

# 一种应用 GA 的墨扩散效果仿真新方法

唐 棣 臧 超

(辽宁师范大学计算机与信息技术学院, 大连 116029)

**摘 要** 对中国水墨画进行仿真研究是非照片真实感绘制领域的一个具有挑战性的课题。通过分析中国水墨画作画工具特性及水墨笔迹扩散的机制,提出一种基于遗传算法的水墨画墨扩散仿真方法,用以实现墨扩散艺术效果。该方法借鉴种群个体,二进制编码,基因变异等遗传算法基本概念,完成输入笔迹仿真模型的构建,并提出多级明考夫斯基距离-变异率映射表,使得种群个体自适应产生基因变异率,从而自动完成笔迹的墨扩散模拟。而且归纳出群体规模,纸元纤维门限等模型控制参数,通过参数的任意设定,用户可以得到丰富多样的扩散效果;为了增强扩散效果的真实感,从宣纸的物理特性进行分析建模,利用 Ashikhmin 纹理合成算法和高斯分布函数分别模拟了宣纸的宏观结构纹理和微观纤维随机特性,并应用霓虹处理和图像分割等方法将两种特性整合统一,得到了更加逼真的仿真结果。实验结果表明,该方法较成功地模拟了中国水墨画的典型效果。

**关键词** 非照片真实感绘制 水墨扩散 遗传算法 宣纸 纹理合成

中图法分类号: TP391.9 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2009)03-0537-06

## New Simulation Method for Chinese Ink Wash Drawing by GA

TANG Di, ZANG Chao

(School of Computer and Information Technology, Liaoning Normal University, Dalian 116029)

**Abstract** One of the most challenging work in non-photorealistic rendering research field is to studies of the simulation of Chinese ink wash drawing. By analyzing the Chinese ink wash drawing material and ink-wash diffusion mechanism, a new method based on genetic algorithm is presented to model the diffusion effect. The method first simulates the diffusion effect by binary gene encoding, initializing population and gene mutation. It constructs a list of mapping that describes the correspondence of Minkowski distance to the rate of gene mutation so that gene mutation can happen suitably by itself. As a result, modeling the diffusion of Chinese ink wash drawing can be finished automatically. All kinds of ink wash diffusion effects can be realized by some parameters, such as the scale of population, paper cell fiber threshold and so on; Furthermore, to improve the diffusion effect made by the simulation system above, the model uses Ashikhmin algorithm and Gaussian Distribution to simulate the characteristic of xuan-paper to make the diffusion effect with more fidelity. Experimental results demonstrate that this method simulates the typical effects of Chinese ink wash drawing successfully.

**Keywords** non-photorealistic rendering, diffusion effect, genetic algorithm, xuan-paper, texture synthesis

## 1 引 言

水墨画(如图1)是中国的一种传统艺术形式。随着非真实感绘制技术(NPR)的飞速发展,中国水

墨艺术的仿真也取得了长足的进步。水墨艺术的仿真主要涉及以下内容:水墨扩散的模拟,墨扩散边缘的生成,实时绘制技术等等,其中墨扩散效果的仿真具有重要的基础性地位。

水彩画等国外画种的仿真早于水墨画,并且其

基金项目:国家自然科学基金项目(20633050)

收稿日期:2007-11-29;改回日期:2008-04-25

第一作者简介:唐 棣(1960~),女,教授,1982年于吉林大学获计算机科学与技术专业学士学位。主要研究方向为计算机图形学、水墨画仿真。E-mail:tangdi@lnu.edu.cn

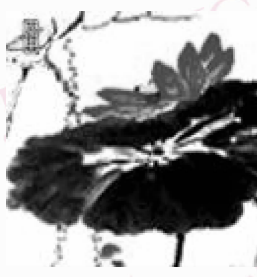


图 1 一幅中国水墨画

Fig. 1 A Chinese ink wash drawing

颜料的扩散与墨扩散具有相似性,因此,其工作成果具有借鉴意义。Small<sup>[1]</sup>率先将元胞自动机理论应用于水彩画的模拟中。Guo 和 Kuiu<sup>[2]</sup>考虑纤维的吸水性能造成扩散,构造纸模型模拟了颜料扩散效果。Cassidy 等<sup>[3]</sup>提出了三层浅水模型使水彩扩散仿真取得了不错的视觉效果。同时,墨扩散的仿真也取得了一些成果,Chu 和 Tai<sup>[4]</sup>构建了实时的墨扩散仿真系统,Huang 等<sup>[5]</sup>建立了基于物理的纸模型以模拟水墨扩散过程, Lee<sup>[6]</sup>将纸张分成纸元,以样条表示的纤维提供墨扩散路径,很好地模拟了墨扩散效果。陈锋等<sup>[7]</sup>改进并移植自动机概念到墨扩散模型上,石永鑫等<sup>[8]</sup>将粒子系统引入到墨扩散仿真中,张海江等<sup>[9]</sup>应用分形改进了墨扩散轮廓。但上述模型却有几个缺陷:第一,模拟墨粒子的运动行为时,效果可控性不高。第二,没有对博大精深的中国宣纸纹理进行深入研究,建立的纸张纹理缺乏扩展性。

通过分析中国水墨画绘画材料墨与纸的特性及相互影响的机制,提出一种基于遗传算法<sup>[10]</sup>(GA)的墨扩散仿真方法,提高了水墨扩散效果的可控性。借鉴遗传算法基本概念,视笔迹为 GA 种群个体,对原始笔迹进行初始种群产生,二进制编码,基因变异等遗传操作,初步完成了笔迹扩散的仿真。为了更好地模拟宣纸纹理,使用 Ashikhmin 算法合成宣纸结构纹理,使用霓虹处理和 K-means 图像分割等方法提取结构纹理特征。并且离散化宣纸为纸元,利用高斯分布函数对纸元的微观纤维随机性进行了模拟,增强了墨扩散的真实感。

## 2 基于 GA 的墨扩散仿真

### 2.1 墨扩散仿真模型的建立

根据大量绘画经验,认为一幅水墨画是笔迹在

有限纸张上的有序分布,笔迹边缘由于存在浓度差发生墨扩散运动,并且称边缘部分的笔迹为扩散笔迹。通过观察发现,墨扩散这种扩散笔迹由内向外,由浓到淡,不断产生新笔迹的层层润湿现象,与 GA 中种群个体由少到多,适应环境,不断繁殖新个体的代代繁衍活动具有相似性。因此,利用 GA 种群个体对扩散笔迹进行建模,通过个体的活动模拟墨扩散运动。视原始笔迹为 GA 初始种群  $I$ 。对  $I$  轮廓提取得到扩散笔迹,令其为 GA 种群扩散个体  $DiffI$ ,如式(1)所示。

$$DiffI = \{ DiffI(i, j) | 0 \leq i < M, 0 \leq j < N, \\ DiffI(i, j) \in [0, 255] \} \quad (1)$$

另外,笔迹最主要的特征为颜色信息,是一种低层特征。GA 并不能直接对这种低层特征施加操作,只能处理种群个体的高层特征,即 GA 种群个体的基因。因此,必须通过基因编码的方式来完成从低层到高层的特征转换。本文采用基于  $\{0, 1\}$  符号集的二进制基因编码形式。设  $Gene_{DiffI}$  为  $DiffI$  的 GA 基因值。其表达方式如式(2)。

$$Gene_{DiffI} = \{ s_0, s_1, \dots, s_i, \dots, s_j, s_i \in \{0, 1\} \} \quad (2)$$

### 2.2 基于 GA 的墨扩散仿真过程

墨扩散过程,即扩散笔迹由内向外不断润湿产生新笔迹,新笔迹又向外不断扩散的运动。本文通过 GA 种群个体的基因变异产生新基因型个体的繁殖对上述运动加以模拟。如图 2 所示,  $I(x, y)$  为 GA 种群扩散个体  $DiffI$ ,灰色  $K \times K$  邻域为其扩散区域。

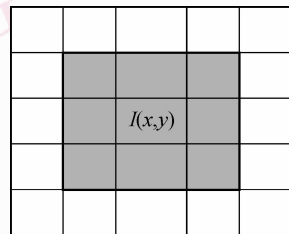


图 2 扩散区域

Fig. 2 The field of diffusion

墨扩散运动主要有 3 个特点:由内向外,由浓到淡,层层扩散。由内到外的特点,即  $DiffI$  仅在其扩散区域中扩散,产生的新个体也在其  $K \times K$  邻域中。令  $NewI$  为扩散区域中可能产生的新个体,即新笔迹,其产生方式如式(3)。其中  $x$  和  $y$  为与扩散个体  $DiffI$  对应的笔迹像素坐标。由浓到淡的特点,即  $DiffI$  只扩散更新其扩散区域中墨浓度低于自身的个体,表现为只有存在浓度差的笔迹位置才会发生

墨扩散。层层扩散特点,即新产生的个体是下次扩散时的扩散个体,也就是在下次洒湿过程中,新产生的笔迹继续扩散。令  $DiffI'$  为下层扩散的扩散个体,则  $DiffI' = NewI$ 。

$$NewI = \left\{ \begin{aligned} &NewI(i, j) \mid x - \frac{K-1}{2} \leq i \leq x + \frac{K-1}{2}, \\ &y - \frac{K-1}{2} \leq j \leq y + \frac{K-1}{2}, \\ &NewI(i, j) \in [0, 255] \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

墨扩散的过程,就是扩散笔迹在满足上述扩散特点的区域产生新笔迹的活动,即  $DiffI$  在其邻域中按照一定的 GA 变异率  $pm$  执行基因变异产生具有新基因的  $NewI$  的过程。由于墨扩散自身特点,变异率  $pm$  为  $DiffI$  基因置 1 的位数。其表达方式如式(4)。本文取  $pm = 8$ ,则  $DiffI$  的基因表示如式(5)所示。

$$pm = \{pm \mid pm \in \{1, \dots, n\}\} \quad (4)$$

$$Gene_{DiffI} = \{s_0, s_1, s_2, s_3, s_4, s_5, s_6, s_7\} \quad (5)$$

本文系统中,变异率  $pm$  根据  $DiffI$  和  $NewI$  明考夫斯基距离度量,设  $d$  代表距离, $i$  和  $j$  代表对象序号, $q$  为某一正整数。其间距离  $d_{ij}(q)$  定义为:

$$d_{ij}(q) = \left( \sum_{k=1}^n |X_{ik} - X_{jk}|^q \right)^{1/q} \quad (6)$$

通过建立多级明考夫斯基距离-变异率映射表,在扩散仿真过程中,扩散笔迹可以在每次扩散活动中自适应地计算出适当的变异率  $pm$ ,动态地完成基

因变异。表 1 为八级明考夫斯基距离-变异率映射表。

表 1 八级映射表

Tab. 1 List of mapping

明考夫斯基距离	变异率	明考夫斯基距离	变异率
0 ~ 31	1	128 ~ 159	5
32 ~ 63	2	160 ~ 191	6
64 ~ 95	3	192 ~ 223	7
96 ~ 127	4	224 ~ 255	8

### 2.3 仿真结果

在真实的墨扩散过程中,各种各样因素干扰使效果极其复杂,因此必须根据实际情况抽象出一些主要控制参数,用以表现不同情况下的扩散情况。这些参数通过控制笔迹个体的运动范围等属性来实现最终效果。下面介绍主要参数及作用,并用同一原始笔迹来说明,对比效果。

#### 2.3.1 群体规模 GM

水墨笔迹在宣纸上的扩散有一定的范围,即墨扩散的范围。在仿真模型中用群体规模  $GM$  来控制种群扩散个体  $DiffI$  的活动区域,从而对墨扩散范围加以表征。在墨扩散的仿真过程中,当需要发生二进制基因变异的种群个体  $DiffI'$  数目超过  $GM$  时,认为达到种群饱和平衡,墨扩散运动停止。具体效果如图 3 所示。



图 3 群体规模不同的输入笔迹仿真

Fig. 3 The simulation results of different GM

#### 2.3.2 纸元纤维门限 CT

在水墨画作品中,笔迹边缘扩散的细腻程度主要由纸张所含纤维毛粗程度决定。纸张毛粗程度越低,扩散边缘越细腻,相反,越粗糙。在仿真模型中,通过纸元(参见第 3.1 节)纤维门限  $CT$  来决定每次墨扩散中纸元对应的种群个体是否发生基因变异,只有纸元纤维门限  $C$  值满足  $CT$  的纸元对应的扩散笔迹  $DiffI$  才参加墨扩散,从而控制扩散边缘的细腻程度。用户通过自由的参数设定,可以得到多样的

扩散效果。具体效果如图 4 所示。

## 3 宣纸模拟

作为文房四宝之一的宣纸,是中国古代用于书写和绘画的纸,起于唐代,历代相沿,写字则骨神兼备,作画则神采飞扬,是最能体现中国艺术风格的书画用纸。对墨扩散效果的形成有着重要影响,主要分为宏观纹理和微观随机纤维两方面。



图 4 纸元纤维门限不同的输入笔迹仿真  
Fig. 4 The simulation results of different CT

### 3.1 微观纤维随机性

从微观角度看,宣纸含有丰富的纤维,不但是墨扩散的媒介,也是墨扩散随机性的诱因。本文采用 2 维网格模拟宣纸平面,视每个网格为一个基本单元,即纸元。纸元对应于输入笔迹中相应的像素点。在纸元中随机分布着方向粗细各不同的纤维,因此具有不同的吸水储水能力。纸元所含纤维越多,其吸水储水能力越强,相反,则越弱。本文将这些能力统一称为纸元微观纤维随机性  $C$ ,其表达方式如式(7)。

$$C = \{ C(i,j) | 0 \leq i < M, 0 \leq j < N, C(i,j) \in [0.0, 1.0] \} \quad (7)$$

由于真实世界中的绝大多数随机事件都服从高斯分布

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}} \quad (8)$$

因此本文通过高斯分布随机数来表征微观纤维随机性  $C$ 。令数学期望  $m = 0$ ,均方差  $\sigma = 0.399$ ,横轴为  $x$ ,取  $x \in \{0.0, 1.0\}$ 。如图 5 所示。

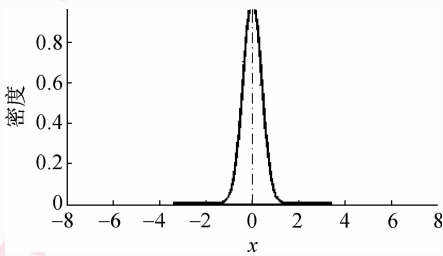


图 5 高斯分布  
Fig. 5 Gaussian Distribution

微观纤维随机性  $C$  对扩散效果的随机性有着重要影响。本文提出纸元纤维门限 CT,用以表征微观纤维随机性  $C$  对笔迹的具体影响作用。

### 3.2 宏观结构纹理

宣纸的纹理对扩散效果的形成有着重要影响,不同的宣纸可能形成不同特色的笔墨神韵。宣纸有

背景纹理和结构纹理,前者可以通过简单的图像融合实现,在此不做讨论。宣纸按结构纹理分为水波纹宣,青丝宣,槟榔宣等若干种。结构纹理是一种自然纹理,一般的数学函数和纹理合成算法模拟效果不够理想。Ashikhmin<sup>[11]</sup>注意到自然纹理结构单元较小并且近似,纹理大小不规则等特性,提出一个以像素为基本单位的自然纹理合成算法,可以实现多种自然纹理合成。其主要思想包括两部分:相似性度量和邻域搜索问题。两个 L 形邻域  $N_1$  和  $N_2$  的相似性度量公式为

$$D(N_1, N_2) = \{ (R_1(p) - R_2(p))^2 + (G_1(p) - G_2(p))^2 + (B_1(p) - B_2(p))^2 \} \quad (9)$$

式中, $R, G, B$  为像素的红绿蓝特征分量。邻域搜索算法基于相关性原理,根据两像素的 L 形邻域的相似度完成对样本图像中候选像素的取舍,如图 6 所示。本文采用 Ashikhmin 算法合成了多种宣纸纹理。如图 7 所示。

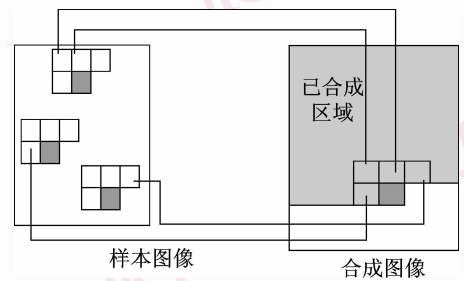


图 6 L 形邻域和搜索示意图  
Fig. 6 L-shaped neighborhood and searching candidate pixels

### 3.3 仿真宣纸对扩散效果的影响

宣纸的微观和宏观特征对墨扩散效果有很大的影响。为了将两种特征整合统一,首先对纹理图片进行霓虹预处理获得纹理线条,其次对结果应用 K-means 聚类图像分割算法提取纹理特征,最后将结果作为扰动信息加入到微观纤维随机性  $C$  中。

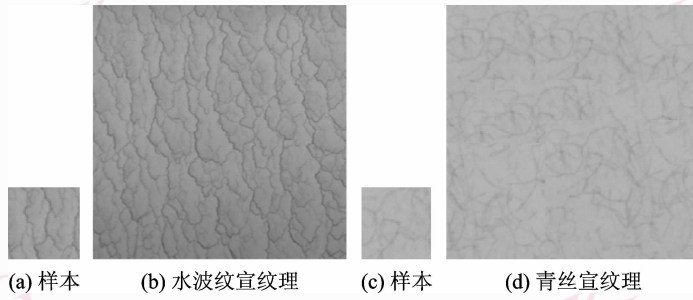


图7 合成宣纸纹理

Fig. 7 The synthesized textures of xuan-paper

### 3.3.1 霓红预处理

霓红处理是对图片应用梯度处理获得图像线条结构的过程。首先,根据式(10)计算像素的  $R, G, B$  三分量与同行同列像素的梯度,再把梯度值作为处理结果的红绿蓝三分量。如图 8(a)所示。

$$\begin{aligned}
 R &= 2 \sqrt{(R_{I_1} - R_{I_2})^2 + (R_{I_1} - R_{I_3})^2} \\
 G &= 2 \sqrt{(G_{I_1} - G_{I_2})^2 + (G_{I_1} - G_{I_3})^2} \\
 B &= 2 \sqrt{(B_{I_1} - B_{I_2})^2 + (B_{I_1} - B_{I_3})^2} \quad (10)
 \end{aligned}$$

式中,  $I_1$  为原像素,  $I_2$  和  $I_3$  分别为其同行同列相邻像素。  $R, G, B$  为各像素红绿蓝分量。再对霓红处理结果进行反相操作,就得到了宣纸纹理线条。如图 8(b)所示。

### 3.3.2 纹理特征提取与纹理混合

为了得到结构纹理,需要对预处理结果进行

K-means聚类图像分割算法提取结构纹理特征,结果如图 8(c)所示。令宣纸结构纹理为  $T$ ,视其为随机扰动混合加入微观纤维随机性  $C$  里,称此过程为纹理混合,如下式。

$$C = \begin{cases} C & T = 0 \\ \alpha C + \beta T & T = 1 \end{cases} \quad (11)$$

式中,  $\alpha, \beta$  为比例因子,可手动设定也可以动态更新,且  $\alpha + \beta = 1$ 。不使用与使用宣纸模型(水波纹宣纸纹理)前后的效果对比如图 9 所示。

## 4 结 论

提出了一种基于遗传算法的水墨画仿真方法,通过 GA 个体的遗传活动模拟笔迹的扩散,以实现

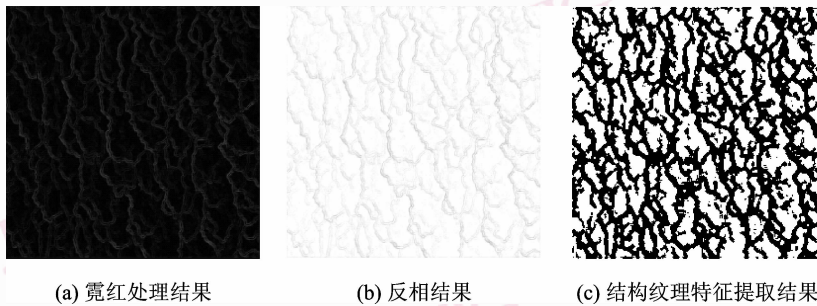


图8 特征提取过程(水波纹宣纸)

Fig. 8 The process of feature extraction



图9 有无宣纸的输入笔迹仿真

Fig. 9 The effect of paper model

中国水墨画的典型效果。从对同一输入笔迹的实验结果(图 3,4 和 9)可以看出,通过合理调整 GA 参数,可以控制得到丰富多样的扩散效果,大大提高了仿真结果的可控性。并且从宏观和微观两个角度对宣纸进行了深入的研究和模拟,合成并提取了宣纸宏观结构纹理,使用高斯分布随机数模拟了微观纤维随机性对扩散的影响,提高了扩散的真实感。从结果来看,本文方法比较真实地模拟了水墨画的扩散效果。图 10 所示为本文方法创作而成的一幅完整作品(首先用 NPR 绘画工具<sup>[12]</sup>绘制出景物的主体笔迹,然后应用本文方法生成墨扩散效果)。



图 10 一幅完整作品

Fig. 10 An integrated drawing

### 参考文献 (References)

- Small David. Modeling watercolor by simulating diffusion, pigment and paper fibers [A]. In: Proceedings of SPIE on Image Handling and Reproduction System Integration [C], Bellingham, Washington, USA, 1991, **1460**:140-146.
- Guo Q L, Kunii T L. Modeling the diffuse painting of "sumi-e" [A]. In: Kunii T Ed., Modeling in Computer Graphics [C], Berlin, Germany: Springer Press, 1991: 329-338.
- Cassidy J Curtis, Sean E Anderson. Computer-generated watercolor [A]. In: Proceedings of the 24th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques [C], Los Angeles, USA, 1997: 421-430.
- Chu N S H, Tai C L. MoXi: real-time ink dispersion in absorbent paper [A]. In: Proceedings of the 32th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques [C], Los Angeles, USA, 2005: 504-511.
- Huang S W, Way D L, Shih Z C. Physical-based model of ink diffusion in Chinese ink paintings [A]. In: Proceedings of the International Conference in Central Europe on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision [C], Plzen, Czech, 2003, **10**(3): 520-527.
- Lee J. Diffusion rendering of black ink painting using new paper and ink models [J]. Computers and Graphics (S0097-8493), 2001, **25**(2): 285-308.
- Chen Feng, Zhang Wen-jun, Yu Ying. An improved cellular automata model for simulation of ink-wash diffusion effect [J]. Journal of Image and Graphics, 2007, **12**(4): 740-745. [陈锋, 张文俊, 余颖. 仿真水墨扩散效果的元胞自动机改进模型 [J]. 中国图象图形学报, 2007, **12**(4) 740-745.]
- Shi Yong-xin, Sun Ji-zhou, Zhang Hai-jiang, et al. Graphical simulation algorithm for Chinese ink wash drawing by particle system [J]. Journal of Computer-Aided Design and Computer Graphics, 2003, **15**(6): 667-672. [石永鑫, 孙济洲, 张海江等. 基于粒子系统的中国水墨画仿真算法 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2003, **15**(6): 667-672.]
- Zhang Hai-jiang, Wang Xiu-jin, Sun Ji-zhou, et al. Fractal-based simulation of the diffusion effect of Chinese ink wash drawing [J]. Journal of Computer-Aided Design and Computer Graphics, 2004, **16**(4): 555-558. [张海江, 王秀锦, 孙济洲等. 应用分形仿真水墨扩散轮廓 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2004, **16**(4): 555-558.]
- Holland J H. Adaptation in Natural and Artificial Systems [M]. Ann Arbor, MI, USA: University of Michigan Press, 1975: 1-22.
- Michael Ashikhmin. Synthesizing natural textures [A]. In: 2001 ACM Symposium on Interactive 3D Graphics [C], Los Angeles: ACM Press, 2001, 217-226.
- Informatrix. Piranesi system. Piranesi 4. 0.