF) 对叶片进行实时渲染。其中, Li 等人^[6]的工作模型是用叶片实际测量的 BRDF 和 BTDF 数据将叶片模型参数化后进行实时渲染。在基于环境因素的植物叶片算法中, Desbenoit、迟小羽、杨科峰等人^[24]将植物的外部环境和季节因素的研究纳入研究范畴,取得了较佳的仿真效果, Desbenoit 等人^[2]以秋天树叶衰老的状态建立开放式马尔可夫链算法。迟小羽^[3]是采集秋天叶片,用线性光学光度仪测出反射性和透光性数据,建立 BRDF + BTDF 模型对叶片进行渲染。杨科峰^[4]虽然将环境因素(如温度、湿度和时间)纳入研究范畴,算法上也是采用开放式马尔可夫链对叶片进行渲染。综上所述,文献[2-6]的研究方法普遍采用曲线节点或三角面片构建叶片表面,仿真效果具有较强的物理真实性,但在算法的设计上有相似之处,他们共同的问题是在大场景的仿真中,数据量大,数据采集复杂,且叶片的仿真是静态仿真,无法实现根据外部环境因素变化产生实时的变化,实际应用性有待进一步研究。

在方法3)4)中, Weier^[8]的方法用于 GIS 中地面植被的仿真,其算法主要技术思想在 Wang-tile 纹理中填充 PDD (poisson disc distributions), 将不同类别的植物根据地形的 ID 号通过 XML 读入并进行随机分布。该方法对以大地视角观察场景是有效的, 但该方法用于漫游正常人视角的场景时, 需要与 Billboard 植物相结合, 不适合单独使用。

从研究的成果看, 以 Billboard 技术做叶片将真实的叶片照片粘贴在四边面片中, 在树丛中呈现出十分逼真的仿真效果, 特别是在大场景仿真渲染中, 其运行速度也更好, 是目前普遍应用的重要方法。 Bao 等人^[8]将植物分为树干和树叶两部分, 树干是实体模型构成, 树叶是有多片的 Billboard 面组成, 根据场景相对相机的远近应用 LOD 技术, 以增加渲染速度。

目前, 基于 Billboard 技术所存在的共同问题是: 叶片效果是静态色彩仿真, 同样不能实现在场景中随温度和光线的变化自主地改变, 使大场景中植物色彩具有比较均匀的特点。因而, 引出一个重要命题, 如果将智能色彩推理技术引入叶片 Billboard 仿真技术中, 让植物的叶片随场景外部因素的动态变化而自主变化, 使场景植物的色彩呈现不均匀性, 对大场景植物仿真具有十分重要的科学研究和实用价值。

色彩是光线通过物体反射作用于人的大脑和视觉器官的视觉感知结果。在自然环境下, 由于植物叶片色素的变化而形成变化的植物色彩, 植物的遗传因素是植物叶片色彩的形成内因, 而光照度、温度、湿度(这里特指叶片自身的含水量)、土壤 pH 值等因素是影响色彩形成的外因, 这些外部因素通过影响植物体内的光合作用、水分代谢、矿物质代谢等生理生化过程, 引起植物叶片内各种色素的比例变化, 导致植物叶呈现不同色彩^[9-11]。

在自然环境下, 如果知道植物叶片的光照度、温度、湿度、土壤 pH 值等外部因素的变化规律, 能否通过推理得到该植物叶片的色彩变化规律? 本文通过分析植物由外部因素变化对叶片的影响, 将植物叶片分为有限个单元, 根据叶片在外部因素影响下

色彩变化规律利用函数 S-粗集, 提出基于自然环境的色彩粗规律的新算法。当外部因素变化时, 叶片的色彩也随之发生变化, 将变化的结果存为纹理贴图, 读入场景中实现通过推理改变植物叶片颜色的技术思想。本文算法不影响 Billboard 植物场景的渲染速度, 以期实现基于自然环境的植物叶片的动态色彩系统建模, 为大场景植物动态仿真提供算法和理论依据。

1 动态色彩系统的色彩粗规律

如果将植物叶片的色彩变化过程抽象为一个动态色彩系统 U , 显然, 由于动态色彩系统 U 常常会受到光照度、温度、湿度、土壤 pH 值等一些动态的、不确定的外部因素的影响, 使得动态色彩系统 U 具有不确定性, 或者说植物叶片的色彩变化规律也具有动态性和不确定性。因此, 得到了外部因素的分布规律(分布曲线)与色彩分布规律的关系, 就可得到植物叶片的色彩变化规律。

事实上, 如果某一动态色彩系统的植物叶片的色彩变化规律集为 C , 或称色彩规律论域 $C = \{c_1(x), c_2(x), \dots, c_m(x)\}$ 的色彩因素(属性)集 α 受到外部因素的 $(F, \bar{F})$ -干扰变成 $\alpha^{(F, \bar{F})}$, 那么色彩规律论域 C 就变成了 $C^{(F, \bar{F})}$, 或者对 C 的色彩因素(属性)集 α 的 $(F, \bar{F})$ -干扰生成了色彩规律集 $C^{(F, \bar{F})}$ 。显然, C 与 $C^{(F, \bar{F})}$ 之间存在一个关系, 这个过程等价于构成函数双向 S-粗集的等价类 $[c(x)]_i$ 的属性集 α_i 在元素 $(f_i, \bar{f}_i) \in (F, \bar{F})$ 迁移函数作用下 $\alpha = \{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n\}$, 变成 $\alpha^{(F, \bar{F})} = \alpha \cup \alpha^F - \alpha^{\bar{F}}$, 使得 C 中的元素(规律元素)发生变化, $C = \cup_i [c(x)]_i$ 变为 $C^{(F, \bar{F})} = \cup_j [c(x)]_j$ 。

函数双向 S-粗集^[12]是处理动态性和不确定性问题的重要理论, 在知识发现、模式识别和机器学习的理论研究与应用, 以及动态系统的规律挖掘、动态规律发现、模式动态识别等领域的应用取得了一定的成果^[13-18]。函数 S-粗集具有规律性和动态迁移性, 能很好地解决具有动态特性的不确定规律问题。

基于以上事实, 本文提出以下问题: 如果色彩规律论域 C 的色彩因素(属性)集 α 受到 $(F, \bar{F})$ -干扰, 那么色彩规律论域 C 与 $(F, \bar{F})$ -干扰之间是否存在着关系和规律? 如果存在这样的关系和规律, 它

们有什么特性? 本文利用文献[11-12, 16-17]给出 $(F, \bar{F})$ -色彩规律生成、色彩粗规律和 $(F, \bar{F})$ -色彩推理的概念, 并给出基于自然环境的植物叶片智能色彩推理仿真实例。

1.1 $(F, \bar{F})$ -色彩粗规律

约定: 设 C 是有限色彩规律(函数)论域, V 是 C 对应的属性论域, $c(x)$ 简记为 c 。

定义 1 设 $X \subseteq C$ 是色彩规律集, R 是 X 上的规律等价关系, 称

$$[c]_i = \{c_1, \dots, c_k\}, \quad c_j \in X \quad (1)$$

是 X 上的一个色彩规律等价类, 如果 c_j 具有色彩属性, 其中 $\alpha_i = (\alpha_{i1}, \alpha_{i2}, \dots, \alpha_{im}) \in V, j = 1, 2, \dots, k$ 。称 $\underline{C}_R(X)$ 是 X 上关于 R 的一个色彩下规律集

$$\underline{C}_R(X) = \cup_i [c]_i = \{c | c \in X, [c] \subseteq X\} \quad (2)$$

称 $\bar{C}_R(X)$ 是 X 上关于 R 的一个色彩上规律集, 如果

$$\bar{C}_R(X) = \cup_j [c]_j = \{c | c \in X, [c] \cap X \neq \emptyset\} \quad (3)$$

是 X 上关于 R 的一个色彩上规律集。称 $(\underline{C}_R(X), \bar{C}_R(X))$ 是 X 上关于 R 的色彩粗规律集。 X 上的 R -色彩规律边界为

$$C_R^{\text{Bound}}(X) = \bar{C}_R(X) - \underline{C}_R(X) \quad (4)$$

定义 2 $X \subseteq C$ 是色彩规律集, $F = \{f_1, f_2, \dots, f_n\}$, $\bar{F} = \{\bar{f}_1, \bar{f}_2, \dots, \bar{f}_n\}$, $X^{(F, \bar{F})}$ 是 X 的 S-双向集, 如果

$$X^{(F, \bar{F})} = X \cup X^F - X^{\bar{F}} \quad (5)$$

$$X^F = \{c' | c' \notin X, f(c') = c \in X, f \in F\}$$

$$X^{\bar{F}} = \{c | c \in X, \bar{f}(c) = c' \notin X, \bar{f} \in \bar{F}\} \quad (6)$$

定义 3 $X \subseteq C$ 是色彩规律集, $X^{(F, \bar{F})}$ 是 X 的 S-双向集, R 是 C 上的规律等价关系, 称 $\underline{C}_R^{(F, \bar{F})}(X^{(F, \bar{F})})$ 是 X 上的一个双向色彩下规律集, 如果

$$\underline{C}_R^{(F, \bar{F})}(X^{(F, \bar{F})}) = \cup_i [c]_i = \{c | c \in X^{(F, \bar{F})}, [c] \subseteq X^{(F, \bar{F})}\} \quad (7)$$

称 $\bar{C}_R^{(F, \bar{F})}(X^{(F, \bar{F})})$ 是 X 上的一个双向色彩上规律集, 如果

$$\bar{C}_R^{(F, \bar{F})}(X^{(F, \bar{F})}) = \cup_j [c]_j = \{c | c \in X^{(F, \bar{F})}, [c] \cap X^{(F, \bar{F})} \neq \emptyset\} \quad (8)$$

称 $(\underline{C}_R^{(F, \bar{F})}(X^{(F, \bar{F})}), \bar{C}_R^{(F, \bar{F})}(X^{(F, \bar{F})}))$ 是 X 上的一个双向色彩粗规律集, 称 $C_R^{\text{Bound}}(X^{(F, \bar{F})})$ 是 X 上的一个双向色彩粗规律边界, 如果

$$C_R^{\text{Bound}}(X^{(F, \bar{F})}) = \bar{C}_R^{(F, \bar{F})}(X^{(F, \bar{F})}) - \underline{C}_R^{(F, \bar{F})}(X^{(F, \bar{F})}) \quad (9)$$

利用定义 1—3 给出基于自然环境下的 $(F, \bar{F})$ -色彩粗规律生成模型。

1.2 $(F, \bar{F})$ -色彩粗规律生成模型1) 建立色彩因素 α_i 的离散色彩规律

$$c_{\alpha_i}(s) = \sum_{j=1}^{n+1} v_j \prod_{\substack{k=1 \\ k \neq j}}^{n+1} \frac{v - s_{ik}}{v_{ij} - s_{ik}} =$$

$$\alpha_n s^n + \alpha_{n-1} s^{n-1} + \cdots + \alpha_1 s + \alpha_0 \quad (10)$$

式中, α_i 是动态色彩系统 U 的外部色彩因素, $v_{ij} = \alpha_i(s_j)$ 是色彩因素 α_i 在状态 s_j 下所对应 $i, j = 1, 2, \dots, n+1$ 的色彩值(如 RGB 值), 序列

$$(s_{i1}, v_{i1}), (s_{i2}, v_{i2}), \dots, (s_{in+1}, v_{in+1}) \quad (11)$$

是色彩因素 α_i 的离散色彩规律。其中式(10)的生成形式不唯一, 可以根据具体问题给出(如植物叶片的色彩规律, 可以通过式(11), 利用 $c_{\alpha_i}(s) =$

$k_i e^{\frac{-(s-a_i)^2}{2b_i^2}}$ 拟合确定)。

2) 建立色彩因素 α 的色彩规律

$$c_\alpha(s) = \sum_{i=1}^n \lambda_i c_{\alpha_i}(s) \quad (12)$$

式中, $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m)$ 是动态色彩系统 U 的外部色彩因素, $c_{\alpha_i}(s)$ 是色彩因素 α_i 的色彩规律, λ_i 是 α_i 在色彩因素 $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m)$ 中的色素比例影响因子。

以下对 X 的双向色彩粗规律的 $(F, \bar{F})$ -干扰特性进行讨论, 为了便于讨论, 记

$$\underline{C} = \underline{C}_R^{(F, \bar{F})}(X^{(F, \bar{F})}) \quad \tilde{C} = \tilde{C}_R^{(F, \bar{F})}(X^{(F, \bar{F})})$$

3) 建立双向色彩粗规律 $(\underline{C}, \tilde{C})$ 的 $(F, \bar{F})$ -色彩粗规律生成

$$(\underline{C}^{(F, \bar{F})}, \tilde{C}^{(F, \bar{F})}) \quad (13)$$

式中, $\underline{C}^{(F, \bar{F})}, \tilde{C}^{(F, \bar{F})}$ 分别是 $\underline{C}, \tilde{C}$ 的 $(F, \bar{F})$ -色彩粗规律生成, 如果 $\underline{C}, \tilde{C}, \underline{C}^{(F, \bar{F})}, \tilde{C}^{(F, \bar{F})}$ 的色彩规律属性集分别是 $\alpha, \tilde{\alpha}, \alpha^{(F, \bar{F})}, \tilde{\alpha}^{(F, \bar{F})}$, 而且

$$\underline{C}^{(F, \bar{F})} = \underline{C} \cup \{c | c' \notin X^{(F, \bar{F})}, f(c') = c \in X^{(F, \bar{F})} \} -$$

$$\{c | c \in X^{(F, \bar{F})}, \bar{f}(c) = c'' \notin X^{(F, \bar{F})} \} \quad (14)$$

$$\tilde{C}^{(F, \bar{F})} = \tilde{C} \cup \{c | c' \notin X^{(F, \bar{F})}, f'(c') = c \in X^{(F, \bar{F})} \} -$$

$$\{c' | c' \in X^{(F, \bar{F})}, \bar{f}'(c) = c' \notin X^{(F, \bar{F})} \} \quad (15)$$

式中, $f, f' \in F, \bar{f}, \bar{f}' \in \bar{F}$ 。

4) 建立 $(\underline{C}^{(F, \bar{F})}, \tilde{C}^{(F, \bar{F})})$ 关于 $(\underline{C}, \tilde{C})$ 的 $(F, \bar{F})$ -色彩粗规律干扰度

$$\rho(\underline{C}^{(F, \bar{F})}, \tilde{C}^{(F, \bar{F})}) \quad (16)$$

式中

$$\rho(\underline{C}^{(F, \bar{F})}) =$$

$$1 - \pi(\underline{C} \cap \underline{C}^{(F, \bar{F})}) / \pi(\underline{C} \cup \underline{C}^{(F, \bar{F})}) \quad (17)$$

$$\rho(\tilde{C}^{(F, \bar{F})}) =$$

$$1 - \pi(\tilde{C} \cap \tilde{C}^{(F, \bar{F})}) / \pi(\tilde{C} \cup \tilde{C}^{(F, \bar{F})}) \quad (18)$$

$\pi(C) = \|C\| / \|U\|$, $\|C\|$ 表示 C 的测度。

利用 $(F, \bar{F})$ -色彩粗规律生成模型, 可以得到 $(F, \bar{F})$ -色彩粗规律干扰度的关系性质,

性质1 设 $\alpha, \alpha_i^{(F, \bar{F})}, \alpha_j^{(F, \bar{F})}, \alpha_k^{(F, \bar{F})}$ 分别是 $\underline{C}, \underline{C}_i^{(F, \bar{F})}, \underline{C}_j^{(F, \bar{F})}, \underline{C}_k^{(F, \bar{F})}$ 的色彩属性集, 若

$$\alpha \setminus \alpha_i^{(F, \bar{F})} = \alpha \setminus \alpha_j^{(F, \bar{F})} = \alpha \setminus \alpha_k^{(F, \bar{F})} \quad (19)$$

$$\alpha_i^{(F, \bar{F})} \setminus \alpha \subseteq \alpha_j^{(F, \bar{F})} \setminus \alpha \subseteq \alpha_k^{(F, \bar{F})} \setminus \alpha \quad (20)$$

$$\text{则 } \rho(\underline{C}_i^{(F, \bar{F})}) \leq \rho(\underline{C}_j^{(F, \bar{F})}) \leq \rho(\underline{C}_k^{(F, \bar{F})}) \quad (21)$$

式中, $\alpha^{(F, \bar{F})} = \alpha \cup \alpha^F - \alpha^{\bar{F}}$

$$\alpha^F = \{\alpha'_j | \beta_j \in V, \beta_j \in \alpha, f(\beta_j) = \alpha'_j \in \alpha\}$$

$$\alpha^{\bar{F}} = \{\alpha_i | \alpha_i \in \alpha, \bar{f}(\alpha_i) = \beta_j \in \alpha\}$$

$$f \in F, \bar{f} \in \bar{F}$$

性质2 设 $\alpha, \alpha_i^{(F, \bar{F})}, \alpha_j^{(F, \bar{F})}, \alpha_k^{(F, \bar{F})}$ 分别是 $\underline{C}, \underline{C}_i^{(F, \bar{F})}, \underline{C}_j^{(F, \bar{F})}, \underline{C}_k^{(F, \bar{F})}$ 的色彩属性集, 若

$$\alpha \setminus \alpha_i^{(F, \bar{F})} \subseteq \alpha \setminus \alpha_j^{(F, \bar{F})} \subseteq \alpha \setminus \alpha_k^{(F, \bar{F})} \quad (22)$$

$$\alpha_i^{(F, \bar{F})} \setminus \alpha = \alpha_j^{(F, \bar{F})} \setminus \alpha = \alpha_k^{(F, \bar{F})} \setminus \alpha \quad (23)$$

$$\rho(\underline{C}_i^{(F, \bar{F})}) \leq \rho(\underline{C}_j^{(F, \bar{F})}) \leq \rho(\underline{C}_k^{(F, \bar{F})}) \quad (24)$$

则 $\tilde{C}, \tilde{C}_i^{(F, \bar{F})}, \tilde{C}_j^{(F, \bar{F})}, \tilde{C}_k^{(F, \bar{F})}$ 相应的色彩属性集 $\tilde{\alpha}, \tilde{\alpha}_i^{(F, \bar{F})}, \tilde{\alpha}_j^{(F, \bar{F})}, \tilde{\alpha}_k^{(F, \bar{F})}$ 的 $(F, \bar{F})$ -色彩粗规律干扰度的关系讨论可以类似得到。

从以上讨论可以得到一个事实: $(F, \bar{F})$ -色彩粗规律干扰属性集迁入的逐渐增加(减少), 使得 $(F, \bar{F})$ -色彩粗规律干扰程度逐渐减弱(增强), $(F, \bar{F})$ -色彩粗规律干扰程度逐渐增大(减小); $(F, \bar{F})$ -色彩粗规律干扰度描述了 $(F, \bar{F})$ -干扰对色彩粗规律的影响程度。

如果 $\underline{C}^{(F, \bar{F})}, \tilde{C}^{(F, \bar{F})}$ 的 $(F, \bar{F})$ -色彩粗规律干扰度即 $\underline{C}^{(F, \bar{F})} = \tilde{C}^{(F, \bar{F})} = 0$, 这表明系统对 $\underline{C}, \tilde{C}$ 的 $(F, \bar{F})$ -色彩粗规律干扰趋于平衡, $\rho(\underline{C}^{(F, \bar{F})}) = \rho(\tilde{C}^{(F, \bar{F})}) = 0$, $(F, \bar{F})$ -干扰对 $\underline{C}, \tilde{C}$ 不产生影响。

2 动态色彩系统 U 的色彩生成算法

为了直观地描述以下动态色彩系统 U 的色彩生成建模过程, 以阔叶植物叶片的色彩建模和生成算法为例。

由于植物叶片所呈现的色彩是通过该植物的叶脉以营养供给的方式形成的色素表现, 因此植物叶片某点色彩的变化依赖于该点与叶片的叶根节点和主叶脉的距离。以某植物叶片的主叶脉为

x 轴,以叶根节点为坐标原点 O ,建立直角坐标系,如图 1 所示。

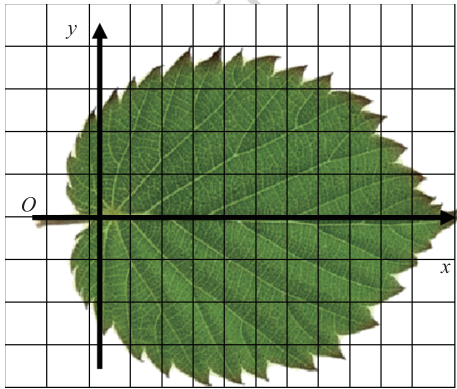


图1 叶片动态色彩系统建模示意图

Fig. 1 Dynamic system modeling leaves color schematic diagram

定义 4 设某动态色彩系统 U 具有外部色彩因素 $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m)$ 的色彩规律是 $c_\alpha(s)$,称 $g(x, y)$ 是点 $(x, y) \in U$ 的关于色彩因素 α 的色彩值(如 RGB 值),如果

$$g(x, y) = \begin{cases} c_\alpha(s) & v \geq \xi \\ c_\alpha(s) \cdot \eta/\rho & v < \xi \end{cases} \quad (25)$$

式中, $\rho = \sqrt{x^2 + y^2}$, $\eta/\rho < 1$, η 是植物的色素衰退因子, v 是该植物色素浓度, ξ 是该植物色素浓度的最大值, η, v, ξ 由具体植物品种确定。

动态色彩系统 U 的色彩生成算法步骤如下:

1) 计算动态色彩系统 U 基于外部色彩因素 $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m)$ 的离散色彩下规律

$$(s_{i1}, v_{i1}), (s_{i2}, v_{i2}), \dots, (s_{in+1}, v_{in+1})$$

2) 计算动态色彩系统 U 基于外部色彩因素 $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m)$ 的离散色彩上规律

$$(s_{i1}, \bar{v}_{i1}), (s_{i2}, \bar{v}_{i2}), \dots, (s_{in+1}, \bar{v}_{in+1})$$

3) 计算动态色彩系统 U 基于外部色彩因素

$$(s_{i1}, v_{i1}), (s_{i2}, v_{i2}), \dots, (s_{in+1}, v_{in+1})$$

$\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m)$ 的离散色彩规律

$$v_{ij} = (v_{ij} + \bar{v}_{ij})/2, j = 1, 2, \dots, n, n+1$$

4) 利用 $(F, \bar{F})$ -色彩粗规律生成式(1)模型计算

$$c_{\alpha_i}(s) = k_i e^{\frac{-(x-a_i)^2}{2b_i^2}}$$

5) 利用式(12)计算色彩因素 α 的色彩规律

其中 λ_i 是 α_i 在色彩因素 $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m)$ 中的色素比例影响因子。

6) 利用定义 4 点的 $(x, y) \in U$ 关于色彩因素 α

的色彩值(如 RGB 值)

$$g(x, y) = \begin{cases} c_\alpha(s) & v \geq \xi \\ c_\alpha(s) \cdot \eta/\rho & v < \xi \end{cases}$$

3 植物叶片色彩推理仿真系统设计

假设植物叶片符合 $(F, \bar{F})$ -色彩粗规律分布规律如图 2 所示,叶片上色带区域呈近似圆形分布,为计算方便,按圆公式计算,其误差可忽略不计。

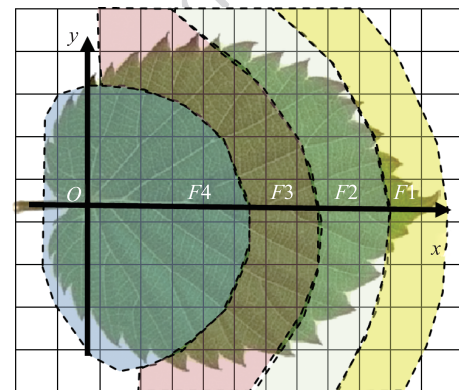


图2 $(F, \bar{F})$ -色彩粗规律分布示意图

Fig. 2 $(F, \bar{F})$ -Color rough law distribution diagram

图 2 中将叶片分为 4 个圆 $(F, \bar{F})$ -规律色带以 $F1-F4$ 表示,以原点 O 为中心,叶片上方格距离原点越近湿度越高,每个色带上的外边线代表 $\bar{C}_R(X)$ 是 X 上关于 R 的一个色彩上规律集,内边线 $\underline{C}_R(X)$ 是 X 上关于 R 的一个色彩下规律集。

根据定义 1,可表达为 $(\underline{C}_R(X), \bar{C}_R(X))$ 色彩规律集,表示了色彩规律边界

$$C_{\text{Bound}R}(X) = \bar{C}_R(X) - \underline{C}_R(X)$$

当动态色彩系统 U 的外部色彩因素 α_i 被扰动时, $v_{ij} = \alpha_i(s_j)$ 在状态 s_j 下所对应的 RGB 色彩值 $i, j = 1, 2, \dots, n+1$, 序列 $(s_{i1}, v_{i1}), (s_{i2}, v_{i2}), \dots, (s_{in+1}, v_{in+1})$ 构成 α_i 的离散色彩规律。

3.1 植物叶片色彩智能推理仿真实验

本实验以常见的 4 种阔叶植物为例,实验中只考虑光照度、湿度和温度 3 个因素,将实验植物的叶片分为有限个小方块。由于自然环境外部因素的变化,其对应的叶片表面的色彩也相应地发生变化,通过模拟植物叶片随着外部因素变化时,叶片色彩的变化规律,从而实现基于自然环境下的智能色彩推理仿真(如图 3 所示)。为了计算简便,在本实验中

对外部因素的影响数值进行规范化处理,控制在 $[0, 1]$ 之间,在自然环境中,由于叶片的温度色彩因子、光照度色彩因子、湿度色彩因子时常受到外部环境的干扰,使得其相对应的表面形成离散色彩规律族,其对应的 RGB 值略。利用动态色彩系统 U 的色彩生成算法步骤 1) — 4) 分别得到温度、光照度、湿度等因素所对应的色彩规律族(图 4—图 6),最后利用算法步骤 5) 6) 得到其相对应的叶片表面的色彩规律(图 7)。

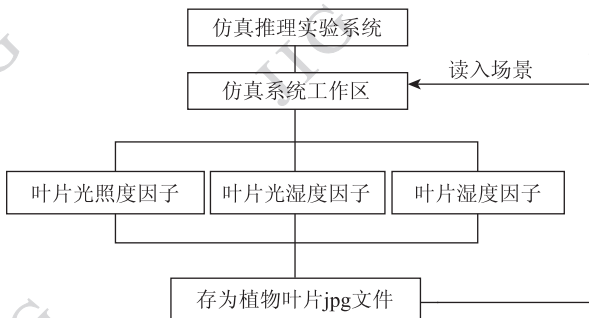


图 3 叶片仿真实验系统示意图

Fig. 3 Leaves simulation system diagram

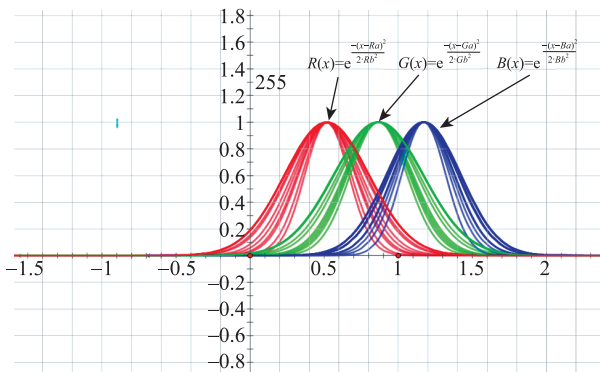


图 4 植物叶片在温度变化中的色彩仿真图

Fig. 4 Leaf color changes in temperature

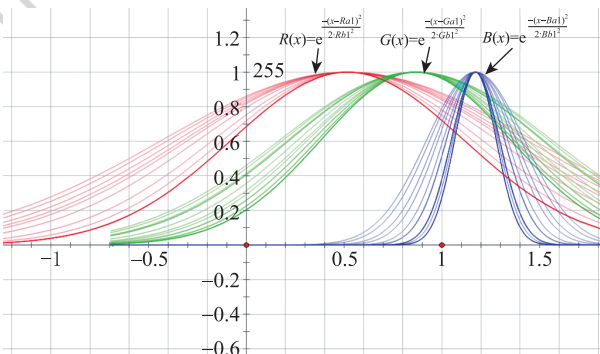


图 5 植物叶片在光照变化中的色彩仿真图

Fig. 5 Leaf color changes in the light

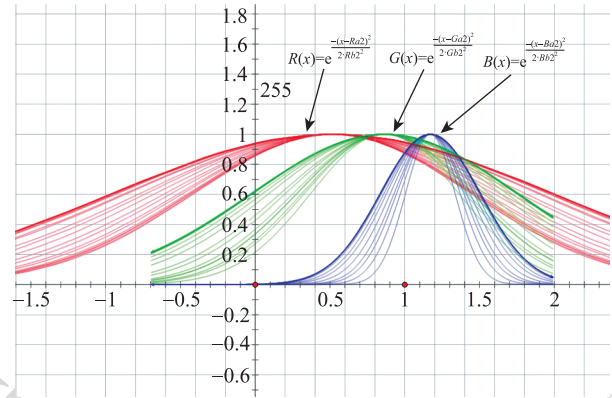


图 6 植物叶片在湿度变化中的色彩仿真图

Fig. 6 Simulation of leaf color change in humidity

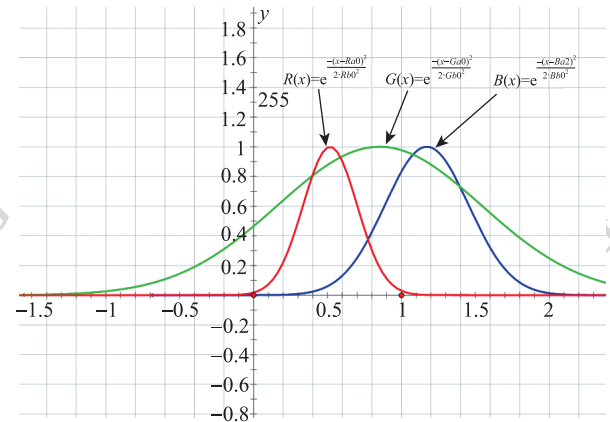


图 7 植物叶片在温度、光照、湿度变化

对应的叶片表面的色彩规律仿真图

Fig. 7 Leaf color rule in temperature, light, humidity changes corresponding blade surface

3.2 叶片仿真实验效果

根据实际的观察,在通常情况下,自然环境中的叶片从旺盛到枯萎通常遵循从距离叶片根部最近的边缘开始枯萎,逐步向叶片的中心和尾部扩散, $(F, \bar{F})$ -色彩粗规律将叶片分为 4 个带状区域,使叶片的变化规律符合其自然变化规律。

本文模拟在综合因素的作用下,选取 4 种树叶进行实验,如图 8 所示,叶片从原始状态开始,叶片从根部的翠绿到中部褐黄色至叶顶端枯萎,代表叶片伴随外部因素的变化而改变的过程,同时,叶片可根据所给定的光照度、湿度或温度数值参数调整树叶的效果,从而实现本文研究目标,表 1 为叶片实验色域数据表。

图 9、图 10 的实验结果与图 11 真实树叶进行对照,结果基本一致,目前的算法中尚未对色彩的不

均匀性进行设计,待下一步对树丛研究时将色彩的随机分布函数纳入研究范畴可获得预期效果。

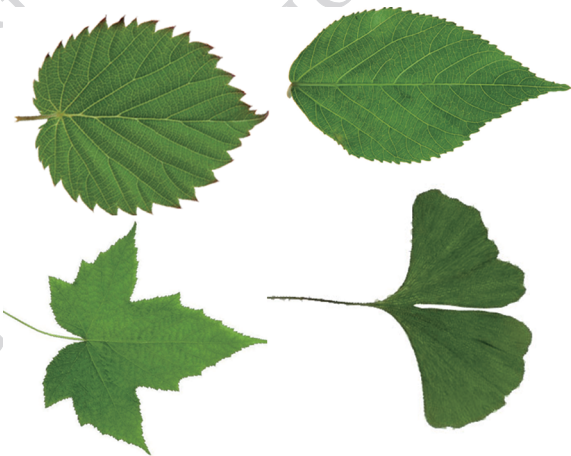


图 8 树叶原始状态
Fig. 8 Original leaves

表 1 叶片实验色域数据表
(色域数值控制明度及饱和度不变)

Table 1 Leaves testing data
(the volume of lightness and saturation as constant)

叶片实验	控制范围/%	叶片 1 叶片 2 叶片 3	叶片 4	备注
光照度	0 ~ 100	# 4c7f1b— # 9afb3d	# 4c7f1b— # 9afb3d	控制叶片 绿色范围
湿度/%	100 ~ 0	# ffb4d6— # c28f32	# ffb4d6— # e7aa3c	控制叶片 黄色范围
温度/℃	0 ~ 100	#fa6d42— #c11511	杏叶衰竭时 呈黄色系	控制叶片 红色范围

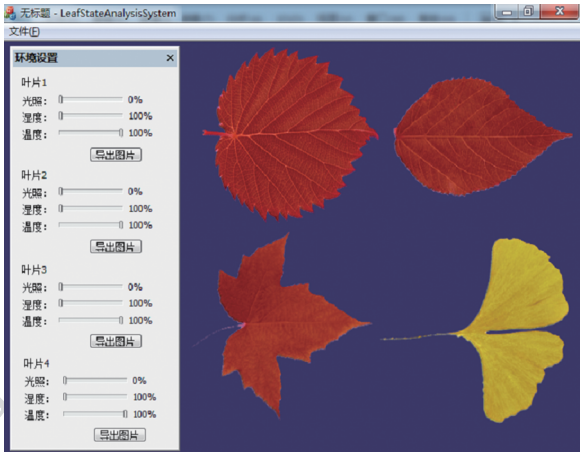


图 10 当温度为 0℃ 湿度为 100% 时的实验结果
Fig. 10 The experimental results when the temperature is 0℃ and humidity of 100%



图 11 真实树叶图片
Fig. 11 True leaf images

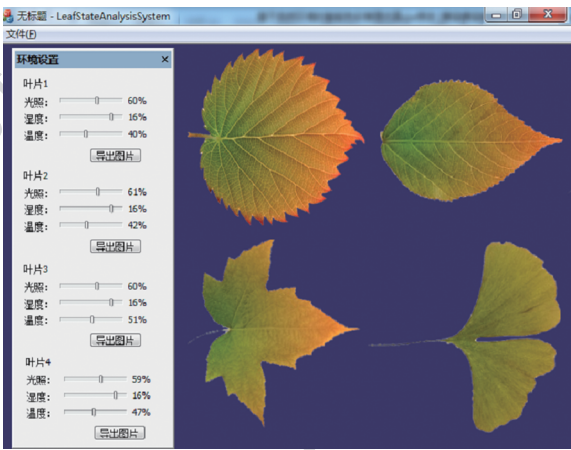


图 9 叶片参数变化时的实验结果
Fig. 9 Experimental results when parameters change leaves

4 结 论

本文提出了基于函数双向 S-粗集的植物叶片动态色彩系统理论。通过仿真系统实验证明了当在外部因素变化时,阔叶植物叶片色彩的变化基本符合自然环境中植物叶片的基本规律。如果将本研究成果用于大场景仿真,当场景中的自然条件发生变化时,树丛或植被的叶片也将随之发生自主的变化,使大场景仿真的效果更加符合自然规律。

由于目前的算法只针对叶片的算法原理进行仿真,本算法尚有不完善的地方:1)尚未就算法的时间和空间复杂度进行分析;2)叶片尚未能仿真出不

均匀的斑点现象等,待后续研究树丛仿真时,将随机函数纳入研究范畴可获得预期效果。本文关于光照度、温度和湿度的算子,为计算简便,本文采用正态分布的计算方法,如将其用于大场景的仿真,也可采用更简捷方法,待后续研究进一步讨论。

参考文献 (References)

- [1] Tian Y, Zhao C J, Lu S L, et al. Advances in appearance modeling and photorealistic rendering of plant leaves[J]. Journal of Image and Graphics, 2012, 17(5): 613-620. [田原, 赵春江, 陆声链, 等. 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.] [DOI: 10.11834/jig.20120502]
- [2] Desbenoit B, Galin E, Akkouch S, et al. Modeling autumn scenarios [C]//Proceedings of the Eurographics. Vienna, Austria: Eurographics Association, 2006:107-110.
- [3] 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.]
- [4] Yang K F. The visualization of aging process of leaves combined with environmental factors[D]. College of Computer Science and Technology of Zhejiang University of Technology, 2010:20-27. [杨科峰. 融合环境影响因子的树叶渐衰可视化[D]. 杭州: 浙江大学计算机科学与技术学院, 2010:20-27.]
- [5] Tang Y, Wu D Y, Fan J. Computational approach to seasonal changes of living leaves [J]. Computational and Mathematical Methods in Medicine, 2013: 1-8. [DOI: 10.1155/2013/619385.]
- [6] Wang L F, Wang W, Dorsey J, et al. Real-time rendering of plant leaves [C]// ACM SIGGRAPH 2006 Courses. Boston, USA: ACM, 2006:712-719.
- [7] Bao G B, Li H J, Zhang X P, et al. Large-scale forest rendering: Real-time, realistic, and progressive [J]. Computers & Graphics, 2012, (36):140-151.
- [8] Weier M, Hinkenjann A, Demme G, et al. Generating and rendering large scale tiled plant populations [J]. Journal of Virtual Reality and Broadcasting, 2013, 10(1):53-58.
- [9] Li H Q, Liu S J. Effects of light intensity and illumination time on leaf colour variations of coloured leaf trees [J]. Bulletin of Botanical Research, 1988, 18(2):194-208. [李红秋, 刘石军. 光强度和光照时间对色叶树叶色变化的影响[J]. 植物研究, 1998, 18(2):194-208.]
- [10] Sul J H. Effects of different leaves of nitrogen application on change in leaf-variegation of Lonicera japonica var. Aureo-reticulata under varied light intensity [J]. Journal of the Korean Society for Horticultural Science, 1990, 31(4):444-448.
- [11] Liu Z X, Hong Y H, Mu A H, et al. Advance in molecular genetics and genetic engineering of ornamental plant flower color [J]. Journal of Hunan Agricultural University: Natural Sciences, 2002, 28(6): 531-534. [刘志祥, 洪亚辉, 莫爱华, 等. 观赏植物花色分子遗传学及基因工程进展 [J]. 湖南农业大学学报:自然科学版, 2002, 28(6): 531-534.]
- [12] Shi K Q, Yao B X. Function S-rough sets and Laws Ming in System [M]. Beijing: Science in China Press, 2007:125-130. [史开泉, 姚炳学. 函数 S-粗糙集与系统规律挖掘 [M]. 北京: 科学出版社, 2007:125-130.]
- [13] Shi K Q, Yao B X. Function S-rough sets and law identification [J]. Science in China Series E: Information Sciences, 2008, 38(4):1-12.
- [14] Shi K Q, Xia J R. Function S-rough sets and mining-discovery of rough laws in system [J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2006, (4): 919-926.
- [15] Shi K Q. Function S-rough sets and its characteristics [J]. International Journal of Fuzzy Mathematics, 2007, (1): 25-31.
- [16] Shi K Q, Zhao J L. Function S-rough sets and security authentication of hiding law [J]. Science in China Series F: Information Sciences, 2008, 51(5):924-935.
- [17] Qiu J M, Shi K Q. F-rough law and the discovery of rough law [J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2009, (1): 81-89.
- [18] Qiu J M, Shi K Q. F-interfere law generation and its feature recognition [J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2009, (4): 777-783.