

用自回归(AR)和分层采样生成草书笔画纹理

张俊松 于金辉 毛国红 叶修梓

(浙江大学 CAD & CG 国家重点实验室 杭州 310058)

(zhangjs@126.com)

摘要 提出一种基于自回归和分层采样的草书纹理生成方法,从草书作品中采集一些典型的笔画纹理,构建一个纹理笔画库;然后基于自回归模型生成新的草书纹理,并引入分层采样方法来控制纹理宽度;最后将生成的草书纹理映射到字上,得到满意的草书风格作品。

关键词 自回归;书法;草书;纹理;分层采样

中图分类号 TP391.41

Generating Brush Texture for Cursive Style Calligraphy with Autoregressive and Stratified Sampling

Zhang Junsong Yu Jinhui Mao Guohong Ye Xiuzi

(State Key Laboratory of CAD & CG, Zhejiang University, Hangzhou 310058)

Abstract To generate cursive style calligraphy, we first collect a number of typical brush texture patches (BTP) to build a BTP library from the masterpiece of great calligraphers. Then new BTP is generated from the BTP library based on the autoregressive model. We also proposed a control mechanism for the width of BTP through stratified sampling method. The results demonstrate that satisfactory calligraphy works can be produced by our method.

Key words autoregressive model; calligraphy; cursive style; brush texture; stratified sampling

书法是汉字的书写艺术,是我国传统艺术的瑰宝,它以笔、墨、纸、砚为创作工具,以丰富的线条为表现手段。在汉字的发展演变过程中,为了方便人们书写,出现了诸多字体,其中草书形成于汉初,是为书写便捷而产生的一种书体,它的笔画连绵、流动而畅达。草书用墨上讲究“燥、润、浓、淡”的对立与和谐,书法家通过水与墨比例的变化和控制笔的速度,使作品呈现燥润和浓淡相间变化的墨韵之美。因而从视觉效果来看,草书的点画纹理有丰富的变化,这给草书纹理的计算机模拟带来了挑战。

我们提出的实时合成草书的系统^[1]只能根据有限的几条纹理生成草书风格的作品,没有就纹理建模进行深入探讨,本文是对这一问题的进一步研究。

近年来,很多研究者对书法的计算机模拟进行

了研究,他们的工作主要集中在对书法创作工具的计算机建模,包括虚拟毛笔模型的研究和墨在宣纸上扩散效果的实时绘制研究。

虚拟毛笔的研究,已经有多位研究者提出数十种虚拟毛笔模型。Strassmann^[2]首次提出一个二维笔刷模型;王征旋等^[3]开发了一个计算机书法系统,利用样条曲线插值采样的方法控制笔刷速度和墨量;于金辉等^[4]用散点集合模拟毛笔的笔触,形成不同的笔触效果;Lee^[5]为了表现书写绘画过程中毛笔的运动和笔毫的形变,构造了一个三维毛笔模型;Wong等^[6]以椭圆作为笔触模型,模拟了不同笔触效果;Xu等^[7]提出了一种基于CAD实体造型的虚拟毛笔模型;Mi等^[8]提出一个参数化的雨滴模型的虚拟毛笔模型;Chu等^[9]通过物理的信号接收

收稿日期:2007-02-05;修回日期:2007-08-16。基金项目:国家自然科学基金(60373007);国家“八六三”高技术研究发展计划(2006AA01Z312);浙江省科技计划项目(2007C21043);教育部博士点基金(20040335019)。张俊松,男,1978年生,博士研究生,主要研究方向为非真实感图形绘制、图像处理、模式识别。于金辉,男,1960年生,博士,研究员,博士生导师,主要研究方向为计算机动画、计算机游戏、非真实感图形绘制。毛国红,女,1979年生,硕士,主要研究方向为非真实感图形绘制。叶修梓,男,1966年生,博士,教育部“长江学者奖励计划”特聘教授,博士生导师,主要研究方向为CAD&CG、图像处理。

装置动态地捕获毛笔运动信息,进行实时地绘制书写;王征等^[10]用自回归方法从笔画库中查找与用户输入匹配的笔画,生成不同风格的书法字体。

墨扩散模拟方面的研究,Guo等^[11]构造纤维网格宣纸模型,模拟了墨扩散效果;Huang等^[12]综合考虑了多种影响因素,离散模拟水墨和纸纤维之间的交互;石永鑫等^[13]以伪布朗运动模拟水墨粒子的运动状态;张海江等^[14]提出用分形的方法模拟水墨扩散轮廓效果;Chu等^[15]利用流体力学中的方法模拟水墨扩散的动态效果。

以上这些工作中,多数研究者从真实毛笔和墨扩散的形状建模及物理过程仿真的角度考虑,系统较为复杂,计算量很大,需要事先设定多个经验参数;而且在实际书法创作过程中,笔、墨与纸的交互是个极其复杂的物理过程,很难真实地模拟,目前的研究对这一物理过程都做了很大程度的简化。以上研究中,很少有研究者专门针对草书纹理建模研究。

本文不考虑复杂书法创作过程的物理建模,提出一种基于自回归的草书纹理生成方法。该方法直接从书法作品中采集一些典型的笔画纹理(以下简称样本纹理),构建一个草书纹理库。通过仔细观察这些样本纹理,从视觉效果可以发现,它们既有整体的结构性,又有局部的随机性,可以将这些样本纹理的灰度变化看作随机序列,用信号处理的理论来对其建模。本文采用自回归模型,由于该模型能根据已有数据序列产生预测数据,因此参数化后的草书纹理能通过此模型生成新的草书笔画纹理。本文还提出了通过分层采样方法改变样本纹理宽度的方法,这种方法能在保留原有纹理结构特征的同时,解决纹理图像直接缩放导致的图像失真问题。

1 草书纹理生成

在书法创作过程中,书写者铺开宣纸,将毛笔蘸上墨,然后运笔,在宣纸上留下的笔触,其实是一簇笔毫与纸交互的过程中,墨由笔毫流到纸上形成的视觉效果。本文中,我们将笔触纹理的形成过程看作是这一簇笔毫在宣纸上留下的墨色,即笔画纹理图像的灰度值随时间变化的随机序列。单像素宽度的笔画纹理图像(以下简称纹理单元)对应一小簇笔毫留下的笔墨效果。这样,通过对笔画纹理单元建立灰度变化的自相关表达式,进一步用自回归模型产生新的草书纹理。另外,由于纹理库里的笔画纹理有限,在实际应用中需要风格有所变化的笔画纹理,

特别是不同长度和宽度的笔画纹理。因此,本文提出了对草书纹理进行长宽控制的方法生成新的草书纹理。

1.1 构建笔画纹理库

在草书创作过程中,书法家极其讲究运笔和用墨的技法,能借用墨色的浓淡和燥润表现变化生动的笔画效果。当笔蘸满墨后径直去写,这时笔头墨多而润,写出来的点画圆润而饱满;继续写,笔头的墨量被宣纸吸收而逐渐减少,呈笔墨干枯状态,写出来的点画边缘及内部的墨因分布不均而产生变化的笔画纹理效果;如果这时运笔速度很快,写出的点画中会夹杂丝丝空白,呈现“飞白”^①效果。通过认真研究前人草书作品及根据草书纹理的特点,我们从草书作品中选取9条不同墨色浓度及具有典型飞白效果的笔画纹理,构建了一个如图1所示的草书纹理基本库,并将它们按浓度和飞白效果变化编号为 $T_i(i=1,2,\dots,9)$ 。

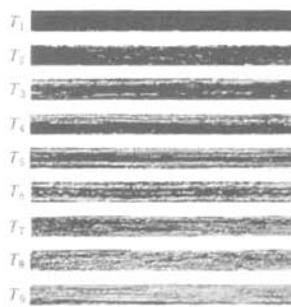


图1 采集的9条典型的草书纹理

1.2 自回归模型

自回归模型^[16]是一个用于时间序列分析和信号处理的重要模型。通常,自回归模型的数学表达式定义为

$$x(n) = w(n) - \sum_{k=1}^p a_k x(n-k) \quad (1)$$

其中 $w(n)$ 一般为高斯白噪声, a_k 为自回归系数, p 被称为自回归的阶。自回归模型的关键在于自回归系数的计算。本文采用伯格算法对自回归系数进行估计,其基本思想是对数据的前向和后向误差作最小二乘估计,即当阶数为 k 时,假定 $e_k^f(n)$ 和 $e_k^b(n)$ 分别代表前向和后向预测误差,即

$$e_k^f(n) = x(n) + \sum_{i=1}^k a(i)x(n-i),$$

$$e_k^b(n) = x(n-k) + \sum_{i=1}^k a(i)x(n+k+i).$$

① 飞白是书法艺术的一种表现手法,书法家用枯笔在笔画中留下丝丝空白,相传是东汉书法家蔡邕受了工匠用帚子蘸白粉刷字的启发而创造的。

通过最小化前向和后向误差的均值来计算 a_k , 即计

算 $\epsilon_k = \frac{1}{2}(\epsilon_k^f + \epsilon_k^b)$ 的最小值. 得到

$$\epsilon_k^f = \frac{1}{(N-k)} \sum_{n=k}^{N-1} |e_k^f(n)|^2 \quad (2)$$

$$\epsilon_k^b = \frac{1}{(N-k)} \sum_{n=0}^{N-1-k} |e_k^b(n)|^2 \quad (3)$$

$$a_k(i) = \begin{cases} a_{k-1}(i) + r_k a_{k-1}(k-i), & i = 1, \dots, k-1 \\ r_k, & i = k \end{cases} \quad (4)$$

其中 r_k 为自相关系数. 将式(4)代入式(2),(3), 得到前向和后向误差估计的迭代表达式

$$e_k^f(n) = e_{k-1}^f(n) + r_k e_{k-1}^b(n-1),$$

$$e_k^b(n) = e_{k-1}^b(n-1) + r_k e_{k-1}^f(n);$$

其中 $e_0^f(n) = e_0^b(n) = x(n)$.

为了计算 r_k , 对第 k 阶预测误差表达式求导, 并使其值为 0, 则

$$r_k = \frac{-2 \sum_{n=k}^{N-1} e_{k-1}^f(n) e_{k-1}^b(n-1)}{\sum_{n=k}^{N-1} |e_{k-1}^f(n)|^2 + |e_{k-1}^b(n-1)|^2}$$

另外, 自回归模型要用一些数值方法确定阶 p 的值, 如经典的 Akaike 信息论准则. 由于草书纹理的生成是一种非真实感绘制, 不需要计算很精确. 为了减少计算量, 根据我们的经验, p 取值为样本纹理长度的 3/4 能取得满意效果.

1.3 用自回归生成草书纹理

我们把纹理库里的样本纹理 T_i 看作由一组纹理单元 $g_j (j = 1, \dots, h, h$ 为样本纹理图像高度) 组成, 如图 2 所示. 图 3 所示为从样本纹理 T_5 中提取出来的一条纹理单元的灰度值变化曲线, 一条样本纹理就被视为由这样一组灰度值变化曲线组成. 对于纹理单元的灰度值变化曲线, 把它看作一个随机序列, 利用第 1.2 节介绍的伯格算法可以求出灰度值之间的自相关系数. 这样, 新的草书纹理可以由式(1)迭代生成.

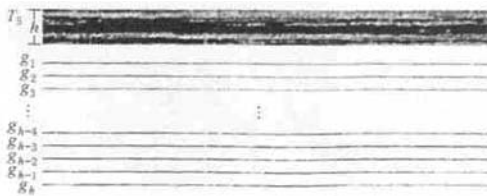


图 2 一个样本纹理及其纹理单元

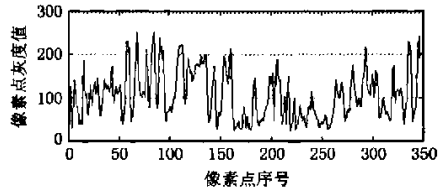


图 3 纹理单元的灰度变化曲线

1.4 笔画纹理宽度变化控制

草书纹理的宽度处理. 在书法创作过程中, 由于提、按、顿、转等动作施加于毛笔的压力和方向上的差别, 表现出来的笔画宽度效果变化差异很大.

假定样本纹理的宽度为 w_s , 纹理宽度的缩放因子为 f , 所需的纹理宽度为 w_r , 即 $w_r = w_s \times f$. 如果 $f < 1$, 样本纹理需要按比例 f 缩小. 草书纹理以飞白居多, 这种飞白纹理具有一定的结构特性(如图 1 所示). 为了让新生成的笔画纹理保持这种结构特征, 本文引入统计学里的分层抽样的方法^[17], 从样本纹理里抽取比例为 f 的纹理单元组成新的纹理,

而不是采用简单的图像几何变换方法. 由于图像的缩放处理容易造成纹理的失真, 不能保持纹理原有的特征, 因此我们通过统计一条样本纹理的每个纹理单元 $g_j (j = 1, \dots, h)$ 的灰度值之和 G_sum , 得到

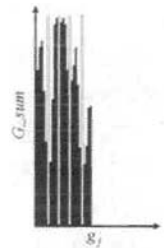


图 4 分层采样确定的草书纹理结构特征

如图 4 所示反映样本纹理灰度变化的直方图; 然后计算这条直方图上的极小值点, 即求出每一点的一阶导数 f_d 和二阶导数 s_d , 极小值应同时满足 $f_d = 0$ 和 $s_d > 0$. 借助这些极小值点, 样本纹理被分成 n

个区间 $A_i (i = 1, \dots, n)$, $w_i = \sum_{j=1}^n A_i$. 每个区间的纹理具有相似的特征, 然后从每个区间随机采样比例为 f 的纹理单元 $S_i, S_i = A_i \times f$, 采样得到的新纹理为 $w_r = \sum_{i=1}^n S_i$.

如果 $f > 1$, 即样本纹理需要按比例 f 放大, 这时仍采用上面给出的分层抽样方法从样本纹理里抽样比例为 f 倍的纹理单元, 插入到原纹理中去. 为保持纹理的结构特征, 抽样出来的纹理单元的插入位置是在样本纹理里相同序号的纹理单元后面.

1.5 笔画纹理延长

纹理的延长. 由于草书笔画多连绵回绕, 而样本

纹理长度是固定的,在实际应用中,往往需要取所需长度的纹理,即延长.传统的方法是用纹理合成的方法^[18-19],从样本纹理的图像空间查找相似的像素点或纹理块进行拼贴,如马尔科夫的方法^[1].但是这种方法计算量大,为了找到匹配的像素点或纹理块,需要在整个样本纹理的图像空间搜索一遍.本文采用自回归模型对纹理进行建模,纹理的延长易于实现.假定样本纹理长度为 L ,所需要纹理长度为 R ,先用第 1.2 节介绍的伯格算法求得样本纹理的自相关系数,再按式(1)将样本纹理延长到 R .

2 草书纹理与字形合成

本文主要研究草书纹理效果的生成,将纹理合成到字上的研究详见文献[1],下面仅对纹理合成到字上作简要介绍.

从外形来看,一个汉字的书法特征主要由 3 个方面表现:字的间架结构、字的笔画形状、填充笔画的纹理,本文主要研究笔画纹理的生成.要将笔画纹理合成到字上,首先需要给定字的骨架和轮廓信息.根据字骨架的曲率变化,骨架被分成若干段,每一段选择相应的笔画纹理,如果笔画纹理长度和笔画骨架不一致,则延长纹理到笔画长度,相邻 2 段笔画纹理的自然过渡采用基于马尔科夫插值的纹理融合技术.另外根据字轮廓的形状变化,纹理的形状作相应的变化.主要方法是先将笔画形状先大致分为 LEAF1, LEAF2, CONST, TIPPING 等几种类型^[1],再调整参数使得笔画形状的变化和纹理的变化一致.

3 实现和例子

下面给出采用本文方法得到的一些实验结果.图 5~7 所示分别为采用分层抽样方法得到的草书纹理宽度变化以及延长生成新纹理的结果.从图 5, 6 可以看出,通过分层抽样方法控制草书纹理宽度

生成的新纹理,较好地保持了原纹理的结构特征;然后再采用自回归模型对其进行参数化.由于随机函数的作用,而使新生成的纹理有所变化.

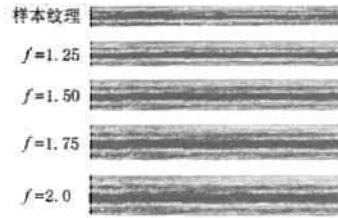


图 6 纹理抽样插值后自回归生成的结果



图 7 纹理延长结果

图 8 比较了纹理图像直接放大和分层抽样放大及由分层抽样放大生成新纹理的结果.可以看出,分层抽样放大并由自回归生成的纹理图像从视觉效果上看更为细腻.

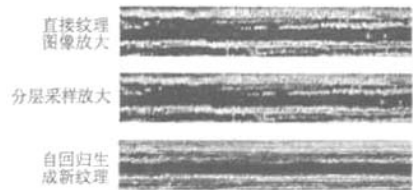


图 8 比较结果

图 9 所示为利用本文方法生成的草书纹理合成到字上的结果.从结果上来看,生成的草书纹理能取得满意效果.

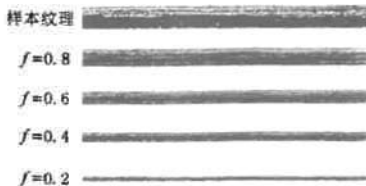


图 5 纹理抽样缩小后自回归生成的结果

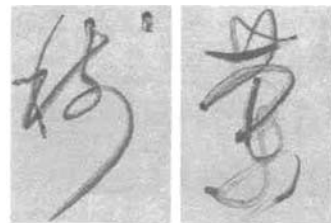


图 9 用本文方法生成的草书纹理映射到字上的结果

4 结 语

本文将草书纹理看作随机序列,进一步提出用自回归模型和分层采样方法生成草书纹理的方法,该方法有别于从毛笔和墨扩散的形状建模及物理过程的真实模拟角度考虑.从实验结果来看,采用本文方法生成的纹理既保留了同原有纹理相似的结构特征,又由于随机函数的作用而使新生成的纹理视觉效果上有所变化.最后将生成的草书纹理合成到字上,取得了满意的效果.

今后工作将考虑从2个方面改进和扩展本文方法:1)书画同源.在用墨和笔法上有很多相似的地方,将尝试用本文方法生成水墨风格的绘画作品.2)结合本文提出的草书纹理生成方法,提出一种新的虚拟毛笔模型.

参 考 文 献

- [1] Yu Jinhui, Peng Qunsheng. Realistic synthesis of cao shu of Chinese calligraphy [J]. *Computers & Graphics*, 2005, 29(1): 145-153
- [2] Strassmann Steve. Hairy brushes [C] //Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, ACM SIGGRAPH, Dallas, 1986: 225-232
- [3] Wang Zhengxuan, Pang Yunjie. A computer Chinese calligraphy system CCCS [J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 1991, 3(1): 35-40 (in Chinese)
(王征旋, 庞云阶. 一个计算机书法系统 CCCS [J]. *计算机辅助设计与计算机图形学学报*, 1991, 3(1): 35-40)
- [4] Yu Jinhui, Zhao Jidong, Cong Yanqi. A physically based brush pen model [J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 1996, 8(4): 241-245 (in Chinese)
(于金辉, 张积东, 丛延奇. 一个基于骨架的笔刷模型 [J]. *计算机辅助设计与计算机图形学学报*, 1996, 8(4): 241-245)
- [5] Lee Jintae. Simulating oriental black-ink painting [J]. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 1999, 19(3): 74-81
- [6] Wong Helena TF, Ip Horace Ho-Shing. Virtual brush: a model-based synthesis of Chinese calligraphy [J]. *Computer & Graphics*, 2000, 24(1): 99-113
- [7] Xu Songhua, Tang Min, Lau Francis, et al. A solid model based virtual hairy brush [C] //Proceedings of Eurographics, Saarbrücken, 2002: 513-531
- [8] Mi Xiaofeng, Xu Jie, Tang Min, et al. The droplet virtual brush for Chinese calligraphic character modeling [C] // Proceedings of the 6th IEEE Workshop on Applications of Computer Vision, Orlando, Florida, 2002: 330-338
- [9] Chu Nelson, Tai Chiewlan. An efficient brush model for physically-based 3D painting [C] //Proceedings of the 10th Pacific Conference Computer Graphics, Beijing, 2002: 413-421
- [10] Wang Zheng, Sun Jizhou, Sun Meijun, et al. Computer calligraphy based on autoregressive model [J]. *Journal of Engineering Graphics*, 2006, 27(5): 38-43 (in Chinese)
(王征, 孙济洲, 孙美君, 等. 采用自回归模型的计算机书法的研究 [J]. *工程图学学报*, 2006, 27(5): 38-43)
- [11] Guo Qinglian, Kunii Toshiyasu L. "Nijimi" rendering algorithm for creating quality black ink paintings [C] //Proceedings of the Computer Graphics International, Ishikawa, 2003: 152-159
- [12] Huang Shengwen, Way Derlor, Shih Zenchung. Physical-based model of ink diffusion in Chinese ink paintings [J]. *Journal of WSCG*, 2003, 10(3): 520-527
- [13] Shi Yongxin, Sun Jizhou, Zhang Haijiang, et al. Graphical simulation algorithm for Chinese ink wash drawing by particle system [J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2003, 15(6): 667-672 (in Chinese)
(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)
- [14] Zhang Haijiang, Wang Xiujin, Sun Jizhou, et al. Fractal-based simulation of the diffusion effect of Chinese ink wash drawing [J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2004, 16(4): 555-558 (in Chinese)
(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)
- [15] Chu Nelson, Tai Chiewlan, MoXi. real-time ink dispersion in absorbent paper [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2005, 24(3): 504-511
- [16] Huangfu Kan, Chen Jianwen, Lou Shengqiang. Modern digital signal processing [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2003 (in Chinese)
(皇甫堪, 陈建文, 楼生强. 现代数字信号处理 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2003)
- [17] Du Zifang. Sampling techniques and practices [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005 (in Chinese)
(杜子芳. 抽样技术及其应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2005)
- [18] Sun Yan, Tang Ying, Bao Hujun. Texture synthesis based on structural information [J]. *Journal of Mini-micro Systems*, 2006, 27(10): 1939-1942 (in Chinese)
(孙岩, 汤颖, 鲍虎军. 基于结构的纹理合成 [J]. *小型微型计算机系统*, 2006, 27(10): 1939-1942)
- [19] Xu Xiaogang, Yu Jinhui, Ma Lizhuang. Fast texture synthesis using multiple seeds as constraint [J]. *Journal of Image and Graphics: A*, 2002, 7(10): 994-999 (in Chinese)
(徐晓刚, 于金辉, 马利庄. 多种子快速纹理合成 [J]. *中国图象图形学报: A 版*, 2002, 7(10): 994-999)