

中国书画中干笔飞白仿真方法概述

侯增选, 郑栓柱, 郭超, 杨广卿

(大连理工大学 机械工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要:干笔飞白作为中国书画中的一种特殊笔法,可以使书画作品具有节奏感,增强艺术表现力,其丝丝露白、灵动飘逸之美在书画的传情达意方面具有不可替代的作用。其纹理的随机性、多样性,是中国书画计算机仿真中的一个难点,因此对干笔飞白进行仿真研究具有十分重要的意义。文中针对干笔飞白的特殊纹理和艺术效果,分析了干笔飞白的形成原因和艺术特征,综述了近年来干笔飞白计算机仿真方法。将仿真方法分为基于纹理映射的方法、基于分形理论的方法和基于毛笔建模的方法,并对其中一些典型算法进行了分析和比较,归纳了各自的优缺点。最后,在以上分析研究的基础上并结合实际应用研究,指出了今后干笔飞白计算机仿真研究的重点,有助于对后续使用计算机对干笔飞白进行深入研究提供。

关键词:中国书画;干笔飞白;仿真;纹理映射;分形理论;毛笔建模

中图分类号:TP391.9

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2015)11-0145-07

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2015.11.029

Review of Simulation Methods of Half-dry Stroke in Chinese Calligraphy and Painting

HOU Zeng-xuan, ZHENG Shuan-zhu, GUO Chao, YANG Guang-qing

(School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology,
Dalian 116024, China)

Abstract: As a special technique of writing, the Half-Dry stroke can increase the sense of rhythm and enhance the artistic expression of Chinese calligraphy and painting. Its filamentous white hollow-out, spirituality and elegant has an irreplaceable role in conveying the feeling and ideas. The randomness and diversity in its texture effect is a research issue in the simulation of Chinese calligraphy and painting. Therefore, researching the simulation of the Half-Dry stroke has very important significance. In this paper, researched the forming reasons and the characteristics of the Half-Dry stroke for the special texture and artistic effect of Half-Dry. Presented a review of simulation methods of the Half-Dry stroke effect. Then, summarized three kinds of simulation methods: texture mapping, fractal theory and brush modeling. In addition, completely analyzed and compared various typical algorithms, summarized the advantages and disadvantages respectively. Finally, put forward the future research directions of the Half-Dry stroke effect based on above research and combined with practical application, which to be helpful for the theoretical basis for the Half-Dry stroke simulation.

Key words: Chinese calligraphy and painting; Half-Dry stroke; simulation; texture mapping; fractal theory; brush modeling

0 引言

中国书画艺术被誉为祖国历史文化的瑰宝与精髓,是传承和发扬五千年中华文明的基础。在书画绘制过程中,由于笔法、墨法、技法等的不同运用,使得艺术作品表现出丰富多彩的内容。随着计算机图形学技术的飞速发展,人们致力于将内涵丰富的中国书画与计算机技术相结合,用计算机来模拟中国书画,对于传

承和发扬中华文明起到了积极的推动作用。早在1986年,在MIT Media Laboratory工作的Strassmann^[1]提出了第一个虚拟毛笔模型,将绘制过程中所涉及对象归纳为毛笔、笔划、蘸墨和纸张四要素,成功模拟出具有一定水墨风格的书画作品。随后,Pahm^[2]、Baxter^[3]、Chua^[4]、张振庭^[5-6]、Lee^[7]、张俊松^[8]、黄树东^[9]、Yeh^[10]、陈海强^[11]等分别对中国书画中的笔、

收稿日期:2015-03-08

修回日期:2015-06-12

网络出版时间:2015-11-04

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51175058)

作者简介:侯增选(1964-),男,博士,教授,博士生导师,研究方向为机械设计及理论、虚拟产品开发技术等;郑栓柱(1987-),男,硕士研究生,研究方向为虚拟绘制仿真与编程。

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20151104.0953.088.html>

墨、纸从不同方面、不同角度进行了计算机仿真研究,并取得了显著的成绩。

干笔飞白是中国书画中的一种特殊笔法,其恰当的运用可以使书画作品具有节奏感,增强艺术表现力,使其更具灵性、耐人寻味。在中国书画计算机仿真中,已有许多学者对于干笔飞白进行了研究,并提出了自己的研究方法来仿真干笔飞白,取得了一定的效果,但和实际绘制效果还有一定差距。

1 干笔飞白的特征分析

相传,干笔飞白是东汉灵帝时期书法家蔡邕所创。唐朝张怀瓘的《书断》上曾云:“飞白者,后汉左中郎将蔡邕所作也。”作为中国书画中的一种特殊笔法,其笔画中存在镂空图案,似枯笔所写,使得书画作品显现苍劲、飘逸,更有力度、更具表现力,如图1所示。



图1 干笔飞白作品

干笔飞白效果的形成是诸多因素同时作用的结果:不同的毛笔笔毛具有不同硬度,并且在绘制过程中,毛笔水墨量逐渐降低,毛笔与宣纸之间的压力和摩擦力的变化,以及笔杆倾斜角度的变化,这些因素的综合作用使笔头形变程度加剧,当超过某一阈值时,笔头产生分叉,形成干笔飞白效果。

飞白作为书画中的一种特殊笔法,其内涵主要包含两个方面:即“飞”与“白”^[12]。南朝鲍照的《飞白书势铭》曾这样描述飞白:“……鸟企龙跃,珠解泉分……绝锋剑摧,惊势箭飞……丝萦发垂,平理端密……故仙、芝烦弱,既匪足双;虫、虎琐碎,又安能匹。君子品之,是最神笔。”这主要论述了飞白的“飞”,鸟儿飞起蛟龙腾跃,水珠崩解泉水溅飞,锋芒毕露光彩四射,将其雄奇瑰丽的气势,轻重缓急的韵律,惊心动魄的节奏表现得淋漓尽致。飞白的“白”主要指黑、白相间,笔画丝丝露白,存在镂空图案,这是飞白最明显的特点。如武则天的《升仙太子之碑》等,黑白相隔,深浅变化,抑扬顿挫,层层叠叠,将飞白的美极尽所能地展现在大家面前,如图2所示。

飞白所具有的艺术美在使用中主要体现在:单个笔画中运用飞白,可以使笔画纹理参差、错落有致;就单字而言,飞白笔画和其他笔画虚实结合,具有图画美;在整幅书画作品中,飞白使书画作品上下左右融为

一体,飞白纹理和其他纹理虚实相生,反映出运笔的轻重缓急,同时可以充分表达作者在书画创作时心境的变化^[13]。



图2 升仙太子之碑

一般情况下,国画中的山水、竹林、柳叶等较多使用飞白。这种现象主要是由于飞白纹理与山石纹理的特殊性相符,使用飞白可以把山石的气势表现得淋漓尽致;竹林、柳叶的飞白运用使其更具节奏感。而在中国书法中,草书和行书较常运用飞白,这主要是由于笔画的形态特征、运笔技巧、书写风格、作品章法等的不同所致。要恰当地使用飞白,还要考虑到毛笔特性、书写速度和风格、运笔技巧以及作者当时的心境等因素。

正是由于干笔飞白的灵活多变、纹理参差等特点,使得对其进行仿真研究存在一定的复杂性。

2 干笔飞白仿真方法

在目前的中国书画仿真研究中,已有许多学者对于干笔飞白进行了研究。干笔飞白仿真方法分为以下几种:基于纹理映射的方法、基于分形理论的方法和基于毛笔建模的方法。

2.1 基于纹理映射的干笔飞白仿真

2.1.1 基于马尔可夫随机场理论的纹理映射方法

杨莹等^[13-15]基于纹理映射技术和马尔可夫随机场理论,提出了一种非交互的书法模拟算法。以 Windows 系统字体中的华文行楷和方正黄草简体为待提取笔道轮廓字体,采用 Canny 算子进行边缘检测,得到待检测字体(目标图)的笔道轮廓,对书法家的典型干笔飞白样图采用形态学方法进行分割,经仿射变换将样图的风格传输到目标图中,对得到的目标图进行概貌和细节纹理的划分,在多层次上实现艺术风格的模拟,得到最终的干笔飞白效果图。

该算法结构简单,运算速度较快,能够生成与原书画作品风格趋近一致的作品,但其缺少实时交互性,不能体现出真实的书写过程,样图中飞白纹理较少,并且该算法在确定目标图纹理块和样图之间的最佳匹配时

还存在一些问题。

2.1.2 基于 BTPs 库的草书纹理合成

于金辉等^[16]构建了一个合成草书的系统。首先采集书法家的一些经典草书纹理,构建一个 BTPs (Brush Texture Patches) 库,然后在进行书写时,由用户通过指定关键点来确定笔画骨架和笔道。根据骨架曲率变化,将骨架分成若干段,选择相应的纹理,将其映射到笔道。若纹理长度与骨架段不一致,则延长纹理到笔画长度,两相邻笔画纹理之间应用马尔可夫插值的纹理融合技术使其光滑连接。

该方法实现了草书纹理的合成,但是该方法在纹理拼接过程中,需要搜索整个样本纹理空间,计算量大,缺少实时性。纹理库中只有数量有限的纹理,使得合成的纹理过于单一,而且生成的草书纹理宽度没有变化。此外,该方法没有对纹理如何建模进行研究。

随后,张俊松等^[17]在于金辉的基础上做了进一步研究,提出一种基于自回归模型和分层采样的草书纹理生成方法。从草书作品中采集 9 条经典的笔画纹理(具有典型飞白效果和墨色变化),构建一个草书纹理基本库。基本库中的每一条纹理看作是由一组纹理单元组成,将从纹理单元提取出来的灰度变化曲线视为随机序列,应用自回归模型计算生成新的草书纹理。随后使用分层抽样的方法,得到宽度变化的纹理图,而纹理的长度变化同样使用自回归模型来实现。最后,应用于金辉的研究方法,将新生成的草书纹理映射到字上,得到具有飞白纹理的草书字体。

该方法可以实现草书纹理的合成,使用分层抽样的方法,避免了在图像缩放时出现的失真现象。虽然实现了纹理宽度和长度的变化,但是生成的纹理样式单一,不能体现出一种苍劲飘逸的感觉,而且该方法缺少人机交互性,整个书写过程实时性较差,无法体现真实的书写过程。另外,该方法只考虑了书法纹理的合成,还没有将其应用到国画的创作过程中。

2.1.3 曲底边四边形分割笔道算法

孙济州等^[18]提出了曲底边四边形的概念,并使用“中心线关键点”表示法和“轮廓线关键点”表示法构建笔道。生成笔道时,使用“中心线关键点”表示法,用三元组 (p, t, l) 表示中心线上的每个点,由曲线上关键点 $P(p, t, l)$ 计算得到外侧两轮廓线上相应点 P_L , P_R 坐标。由这些关键点可以反算出 NURBS 曲线,即为笔道轮廓。在笔道绘制过程中,使用“轮廓线关键点”表示法为绘制算法提供笔道单元,使用曲底边四边形单元将笔道进行分割。采集画家的经典飞白笔触作为样图,应用映射算法和拼合技术,把画家的经典飞白笔触按照绘制规则映射到每个笔道单元,生成笔道内部纹理,如图 3 所示。



图 3 孙济州的干笔飞白绘制效果

如果样图与笔道相比很小,则需扩展样图,即提高样图的分辨率。在相邻像素之间通过线性插值添加新像素^[18],以使效果图纹理更细腻光滑。

该方法能够较好地模拟中国书画中的干笔飞白,但是飞白纹理过于依赖样图。如果样图库中飞白纹理样式较少,则映射产生的纹理呆板、缺少变化,不能体现出干笔飞白变化多端的特性。而且在应用纹理映射方法模拟飞白时,无法体现出起笔、顿笔、收笔等细节处的干笔飞白韵味。

蔡峰磊^[19-20]使用纹理贴图的方法来模拟笔画,经过测量并记录真实毛笔的分叉现象,建立了一个毛笔笔画分叉数据库,以数据驱动的方法来实现笔画的分叉。文中指出由于绘制过程中水墨的减少,使得水墨对笔毛的聚集作用减弱,当水墨量减少到一定程度时,毛笔就会产生分叉,在绘制过程中形成笔画中的飞白现象。该方法实现了分叉笔画的模拟,能够在笔画中产生飞白效果,但是该方法只是针对笔画中的分叉现象进行模拟,并没有实现毛笔笔毛的分叉,而在绘制过程中通过分叉索引表来查找分叉图,使得不同的人书写出的飞白效果几乎相同,缺少变化,真实感较差。

此外,江浩^[21]同样建立了飞白纹理样图库,采用纹理映射方法,将样图中的飞白纹理映射到目标图,从而实现干笔飞白的计算机仿真。但是在采用纹理映射方法实现干笔飞白效果时,由于纹理库中样图的单一,使得形成的干笔飞白效果不真实,无法达到飞白生动灵活、变化多端的效果。

2.2 基于分形理论的干笔飞白仿真

分形几何是由曼德布罗特(B. B. Mandelbrot)于 1973 年在法兰西学院讲课时首次提出。分形几何是以非规则几何形状为研究对象的几何学,主要有以下特点:从物体整体来看,分形图形是处处不规则的;从不同尺度来看,图形又具有相同的规则性^[22]。使用分形几何可以很好地模拟具有随机性的自然物体,中国书画在某些方面同样具有分形特征,如皴法、干笔飞白等。

2.2.1 基于随机中点位移法模拟毛笔分裂

唐瑶^[22]提出了一种用于提取艺术作品笔画骨架

的二值图像细化算法。在完整提取笔画骨架的基础上,对笔画轮廓进行水墨填充,得到具有一定艺术风格的书画作品。通过分析实际书写过程中笔毛的分裂现象,发现书画作品水墨效果的形成规律在广义上有着自相似的特点。引入分形理论,以随机中点位移算法来模拟毛笔笔毛的分裂现象。在毛笔分裂后,使用曲线插值的方法实现笔头与宣纸接触轮廓的建模。

在绘制过程中,沿运笔方向,使用上述方法来模拟经过每一个描摹骨架点的笔头形状,即笔头与宣纸之间的接触轮廓,叠加每一个描摹骨架点上的接触轮廓,即可实现干笔飞白效果的模拟。

该方法易于实现,绘制效果具有一定的水墨风格,但是该方法忽略了由于笔法不同所产生的笔痕变化,并且笔毛分裂过于依赖随机数,缺少真实性。该方法只能对已有作品进行风格化再生,不能进行艺术创作。

2.2.2 基于迭代函数系统的干笔飞白算法

迭代函数系统是众多分形中的一类,可以较好地模拟随机性的自然物体^[23-24]。

在文献[25]中,张锡哲认为飞白是由于在书写时,毛笔中水分不足以及快速运笔所形成的特殊笔法效果,提出了一个新颖的基于迭代函数系统(Iterated Function System, IFS)的干笔飞白效果仿真模型。该模型根据运笔的压力和速度,每隔时间 t ,在用户的书写轨迹中采样一次,得到采样点集。根据笔画宽度和轨迹点间距,采用随机迭代算法生成轨迹点集。将轨迹点集缩放到复平面上的单位圆中,轨迹点集中的每一点作为复映射 f_c 的参数 c ,形成参数点集 C ,遍历 C 中所有点构造出复映射族 $f(z, c)$,其所有复映射就构成一个迭代函数系统。为每个映射分配一个概率 p ,则构成一个带概率的IFS,采用随机迭代算法绘制该IFS的吸引子,其吸引子图像即为模拟的干笔飞白图像。

该模型具有结构简单、易于实现的优点,但是该模型形成的飞白纹理过于依赖随机数,纹理图案简单,而且在绘制过程中缺少实时交互性,不能体现真实的书写过程。

此外,李传峰^[26]使用边缘检测算法中的微分算法获得已有图像的轮廓,采用唐瑶提出的一种二值图像细化算法得到已有图像的骨架,并从骨架中采集若干采样点,由此生成轨迹点集,对轨迹点集进行处理得到参数点集,建立迭代函数系统。使用经过改进的chaos game算法绘制吸引子,然后对吸引子从整体形态着手形成干笔飞白效果图。

该方法实现了干笔飞白的仿真,具有一定的随机性,但是该方法只能以已有作品作为输入,不能进行创作,无法体现出真实的书写过程,生成的飞白纹理和真实的干笔飞白纹理还有较大差距。

2.3 基于毛笔建模的干笔飞白仿真

通过建立虚拟毛笔模型来模拟干笔飞白是中国书画计算机仿真中的一个重要研究方向。从毛笔效果的模拟来分,毛笔的建模方式大体上分为基于物理模拟的方式和基于经验模拟的方式^[27]。由于毛笔建模方式的不同,干笔飞白的仿真方法同样分为基于物理模拟的方法和基于经验模拟的方法。

2.3.1 基于物理模拟的干笔飞白仿真

该方法首先根据毛笔的形状、弹性、湿度、变形等物理因素构建毛笔的物理模型,在此基础上模拟毛笔的动态变化,形成干笔飞白效果。目前,基于物理模拟的飞白仿真方法有基于二维点阵的飞白仿真和基于毛笔分叉模型的飞白仿真两种。

(1) 基于二维点阵的飞白仿真。

Wong等^[28]指出,当毛笔以较快的速度划过纸面,同时笔毛较干时,部分笔毛虽接触纸面但不会留下墨迹,即会出现干笔飞白现象,并提出了一个由若干笔毛构成的虚拟毛笔模型。在书画创作过程中,每根笔毛会在毛笔与纸张的截面上留下一定量水墨,由于每根笔毛的状态不同,所以水墨在纸张每一像素上的沉积量具有一定的随机性。文中针对每根笔毛的水墨沉积量进行建模,并且为了解决在水墨沉积过程中笔毛之间的相互影响以及纸张特性的影响,引入一个水墨吸收率参数。

此外,水墨的沉积还与笔毛的分散程度和位置等有关。综合考虑以上各因素的影响,得到每根笔毛在书写过程中的水墨沉积量计算公式,从而形成干笔飞白效果。

该模型可以实现干笔飞白的仿真,但是该模型需要对每根笔毛进行建模,计算量大,效率低,无法做到实时绘制,而且形成的飞白纹理单一、缺少变化,效果不够真实。

随后,白本督等^[29]改进了Wong等提出的虚拟毛笔模型,将倾斜于圆锥主轴的笔毛改为平行于圆锥主轴的笔毛,毛笔剖面为圆形的二维点阵。毛笔变形由毛笔和纸张交互产生的印痕来模拟,使用一组能量函数表示毛笔的动态变形,变形参数用一组弹簧网络精确计算。由于毛笔的变形、水墨量的减少以及毛笔和纸张之间的摩擦导致毛笔分叉^[29],通过检测毛笔水墨量以及毛笔尖的变形程度,当达到极限值时毛笔产生分叉。毛笔分叉借鉴Xu等^[30]提出的2级层次几何模型并做了相应改进。当毛笔水墨量减少一半,同时毛笔顶部椭圆的变形达到极限值($ku=1.5$)时,毛笔产生分叉,形成一个新的毛笔簇。将新毛笔簇使用仿射变换与主毛笔簇合成,减少了模型规模。图4为使用该模型生成的飞白笔画。



图4 白本督的飞白笔画

该模型使用顶点集合代替单根笔毛进行建模,用毛笔和纸张交互产生的印痕来模拟毛笔变形,降低了计算复杂性,可以很好地模拟毛笔分叉,但是该模型生成的飞白纹理单一,缺乏真实性,而且不能在笔道中部形成镂空的干笔飞白效果,还需要进一步的改进。

(2) 基于毛笔分叉模型的飞白仿真。

徐颂华等^[30-31]在文献中引入了“基元(基本绘图单元, Writing Primitive)”的概念,基元为毛笔建模的最小单位,基元之间相互独立,互不影响。毛笔笔束由基元来表示,若干基元聚合起来构成虚拟毛笔。在书画创作过程中,基元发生变形,当累积变形程度超过事先设定的阈值时,基元产生分裂,形成若干新的子基元,实现了毛笔分叉的模拟。其变形程度用基元内应力 γ 来表示,主要和湿度、运笔速度、基元中笔毛的硬度和数目、纸张粗糙度以及基元的累积形变程度等因素有关。设定基元内应力极限值 tre ,当 $\gamma > tre$ 时,基元产生分裂,分裂得到子基元的个数为: $k = \lfloor \gamma / tre \rfloor$ 。每个子基元的笔毛数目和尖端控制直线长度各减为原来的 $1/k$,其中部控制椭圆的长、短轴变为原来的 $1/\sqrt{k}$,子基元的其他造型参数由原基元传递得到。然后再经水墨扩散形成最终的干笔飞白效果。

但是该模型可控参数少,控制能力较弱,需要复杂的曲面表示和求交运算,操作和计算复杂,而且在模拟毛笔分叉时,每个子基元的大小都相同,不能真实地模拟毛笔分叉,可能出现较严重的失真。

2008年,孙美君等^[32]提出了一个3D虚拟毛笔模型,该模型由主脊骨、分叉脊骨、辅助面、关键点和表面组成。主脊骨用来实现整体骨架的弯曲、扭转等变化,分叉脊骨用来实现分叉效果。提出势能-阈值方法,应用能量最小化原理控制毛笔弯曲、扭转等形变。采用快速分叉算法实现毛笔分叉,设定毛笔分叉限定值,当毛笔的湿度、压力和倾斜角度的综合值超过限定值后,且分叉数目小于默认的最大值 MAX_SPLIT_NUM 时,毛笔产生分叉。再对分叉脊骨结构的初始值做一系列假设^[32],分叉脊骨的其他参数由主脊骨传递得到,形成自身的控制曲线,得到毛笔的分叉效果。随后,由水墨传输算法形成干笔飞白等水墨特效。但是该模型没有确定毛笔分叉数目,而且生成的飞白纹理单一,缺少真实性。

Chu等^[33-34]根据父笔刷之间的摩擦、弯曲变形和湿度等因素,从父笔刷的脊骨点的辅助轴上分裂出一个子笔刷,扩展主脊骨的笔尖点为线段,然后在此线段

上映射分叉纹理,从而形成干笔飞白效果。该模型结构简单,真实感较强,能够模拟毛笔分叉形成飞白纹理,但是该模型需要通过计算确定每个脊骨点的位置及其相应截面的变形情况,运算量大,而且使用固有的灰度贴图模拟飞白纹理,限制了生成纹理的多样性,且分叉部位具有突刺感,很难真实地模拟飞白效果。

此外,殷婷婷^[35]建立了一个三维虚拟毛笔模型,并且指出毛笔分叉是由于压力和湿度的变化造成的,当毛笔所受压力和湿度等因素的综合值达到一定数值时,毛笔就会产生分叉。毛笔产生分叉的数目由分叉综合值和分叉极限值的比值确定,分叉笔束的长度和宽度通过给定毛笔分叉单位长度和单位宽度来计算。该方法虽然对毛笔分叉进行了较好的仿真,但是并没有在毛笔分叉的基础上形成飞白效果。

2.3.2 基于经验模拟的干笔飞白仿真

该方法不考虑毛笔的真实物理模型,而是在总结实际书画创作经验及大量试验经验的基础上,以毛笔与纸面接触部分的变化来模拟毛笔的飞白效果。目前,基于经验模拟的飞白仿真方法有基于“笔元”模型的干笔飞白仿真方法和基于笔法模型的干笔飞白仿真方法两种。

(1) 基于“笔元”模型的干笔飞白仿真。

么丽欣等^[36]提出了一个基于经验的由“笔元”构成的一维笔模型,考虑物理特性对效果的影响,对毛笔进行“伪物理过程”模拟。采用“死元”、“活元”模拟毛笔的分叉和飞白等效果,当施加于毛笔上的压力过大时,毛笔产生分叉(即:出现“死元”)。“死元”是不带墨的“笔元”,在运笔时不会流下墨迹,然后结合笔道模型、纸模型和扩散模型最终形成干笔飞白效果。

该方法结构简单,计算量小,可以实现毛笔的分叉并形成飞白效果,但是在使用过程中的主要问题是无法对起笔和收笔进行模拟,并且水墨传输机制较简单,形成的干笔飞白效果不自然,缺少真实性。

(2) 基于笔法模型的干笔飞白仿真。

邓学雄^[37]和章文^[38]等基于笔法模型^[39-41]将干笔飞白分为丝状飞白和斑块状飞白进行模拟,基于经验分析判断干笔飞白产生的位置,通过检测毛笔水墨量,在水墨量不足的地方产生毛笔分叉。当中锋运笔时,主要产生丝状飞白,分叉子笔刷的数目由随机函数确定。同样,考虑到分叉的随机性,对子笔刷宽度进行调整,取子笔刷宽度平均值 $nWidthaverage$ 的 $1/3$ 为随机量,其余 $2/3$ 为固定值,然后由随机量和固定值得到分叉子笔刷的宽度,并最终确定子笔刷的位置。将子笔道与父笔道进行叠加,实现了干笔飞白效果的模拟。当侧锋运笔时,主要产生斑块状飞白,并且一般只在笔腹一侧出现斑块状飞白,所以在仿真时,相对于丝状飞

白,斑块状飞白的子笔刷的数目最大值变为 $N_{\max}/2$,子笔刷的宽度变为 $\text{Width}/2$,其他绘制算法参见丝状飞白。该方法生成的干笔飞白效果较为简单,样式单一,无法仿真干笔飞白随机生成的过程。

此外,宓晓峰等^[42]提出了一个基于经验的参数化虚拟毛笔模型。使用“雨滴”模型来模拟毛笔与纸面之间的接触区域,在书写过程中,由于压力、湿度和角度等的变化引起“雨滴”的分裂、合并等变化来表示毛笔在运笔过程的变形和分叉,然后对纸面上的痕迹进行填充得到最终绘制效果。该方法模型简单,能够很好地控制绘制效果,但是该方法生成的飞白纹理过于单一、呆板,缺少干笔飞白具有的灵动性,不够真实。

3 结论与展望

在中国书画计算机仿真研究近 30 年的历史期间,许多研究者提出了自己的独特研究方法,并取得了长足的发展。但是和中国书画的实际表现风格和绘制效果之间还有较大差距,尤其是在中国书画特殊笔法的仿真方面还需进一步研究、改进。

干笔飞白作为中国书画中的一种特殊笔法,在增强书画作品的艺术表现力、传达艺术家思想情感等方面起到举足轻重的作用。许多研究者对此提出了自己的研究方法并取得了一定效果,但以上研究与实际书画作品中干笔飞白效果还有一定差距:

(1)在基于纹理映射的仿真方法中,仿真结果过于依赖纹理库中飞白纹理样图,由于样图较少,使得映射得到的飞白效果单一,随机性差,实时性差,显得比较呆板。而且应用纹理映射模拟飞白时,无法体现出起笔、顿笔、收笔等细节处的干笔飞白韵味。

(2)基于分形理论的干笔飞白仿真方法具有方法简单、易于实现的优点,与基于物理模拟等其他仿真方法相比,可以减少毛笔建模带来的复杂性,运算较快。但是该方法形成的飞白纹理过于依赖随机数,生成的纹理图案简单,缺少真实性,而且该方法在生成图像骨架等方面不能体现出真实的毛笔书画过程,在绘制过程中缺少实时交互性,最终形成的飞白纹理和真实的干笔飞白纹理效果还具有一定的差距。

(3)使用基于毛笔建模的仿真方法可以对湿笔有较好模拟,但是在模拟毛笔分叉和干笔飞白时效果较差。在该方法中,确定毛笔分叉状态时缺少灵活性,同时毛笔分叉数目受到一定限制,由此产生的飞白纹理同样缺少灵动性,不够真实,无法将飞白的神韵表现出来,并且绘制系统运行较慢。

通过对国内外干笔飞白仿真方法的分析和比较,在今后的研究工作中,可能在以下几点有较大突破:

(1)建立完善的笔画纹理库。纹理库是否丰满对

产生的飞白纹理的多样性具有重要影响。在今后的研究中,应当对不同书画家的不同纹理进行分类总结,建立一个完善的笔画纹理库,这样有利于增加仿真产生的飞白纹理的多样性。

(2)笔道生成方法研究。笔道是水墨传输、扩散等的基础,同时也是纹理映射的前提条件。目前已有的笔道生成方法无法体现出真实的毛笔书画过程,在今后,应当对书画作品中笔道特征的构建以及风格化创作作进一步的探讨和研究,使绘制的笔道和真实的书写笔迹更加吻合。

(3)实时交互性。纹理映射和分形理论仿真方法的实时性和交互性较差,而基于毛笔建模的仿真方法的实时性不足,在今后的研究中,应当对绘制系统的实时性、交互性进行探讨和研究,考虑使用多线程技术以提高系统的实时性。

(4)个性化研究。干笔飞白纹理虽然具有随机性、多样性,但其归根结底是由人来创作和使用,应当针对不同人的书写习惯、不同艺术水平以及不同的鉴赏能力进行个性化研究,使其形成个人所独有的风格。

(5)在书写、绘画过程中,毛笔受力、姿态是影响书写、绘画效果的重要因素。随着 MEMS 技术的发展,可将 MEMS 测力传感器和 MEMS 惯性测量单元集成起来,构建一个基于 MEMS 的仿真毛笔,用来实时检测书画创作过程中仿真毛笔的压力和姿态,进一步研究毛笔压力和姿态对干笔飞白的影响,实现操作人员对虚拟绘制过程的控制,提高其真实感。

4 结束语

中国书画中的干笔飞白是诸多因素同时作用的结果。在今后的干笔飞白仿真研究中,应该综合考虑计算机图形学、人工智能、MEMS 技术等多个学科的相互交叉、相互作用,进一步促进中国书画计算机仿真研究的发展。

参考文献:


- [1] Strassmann S. Hairy brushes[J]. Computer Graphics, 1986, 20(4): 225-232.
- [2] Pahn B. Expressive brush strokes[J]. CVGIP: Graphical Models and Image Processing, 1991, 53(1): 1-6.
- [3] Baxter B, Scheib V, Lin M C, et al. DAB: interactive haptic painting with 3D virtual brushes[C]//Proceedings of the 28th annual conference on computer graphics and interactive techniques. Los Angeles, California: ACM Press, 2001: 461-468.
- [4] Chua Y. Bezier brush strokes[J]. Computer-aided Design, 1990, 22(9): 550-555.
- [5] 张振庭, 吴江琴, 俞凯. 三维虚拟环境中的书法创作[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2010, 22(6): 1010-1015.

- [6] 张振庭. 计算机书法创作模拟与渲染研究[D]. 杭州:浙江大学,2011.
- [7] Lee J. Simulating oriental black-ink painting[J]. IEEE Computer Graphics & Applications,1999,19(3):74-81.
- [8] 张俊松,张悠苗,周昌乐. 书法临摹过程的交互式动画建模方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,2014,26(6):963-972.
- [9] 黄树东. 数字笔迹书法风格生成技术研究及实现[D]. 广州:华南理工大学,2013.
- [10] Yeh J S, Lien T Y, Ouhyoung M. On the effects of haptic display in brush and ink simulation for Chinese painting and calligraphy[C]//Proceedings of the 10th Pacific conference on computer graphics and applications. Beijing, China:[s. n.], 2002:439-441.
- [11] 陈海强,罗健飞,温国华,等. 基于笔纸墨物理属性的毛笔书法仿真[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,2012,24(9):1134-1138.
- [12] 陶贤果,谢光辉. “飞白”名实考辨[J]. 书法研究,2004(6):1-5.
- [13] 杨莹. 草书及行书“飞白”效果的仿真研究[D]. 大连:辽宁师范大学,2010.
- [14] 杨莹,王宏漫,霍玲玲. 基于纹理映射的方法实现书法的“飞白”效果[J]. 计算机工程与设计,2010,31(18):4051-4053.
- [15] 杨莹,王宏漫,张静. 用马尔可夫随机场理论生成草书“飞白”纹理[J]. 计算机工程与设计,2011,32(2):732-735.
- [16] Yu Jinhui, Peng Qunsheng. Realistic synthesis of cao shu of Chinese calligraphy[J]. Computers & Graphics, 2005, 29(1):145-153.
- [17] 张俊松,于金辉,毛国红,等. 用自回归(AR)和分层采样生成草书笔画纹理[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,2007,19(11):1399-1403.
- [18] 孙济洲,白海飞,齐亚峰. 基于纹理映射的中国水墨画“干笔飞白”效果的仿真生成[J]. 天津大学学报:自然科学与工程技术版,2005,38(1):74-79.
- [19] 蔡峰磊. 基于弹性锥的虚拟 3D 毛笔模型[D]. 上海:华东师范大学,2014.
- [20] Cai Fenglei, Li Haisheng. Elastic cone for Chinese calligraphy[C]//Proceedings of the fifth international conference on graphic and image processing. Hong Kong:International Society for Optics And Photonics,2013.
- [21] 江浩. 中国书法习字体生成的初步研究[D]. 杭州:浙江大学,2007.
- [22] 唐瑶. 中国书法作品的风格化生成研究[D]. 长春:吉林大学,2007.
- [23] Sahu D R, Chakraborty A, Dubey R P. K-iteraled function system[J]. Fractals-Complex Geometry Patterns and Scaling in Nature and Society,2010,18(1):139-144.
- [24] Barnsley M. Fractals everywhere[M]. San Diego: Academic Press,1993.
- [25] 张锡哲. 基于迭代函数系统的书法干笔飞白仿真[J]. 东北大学学报:自然科学版,2012,33(6):774-777.
- [26] 李传峰. 基于分形技术的中国书画风格化绘制探索[D]. 长春:吉林大学,2006.
- [27] 李俊峰. 数字笔迹技术的若干问题研究[D]. 北京:中国科学院软件研究所,2006.
- [28] Wong H T F, Ip H H S. Virtual brush: a model-based synthesis of Chinese calligraphy[J]. Computers & Graphics,2000,24(1):99-113.
- [29] 白本督,张艳宁,Kam Wong,等. 基于中国书法的虚拟毛笔模型[J]. 西北工业大学学报,2008,26(3):391-394.
- [30] Xu Songhua, Tang Ming, Lau F, et al. A solid model based virtual hairy brush[J]. Computer Graphics Forum,2002,21(3):299-308.
- [31] 徐颂华,徐从富,刘智满,等. 面向电子书画创作的虚拟毛笔模型[J]. 中国科学:E 辑,2004,34(12):1359-1374.
- [32] 孙美君,孙济洲,王征,等. 3D 实用毛笔模型的物理仿真[J]. 天津大学学报,2008,41(3):293-299.
- [33] Chu N S H, Tai C L. Real-time painting with an expressive virtual Chinese brush[J]. IEEE Computer Graphics and Applications,2004,24(5):76-85.
- [34] Chu N S H, Tai C L. An efficient brush model for physically-based 3D painting[C]//Proceedings of the 10th Pacific conference on computer graphics and applications. Beijing: IEEE Press,2002:413-421.
- [35] 殷婷婷. 基于力反馈技术的毛笔建模仿真研究[D]. 大连:大连理工大学,2013.
- [36] 么丽欣,孙济洲,孙美君. 基于经验的中国水墨画毛笔笔道的仿真[J]. 电子测量技术,2007,30(10):38-41.
- [37] 邓学雄,翁颖欣,章文. 基于笔法模型的国画干笔飞白模拟[J]. 图学学报,2013,34(6):93-97.
- [38] 章文. 国画中干笔飞白的计算机仿真[D]. 广州:华南理工大学,2010.
- [39] 邓学雄,李牧,章文,等. 基于笔法模型的国画一笔多色模拟[J]. 图学学报,2012,33(6):98-102.
- [40] Deng Xuexiong, Zhang Wen, Zhang Zhiyao. Computer simulation of CIE-lhs color model in multi-color effect[C]//Proceedings of 2009 IEEE international conference on computer-aided industrial design & conceptual design. Wenzhou, China:[s. n.], 2009:1321-1324.
- [41] 邓学雄,章文,张志尧,等. 国画一笔多色的计算机模拟[J]. 工程图学学报,2010,31(2):134-138.
- [42] 宓晓峰,唐敏,林建贞,等. 基于经验的虚拟毛笔模型[J]. 计算机研究与发展,2003,40(8):1244-1251.

中国书画中干笔飞白仿真方法概述

作者：[侯增选](#)，[郑栓柱](#)，[郭超](#)，[杨广卿](#)，[HOU Zeng-xuan](#)，[ZHENG Shuan-zhu](#)，[GUO Chao](#)，[YANG Guang-qing](#)

作者单位：[大连理工大学 机械工程学院, 辽宁 大连, 116024](#)

刊名：[计算机技术与发展](#)

英文刊名：[Computer Technology and Development](#)

年，卷(期)：2015, 25(11)

引用本文格式：[侯增选](#). [郑栓柱](#). [郭超](#). [杨广卿](#). [HOU Zeng-xuan](#). [ZHENG Shuan-zhu](#). [GUO Chao](#). [YANG Guang-qing](#) 中国书画中干笔飞白仿真方法概述[期刊论文]-[计算机技术与发展](#) 2015(11)