

面向电子书画创作的虚拟毛笔模型*

徐颂华 ** 徐从富 ** 刘智满 ** 潘云鹤 **

(浙江大学 CAD&CG 国家重点实验室, 杭州 310027; Computer Science Department, Yale University, New Haven, Connecticut 06511, USA; 香港大学计算机科学系, 香港)

摘要 如何设计一个与用户友好交互、实时响应, 并且具有丰富艺术表现力的基于虚拟画笔的绘图环境是计算机图形学和计算机人机交互领域长期以来研究的热点与难点问题. 提供对艺术作品电子化创作的软件环境的支持不仅富有理论研究价值, 而且有着广阔的市场应用前景, 同时对信息时代中国传统艺术的创新与电子化变革有着重要的意义. 文中提出了面向书画创作的基于实体造型技术的虚拟毛笔的模型以及利用它进行交互式电子书画创作的计算模拟框架. 根据上述模拟框架, 并研发了一个面向交互式电子书画创作的虚拟毛笔原型系统. 实验结果表明, 用户可以利用虚拟毛笔创作出艺术表现力非常丰富的电子书画作品. <http://www.cs.hku.hk/~songhua/e-brush/>提供了有关这一研究课题最新进展的资料.

关键词 虚拟毛笔 电子书画创作 计算机模拟 实体造型 非真实感绘

中国书法与绘画(简称书画)历史悠久, 源远流长, 是中国传统艺术中一朵艳丽的奇葩, 也是世界艺术史上不可多得的瑰宝^[1]. 如何设计一个与用户友好交互、实时响应, 并且具有丰富艺术表现力的基于虚拟画笔的书画创作系统是计算机图形学和计算机人机交互领域长期以来研究的热点与难点问题^[2~10]. 研制虚拟毛笔系统, 借助它在计算机上直接进行全电子化的东方书画创作更是近年来计算机图形学研究中的一个热点问题. 如无特殊说明, 本文所说的虚拟画笔即指虚拟毛笔. 本文面向电子书画创作, 提出了基于实体造型技术的虚拟毛笔模型, 并且基于这一模型设计了支持交互式电子书画创作的计算模拟框架. 根据这些算法我们研发了一个面向交互式电子书画创作的虚拟毛笔原型系统^[11~13]. 实验表

2003-08-03 收稿, 2004-11-19 收修改稿

* 国家自然科学基金(批准号: 60402010)、国家重点基础研究发展规划项目(批准号: 2002CB312106)资助

** E-mail: songhua.xu@yale.edu, xucongfu@zju.edu.cn, fclau@cs.hku.hk, panyh@zju.edu.cn

明, 用户可以使用虚拟毛笔创作出艺术表现力非常丰富的电子书画作品. 与现有的虚拟画笔系统相比^[2-10], 本文介绍的系统在响应时间、人机交互的用户友好程度以及系统支持的艺术表现力等方面都有着显著的优点.

1 相关工作

围绕利用虚拟画笔进行无纸化书写和绘画创作的课题, 国内外学者已展开了大量的研究工作. 早在 1986 年, Strassmann 就提出了一个简单的画笔模型^[2]. 他将毛笔在书写与绘画过程中涉及的对象归结为四要素, 即: 笔刷(Brush)、笔划(Stroke)、蘸墨(Dip)和纸张(Paper). 其中, 笔刷是由若干笔毛(Bristles)构成的组合对象; 笔划代表毛笔在受力状态下的位移轨迹(Trajectory); 蘸墨描述了笔刷的初始状态; 纸张表示笔划所映射到的绘制平面. 虽然 Strassmann 的毛笔模型能模拟多种不同类型的笔划, 但该方法相当费时, 且无法模拟当笔刷分叉时的绘画效果. 1994 年 Hsu 等人提出了一种基于矢量化骨架笔划(Skeletal Strokes)的交互式绘画方法^[3], 并将该技术成功地应用于商业化绘图程序中. 但该方法的主要缺点是产生的笔划只适于表达类似素描的线条画, 立体感不强, 美学表现手法较为单一. 1997 年 Schlechtweg 等人提出了一种三维笔划模型(3-D Linestyles)^[4]. 该方法将光线、深度等三维信息嵌入到平面线条中. 3-D Linestyles 是一个参数化的线条模型, 它由路径(Path)和风格(Style)两部分组成, 这两者均由参数化曲线描述. 3-D Linestyles 还增加了绘图工具所受的压力(Pressure)、色彩饱和度(Saturation)等属性, 以表达笔划的粗细和亮度. 与 Hsu 提出的方法相比, Schlechtweg 的方法在生成的笔划的艺术表现力上有了较大的提高. 但通过该方法产生的笔划内的纹理变化仍欠丰富, 难以很好地支持无纸化创作东方特有的书画作品(例如中国写意画和工笔画). 1999 年 Lee 提出了一种满足弹性形变定律的虚拟毛笔模型^[5]. 他利用该模型绘制了具有中国写意画典型特征的兰花图, 收到了较好的效果. 然而与真实毛笔相比, Lee 的虚拟毛笔模型仍略显粗糙: 当整个笔头的笔毛数目很少时, 其艺术表现力将受到很大限制; 当笔毛数目较大时, 又会暴露模拟效率低、系统难以实时响应的缺点. 2000 年 Wong 等人提出了一个虚拟笔刷的模型用以模拟汉字书写过程^[6]. 其主要思想是: 以一个倒置圆锥来对毛笔笔头进行几何建模, 并通过填充虚拟毛笔与虚拟纸张之间截交产生的椭圆簇的闭包来模拟汉字的书写过程. 但是这一方法仅能用于创作黑白的书法作品, 且其几何模型较为简单, 难以完全模拟毛笔在书写过程中所可能发生的各种形变. 2001 年 Baxter 等人研究了虚拟油画笔的建模问题^[7]. 但是油画笔是硬毛质的画笔, 而中国书画创作中使用的是软毛质的画笔, 因此虚拟油画笔的研究较之虚拟毛笔的研究有着较大的不同. 2002 年 Chu 等人用弹簧系统来对虚拟毛笔的运动行为进行建模^[8]. 他们通过弹簧系统能量最小化来进行运动求解的策略较好地模拟了毛笔的小幅度形变行为, 但该

方法无法对大幅度的毛笔形变过程(如笔头分叉行为)进行模拟。而在绘画或书写草书作品时,大幅度的毛笔形变对于产生富有表现力的艺术作品是必不可少的。此外,Greene还进行了以光学元件来模拟毛笔书写效果的研究工作^[9]。纵观上述研究成果,硬件途径的成本太高,而现有的软件解决方案尚无法有力地支持用户进行交互式的无纸书画创作。

在参数化表达已有书画作品方面,国内外学者也做了大量的研究工作。Lee专门模拟了书画创作时经常出现的笔墨渗透(Diffusion)现象,并对易发生渗透现象的纸张进行了建模^[10]。Shao等人以Bezier曲线和直线段来表达汉字的轮廓信息,并且用于高精度的印刷领域^[14]。Shamir等人以参数化模型方法实现了对现有汉字表达的压缩^[15]。

本文提出了一种新的基于实体造型技术的虚拟毛笔的模型,并给出了利用该虚拟毛笔模型进行电子书画创作的模拟算法框架。本文系统的设计着眼于模拟毛笔在书写、绘画过程中的自身形变以及在这一过程中毛笔内部墨水的扩散。就虚拟毛笔的交互方式而言,用户只需对其6个旋转和平移自由度进行操作,这一点和传统的利用画笔进行美术创作的操作方式是完全一致的。较之其他需要用户直接编辑控制点或是图像特征的平面设计软件(如Adobe Photoshop),传统而自然的基于画笔的交互模式、强大的艺术表现力、对毛笔书写绘画功能的逼真模拟和实时响应是本文所介绍的软件系统的主要优点。

本文的结构如下:第二段介绍了基于实体造型技术的虚拟毛笔模型;第三段讨论了使用虚拟毛笔进行交互式书画创作的模拟算法;第四段研究了虚拟毛笔的品质参数及面向用户定制虚拟毛笔品质的问题;最后在第五段中给出了实验结果和讨论分析。

2 基于实体造型技术的虚拟毛笔模型

为了真实地对虚拟毛笔的几何形态进行建模,我们提出了“基本绘图单元”(Writing Primitive)的概念,以下简称“基元”。在本文介绍的虚拟毛笔模型中,一个完整的虚拟毛笔笔头的几何形态由若干个基元的聚合来表达。因此,利用虚拟毛笔模拟得到的书写和绘画效果就是其所有隶属基元与虚拟纸张间瞬时相互作用关于时间的累积效应。下面分别介绍基元的概念、基元的造型特征、基元的形变与分裂以及基元上墨水扩散过程的模拟。

2.1 基本绘图单元(基元)

简单地讲,一个基元代表一束笔毛,它通常是交互式书画创作过程中数据采集和计算模拟的最小单位。在本文介绍的虚拟毛笔模型中,我们将基元定义为通过广义扫掠操作(General Sweeping Operation)生成的,以NURBS曲面所描述的几

何实体,如图 1 所示.在虚拟毛笔模型中,各基元之间彼此独立行为,自主决策.在书写和绘画模拟过程中,基元根据当前的状态和运动参数动态地调整自身模型,并在虚拟纸张上留下墨迹.最终模拟生成的笔迹就是这些瞬时墨迹关于时间的累积效应.因此,毛笔笔头的行为是所有基元独立动作的综合体现.与直接以单根笔毛作为最小模拟单位的传统方法相比,我们以基元为计算粒度的虚拟毛笔的模型侧重于模拟一束笔毛的宏观统计行为特性.该方法的主要优点是,它在保证虚拟毛笔建模高度真实感的同时,避免了大量冗余的计算模拟,从而大幅度提高了系统的模拟效率及实时响应性.

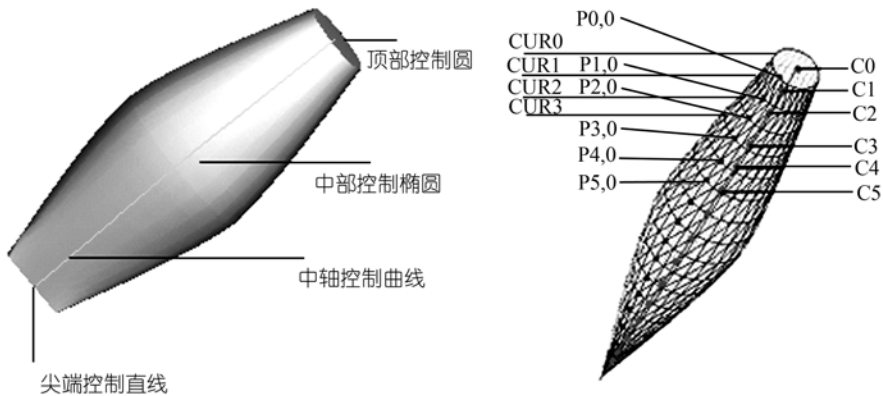


图 1 基元及其主要造型特征(左)与基元的线框结构(右)

2.2 基元的造型特征

基元的主要造型特征包括中轴控制曲线(Middle Control Axis)、顶部控制圆(Top Control Circle)、中部控制椭圆(Middle Control Ellipse)和尖端控制直线(Tip Control Line)等.在交互式书画创作之前(即系统模拟的初始状态),基元的中轴曲线、中部控制椭圆和尖端控制直线分别退化为直线、圆和点.在书写和绘画模拟过程中,除顶部控制圆外,其余三个特征均会做出相应的调整,以反映基元的形变.而笔上墨色分布也会进行相应的调整.随着笔头形变的加剧,当其累积形变程度超过某个阈值时,一个基元会分裂成若干个新的子基元.我们引入这一机制来模拟真实毛笔在书写、绘画过程中常见的笔头分叉现象.

对使用真实毛笔进行书画创作的过程观察发现,顶部控制圆的形变非常有限.所以我们假设基元中的顶部控制圆在模拟的全过程中为一个常量.下面主要讨论基元的其它三个造型特征:

2.2.1 中轴控制曲线

这一曲线是根据其所有控制点作插值而得到的.其中,控制点除了控制中轴曲线的几何形状之外,还记录墨的色彩和湿润度信息.对中轴曲线进行参数化时,每个控制点的参数值称为控制点的定位参数.所有控制点

按定位参数值递增的顺序组成中轴曲线控制点列。在书写和绘画模拟过程中,若中轴曲线与纸张所在平面的交点(称为基元的当前活性点)不在中轴曲线上现有的控制点列中,则将该活性点按其定位参数的大小插入控制点列中。当前活性点的墨色、湿润度为其所在点列中相邻两控制点的线性插值。中轴曲线的历史累积形变程度是通过其控制点列中各点从自由状态起经历的相对于笔杆底部的累积位移量来计算的。

2.2.2 中部控制椭圆 其主要特征为该椭圆的长半轴及其定位参数(即该椭圆圆心在中轴曲线上的参数位置)。考虑到一个基元如果没有分裂,则它的笔毛数目是一定的,因此我们假定该控制椭圆的面积是一定的。利用中部控制椭圆长半轴的定向,还可模拟因书写时笔毛与纸张间摩擦所造成的笔毛关于中轴曲线的不对称分布现象。

2.2.3 尖端控制直线 其主要特征为它的长度和方向矢量。初始时基元的尖端控制直线退化为一。随着书写或绘画过程的进行,因基元内每根笔毛发生分岔、扭曲,故该点逐渐变成直线。尖端控制直线和中部控制椭圆长半轴的方向一起模拟了毛笔在书写或绘画过程中的方向性。该直线的形变主要受下列因素影响:控制点列中各点的位移量、加速度、笔的湿润度、笔毛的硬度和尖端控制直线的当前长度等。

2.3 基元形变与分裂的模拟

毛笔的提、顿等动作将使基元发生形变。当基元的形变程度超过某个阈值时,基元将会自主地分裂为若干新的子基元,并相应地调整其形变程度参数。基元分裂现象的模拟主要受笔毛的硬度和数目、当前的湿润度、运动速度,纸张的平滑度以及基元的历史累积形变程度等因素综合影响。

2.3.1 基元内应力的估计 根据材料力学和流体力学的相关研究结果,本文采用以下简化的方法来估计基元内应力:

$$\gamma = sm \times e \times \|vec\| \times \overline{wet}^{-1} \times vol \times his.$$

其中, γ 为基元内应力, sm 为虚拟纸张的粗糙度因子, e 是笔毛的弹性因子, vec 是基元的运动速度, \overline{wet} 是基元的平均湿润度, vol 是基元位于虚拟纸张下部的体积, his 是基元的历史累积形变程度,它是基元三个可变造型特征(中轴控制曲线、中部控制椭圆和尖端控制直线)各自相对于初始时(即基元未发生任何形变时)的状态变化程度之和。

2.3.2 中轴控制曲线的形变 若在交互式书画创作过程中,用户控制虚拟毛笔经历了距离为 D 的位移,则当前中轴控制曲线上所有位于虚拟纸张上部的点均会发生相同量的位移。而控制曲线上所有位于虚拟纸张下部的点,则会发生

$D-dis$ 的位移, 其中, dis 取决于 γ 的大小. 这一步骤旨在模拟由于虚拟毛笔和纸张间的接触, 受到运动阻力而发生几何形变的现象.

形变后的虚拟毛笔也会在提笔时获得部分程度的形变恢复: 若用户上提已经发生形变的虚拟毛笔经过 S 的垂直距离, 则中轴控制曲线上所有因为基元内应力而发生位移的点均会经历一个额外的垂直位移, 以对之前它所经历的形变作出恢复补偿. 和形变程度一样, 该形变恢复距离也取决于 γ 的大小. 上述形变恢复过程主要是由于上提虚拟毛笔的过程中基元内应力得到缓解所触发的.

2.3.3 中部控制椭圆的形变 在基元内应力的驱动下, 中部控制椭圆的长半轴会旋转 rot 的角度, 同时它的长度会伸长为初始时的 inc 倍:

$$\begin{cases} rot = re \times \gamma \times (vec \cdot eori) \\ inc = ie \times \gamma \times \|vec \times eori\| \end{cases}$$

其中, re 和 ie 分别为基元的旋转和伸长系数, vec 为基元的运动速度, $eori$ 为当前基元中部控制椭圆的单位方向矢量. 由于在中部控制椭圆的形变过程中, 基元的笔毛数目不发生变化, 系统会同时调整中部控制椭圆的短半轴的长度, 使得该控制椭圆的总面积守恒.

2.3.4 尖端控制直线的形变 类似于中部控制椭圆, 在基元内应力的作用之下, 尖端控制直线也会发生角度为 rot 的旋转, 同时它的长度会伸长为初始时的 inc 倍.

2.3.5 基元的分裂 一种简单的系统模拟策略如下: 给定一个虚拟毛笔内应力的上界 tre . 若当前基元内应力 γ 超过这一上界时, 当前基元就会分裂为 $k = \lfloor \gamma / tre \rfloor$ 个子基元. 子基元的笔毛数目和尖端控制直线的长度各减少为分裂前的 $1/k$, 而中部控制椭圆的长、短半轴分别减少为原长的 $1/\sqrt{k}$. 这样的模拟是因为我们假设基元分裂时, 所有基元的笔毛总数不变, 并且基元的当前体积正比于基元所含的笔毛数. 此外, 在分裂过程中基元的其余造型参数均不发生变化. 图 2 是部分具有分裂笔头的虚拟毛笔的几何模型.



图 2 具有分裂笔头的虚拟毛笔的几何模型

在上述讨论中, sm , e , re , ie , tre 等系数直接影响着虚拟毛笔的力学性质及进行交互式书画创作时的最终计算模拟结果, 可称之为虚拟毛笔的品质参数. 关于

这些参数的设定和调节, 将在本文第四段中作详细地论述。

2.4 基元上墨水扩散过程的模拟

假设在书写和绘画模拟过程中毛笔的湿润度将动态变化, 而墨色始终保持不变。只有在给毛笔重新蘸墨时, 控制点的墨色才会发生变化。基元中某个控制点的湿润度变化受该点的位移量、加速度、纸张材质及其平滑度等因素的综合影响。值得注意的是, 虽然各个基元独立行为, 自主决策, 但由于运动过程中的力学作用及墨汁的流动性等因素, 各基元之间会发生彼此相互影响。此外, 本文系统还支持通过交互让用户显式地控制模拟时墨汁流动过程的操作方式, 也就是允许用户直接调整基元内中轴控制点上墨水的湿润度分布参数。

3 基于虚拟毛笔的交互式电子书写、绘画算法

3.1 虚拟毛笔的交互式控制

由于本文系统是一个用于艺术创作的应用系统, 输入设备和输入方法对该系统的应用价值有着重要的影响。目前, 它支持两种输入操作方式。其中一种方式是采用WACOM公司生产的压感笔^[16]。另一输入方式是采用键盘鼠标相结合的方式。也就是采用鼠标的平移及其中轮的旋转来采集虚拟毛笔在 X, Y, Z 三个维度上的平移操作, 并且利用键盘的若干击键消息响应来采集虚拟毛笔三个旋转自由度上的用户操作。对用户借助毛笔来书写、绘画的动作进行分析后发现, 80%以上的运笔操作仅限于改变笔的三个平移自由度。这为通过键盘鼠标相结合的方法输入对虚拟毛笔的操作提供了可行性的依据。

在上述输入方法中, 第一种可以提供舒适的用户交互, 有利于专业人士操作虚拟毛笔创作精美的电子书画作品。而第二种廉价的方法则可以让业余用户在无需任何额外硬件投资的基础上试用本文系统, 尝试无纸绘画的乐趣。此外, 较之WACOM压感笔, 更为舒适的交互手段是采用三维鼠标^[17]。使用这一设备除了可以和压感笔一样方便地对虚拟画笔的6个运动自由度进行实时采集, 而且还可以对虚拟画笔在空间中的位置进行精确定位。这是由于三维鼠标可以支持多达12个自由度上的运动采集。

此外, 为进一步提高用户操作虚拟毛笔的手感, 使他们能较舒适地通过控制虚拟毛笔来交互式地创作出精美的电子书画作品, 本文还特别引入了对虚拟毛笔运动惯性的模拟机制。本文系统通过记录过去几个邻近模拟时间片内采集到的用户输入信息计算出毛笔运动的惯性, 并且按此惯性估算出毛笔在未受任何外力作用下的运动速度与位移量。最后实际用于驱动虚拟毛笔系统模拟的毛笔运动自由度变化量, 是当前通过外设采集到的用户输入和系统在考虑了运动惯性之后估算得到的毛笔位移量的一个插值。

3.2 基元与虚拟纸张的快速求交算法

在书写和绘画模拟过程中, 在基元 WP 的模拟时间片 dT 内, 将 WP 与纸张平面 PP 求交, 从而得到当时 PP 对 WP 的剖切面 M . 对于所得到的剖切截面, 将根据 WP 的墨色、湿润度以及纸张的湿润度进行颜色填充, 即实现虚拟画笔对纸张的着色. 在具体实现时, 为了加速 PP 对 WP 的剖切操作, 我们设计了以下的基元与虚拟纸张的快速求交算法(算法 1). 显然, 对于一个基元而言, 只有与纸张平面 PP 相接触的部分才会留下笔迹. 我们在设计算法时充分利用了这一性质, 以提高快速求交算法的效率, 保证系统的实时响应性.

算法 1 基元与虚拟纸张的快速求交算法

步 1. 对当前模拟的基元 WP 内中轴控制曲线上的控制点列 $J = \{C_0, \dots, C_n\}$ 进行标准化, 即

while (若存在 J 中相邻两点 C_i 和 C_{i-1} , 其间距大于 R)
 {将 C_i, C_{i-1} 的中点插入点列 J 中;}

其中, R 为一个和当前显示分辨率有关的距离分散控制因子.

步 2. 作中轴控制曲线在 $C_i(0 \leq i \leq n)$ 各处的法平面 CP_i , 与基元相交得封闭曲线 CUR_i .

步 3. 任取基元的一条半径, 沿中轴控制曲线扫掠所得到的半曲面与 CUR_0, \dots, CUR_n 的交点分别记为 $P_{0,0}, \dots, P_{n,0}$. 将尖端控制直线等分成 $\lceil N/2 \rceil$ 份, 得结点序列 $CL = \{Q_0, \dots, Q_{\lceil N/2 \rceil}\}$. 其中 N 是另一个和当前屏幕显示分辨率有关的控制因子, $\lceil \cdot \rceil$ 是取整运算符.

步 4. 找到 $m, s, t. P_{m,0}, P_{m+1,0}$ 位于 PP 的异侧. 若 $0 \leq m \leq n-1$, 则将 CUR_m, CUR_{m+1} 按弧长等分成 N 份, 得结点序列 $CJ_m = \{P_{m,0}, \dots, P_{m,N}\}, CJ_{m+1} = \{P_{m+1,0}, \dots, P_{m+1,N}\}$. 以 $P_{m,i}$ 为起点, $P_{m+1,i}$ 为终点 ($0 \leq i \leq N$), 作线段序列 $LN_m = \{P_{m,0}P_{m+1,0}, \dots, P_{m,N}P_{m+1,N}\}$. 以 $P_{m,i}$ 为起点, $P_{m+1,i+1}$ 为终点 ($0 \leq i \leq N-1$), 作线段序列 $LM_m = \{P_{m,0}P_{m+1,1}, \dots, P_{m,N-1}P_{m+1,N}\}$. 最后加 $P_{m,N}P_{m+1,0}$ 到 LM_m 中. 若 $m = n$, 则以 $P_{n,i}$ 为起点, $Q_{\lceil i/2 \rceil}$ 为终点 ($0 \leq i \leq N$), 作线段序列 $LN_m = \{P_{n,0}Q_0, \dots, P_{n,N}Q_{\lceil N/2 \rceil}\}$. 以 $P_{n,i}$ 为起点, $Q_{\lceil (i+1)/2 \rceil}$ 为终点 ($0 \leq i \leq N-1$), 作线段序列 $LM_m = \{P_{n,0}Q_0, \dots, P_{n,N-1}Q_{\lceil N/2 \rceil}\}$. 最后将 $P_{n,N}Q_0$ 加入 LM_m 中. 若找不到满足条件的 m , 则该次线框化过程结束.

步 5. 对 $\forall j(0 \leq j \leq N)$, 若 $P_{m,j}, P_{m+1,j}$ 均位于 PP 的异侧, 则算法进入下一步. 否则, 不妨设 $t = \max\{e | \forall k(0 \leq k \leq e), P_{m,k}, P_{m+1,k}$ 均位于 PP 的异侧}. 这时我们将 CUR_{m+1}, CUR_{m-1} 等分成 N 份, 得结点序列 CJ_{m+1}, CJ_{m-1} . 下面仅需考虑 $P_{m+1,t+1}, P_{m-1,t+1}$ 与 $P_{m,t}$ 关于 PP 的位置关系. 若 $P_{m+1,t+1}, P_{m-1,t+1}$ 之间有一点与 $P_{m,t}$ 位于 PP 异侧, 不妨设为 $P_{m-1,t+1}$. 则令 $m = m-1$, 然后返回步 5 的起始点重新执行. 否则三点 $P_{m+1,t+1}, P_{m-1,t+1}$ 与 $P_{m,t}$ 均位于 PP 的同侧. 不失一般性, 设 $P_{m+1,t+1}$ 较之 $P_{m-1,t+1}$

更接近于平面 PP , 则按弧长等分 CUR_{m+2} 成 N 份, 求结点序列 CJ_{m+2} . 再考虑 $P_{m+2,t+1}$ 的情况, 依次类推, 直至找到 $l = \min\{w|P_{w,t+1}, P_{m,t} \text{ 位于 } PP \text{ 的异侧}\}$. 一旦找到满足条件的 l , 则令 $m = l$, 然后返回步 5 的起始点重新执行. 不难发现对于不同的 $P_{m,j}$ 中的不同 j , 与之相应的 m 并非总是相等. 故严格地说, 应将 $P_{m,j}, P_{m+1,j}$ 表示成 $P_{m(j),j}, P_{m(j)+1,j}$. 但为了简洁起见, 本文采用缩写的表示方法.

步 6. 经上述处理, 可得两个点列 $PO_1 = \{PO_{1,1}, \dots, PO_{1,n_1}\}, PO_2 = \{PO_{2,1}, \dots, PO_{2,n_2}\}$. 同一点列中任意两点均在 PP 的同侧, 不同点列中任意两点均在 PP 的异侧, 且点列中任意一点 $PO_{g,h}$ 必在某条 CUR_i 曲线上的结点序列 CJ_i 中, 即: $PO_{g,h} \in CJ_0 \cup CJ_1 \cup \dots \cup CJ_n (g = 1, 2; h = 1, 2, \dots, n_g)$. 对于 PO_1, PO_2 中的任意一点, 找到其所在对应封闭曲线 CUR_m 上的结点序列 CJ_m 中位置. 不妨设为 $P_{m,j}$. 若墨色按某一矢量方向分布, 则由 $P_{m,j}$ 与 CUR_m 所对应的控制点 C_m 之间的距离矢量 $P_{m,j}C_m$ 与 C_m 上携带的颜色变化矢量 D_m 的积可决定 $P_{m,j}$ 上的颜色值, 即

$$P_{m,j}.color = (\langle P_{m,j}C_m \cdot D_m \rangle + 1) \times C_m.color. \quad (1)$$

其中, $P_{m,j}.color$ 和 $C_m.color$ 分别是 $P_{m,j}$ 和 C_m 上的颜色值.

若墨色呈辐射状分布, 则根据当前结点 $P_{m,j}$ 与 CUR_m 所对应的控制点 C_m 的空间距离 $\|P_{m,j} - C_m\|$ 与 C_m 上携带的颜色变化标量 dm 可决定 $P_{m,j}$ 上的颜色值, 即

$$P_{m,j}.color = (\|P_{m,j} - C_m\| \times dm + 1) \times C_m.color. \quad (2)$$

3.3 基于虚拟毛笔的交互式书画创作笔迹绘制算法

在按照算法一建立了虚拟毛笔模型之后, 就可以利用它作为交互式绘图工具, 进行书画创作. 基于虚拟毛笔进行交互式书画创作的笔迹绘制算法如下:

算法 2 基于虚拟毛笔的交互式书画创作笔迹绘制算法

步 1. 对算法一中得到的两个点列 $PO_1 = \{PO_{1,1}, \dots, PO_{1,n_1}\}, PO_2 = \{PO_{2,1}, \dots, PO_{2,n_2}\}$, 不失一般性, 不妨设 $n_1 > n_2$. 连接 $PO_{1,i}$ 与 $PO_{2,j}$ 得线段 LO_i , 其中 $i = 1, \dots, n_1; j = \lfloor i/n_1 \times n_2 \rfloor$; $\lfloor x \rfloor$ 为不小于 x 的最小整数. 将所得的各条线段 $LO_i (i = 1, \dots, n_1)$ 分别与虚拟纸张平面 PP 求交得交点 S_i . 同样地, 连接 $PO_{1,i}$ 与 $PO_{2,j+1}$ 得线段 LO'_i , 并将其与虚拟纸张平面求交得交点 S'_i . 对上述所有交点 (即 $S_i (i = 1, \dots, n_1)$ 与 $S'_i (i = 1, \dots, n_1)$) 按序排列, 则形成了当前的笔迹绘制多边形 $Poly = \{V_1, \dots, V_{2 \times n_1}\}$. 我们用此多边形来近似表示基元与虚拟纸张之间所形成的不规则剖面轮廓线. 参见图 3 所示的基元线框化结果及笔迹绘制多边形.

步 2. 对任意多边形 $Poly$ 的顶点 V_i , 不妨设它是以 $PO_{1,s}, PO_{2,t}$ 为端点的线段与 PP 相交所得, 则可计算 V_i 上的墨色信息 $V_i.pro$:

$$V_i.pro = \frac{\|PO_{1,s} - V_i\| \times PO_{2,t}.pro + \|PO_{2,t} - V_i\| \times PO_{1,s}.pro}{\|PO_{1,s} - PO_{2,t}\|}, \quad (3)$$

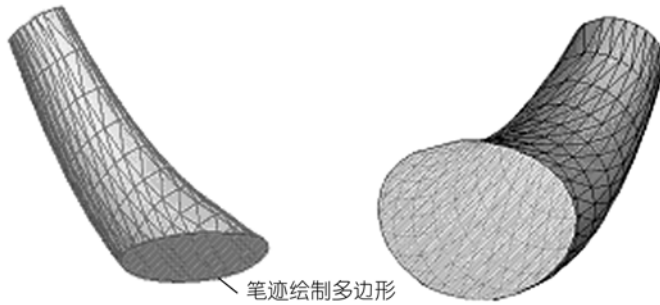


图 3 基元的线框化结果及笔迹绘制多边形

其中, $V_i.pro$ 是包含 V_i 上墨水颜色值与湿润度的一个矢量, 以下相同.

步 3. 以过笔迹多边形 $Poly$ 各顶点 V_i 的水平线与垂线对 $Poly$ 做网格划分. 再以 RR (一个和当前显示分辨率有关的距离分散控制因子) 作进一步的加密划分. 记 V_i 的 x,y 坐标分别为 $V_{i,x}$ 和 $V_{i,y}$. 对任意 n , 若 $\|V_{n,x}-V_{n-1,x}\|>RR$, 求直线 $X = (V_{n,x}+V_{n-1,x})/2$ 与 $Poly$ 的交点, 并将其作为新的顶点插入 V_n, V_{n-1} 之间; 重复以上操作, 直至无新点需要插入. 对于 $\|V_{n,y}-V_{n-1,y}\|>RR$ 的情况, 也做类似处理.

步 4. 对步 3 中产生的任意非多边形 $Poly$ 边界上的网格点 NP , 不妨设该点是由线段 $V_a V_b$ 与 $V_c V_d$ 相交所得, 则可计算 NP 上的墨色信息 $NP.pro$:

$$NP.pro = \frac{1}{2} \times \left(\frac{\|V_a - NP\| \times V_b.pro + \|V_b - NP\| \times V_a.pro}{\|V_a - V_b\|} + \frac{\|V_c - NP\| \times V_d.pro + \|V_d - NP\| \times V_c.pro}{\|V_c - V_d\|} \right). \quad (4)$$

步 5. 网格划分后, 记多边形 $Poly$ 内的各个小区域 $Area_i$ 的顶点为 $P_{i,1} P_{i,2} P_{i,3}$ 或 $P_{i,1} P_{i,2} P_{i,3} P_{i,4}$. 对位于 $Area_i$ 中的任意一点 (i, j) 的墨色信息, 可由该区域所有顶点上的墨色信息进行双线性插值得得.

步 6. 设 t 时刻基元 WP_k 内的平均湿润度为 $wet_{k,t}$, 平均压力为 $pre_{k,t}$. WP_k 包含笔毛数为 num_k . WP_k 的所有中轴控制点的平均加速度为 $dS_{k,t}$. 纸张对墨的吸收率为 $absor$. 记时刻 t 虚拟纸张上点 $P_{i,j}$ 处的纸面湿润度为 $Pwet_{t,i,j}$. $P_{i,j}$ 在 t 时刻被选中进行绘制的概率 $prob_{t,i,j}$ 可由以下公式计算得到

$$prob_{t,i,j} = (\beta_1 \times wet_{k,t} + \beta_2 \times Pwet_{t,i,j}) \times absor \times pre_{k,t} \times (dS_{k,t})^{-1} \times num_k. \quad (5)$$

若 $P_{i,j}$ 被选中进行绘制则其湿润度将增加 $dH_{t,i,j}$:

$$dH_{t,i,j} = \beta_3 \times (wet_{k,t} + Pwet_{t,i,j}). \quad (6)$$

在上述公式中, $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ 是毛笔的三个品质参数 (关于虚拟毛笔品质参数及其面向用户的个性化定制过程详见本文第四段中的论述). 经扩散后, 若该点的湿润度超过上限阈值 top , 则可能发生渗透现象. 假设墨水仅在 8 个方向上扩散,

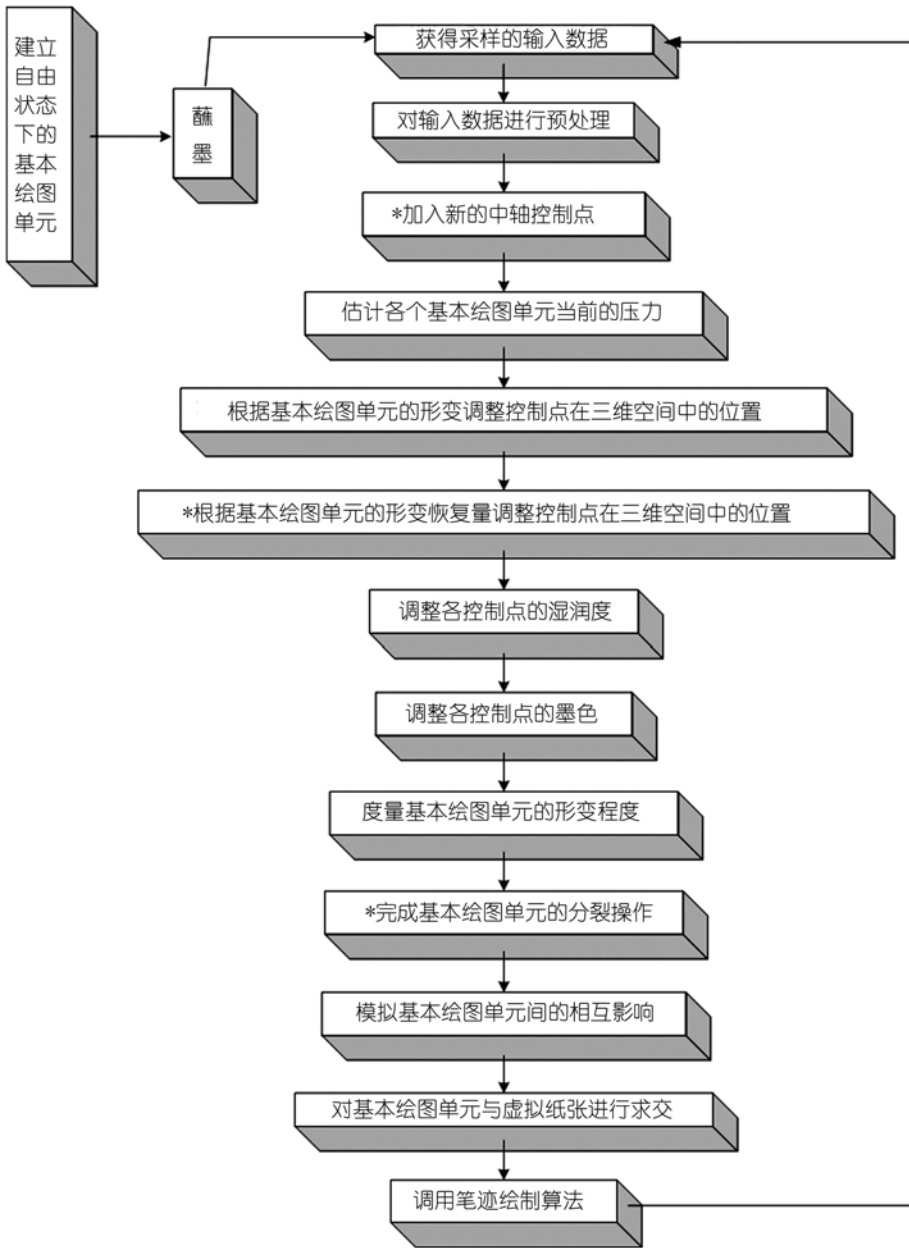


图 4 基于虚拟毛笔的交互式书画创作的计算模拟框架

则与 $P_{i,j}$ 相邻的 8 个点 $P_{m,n}$ 的湿润度 $Pwt_{m,n}$ 在时刻 t 的增加值 $\Delta wet_{t,m,n}$ 为

$$\Delta wet_{t,m,n} = random() \times (Pwet_{t,i,j} + dH_{t,i,j} - top) \times facw_{t,i,j}^{-1} \times (1 - Pwet_{t,m,n} / top). \quad (7)$$

其中, $m = i-1, i, i+1; n = j-1, j, j+1; (m, n) \neq (i, j); facw_{t,i,j}$ 为该 8 个相邻点的湿润度

对 P_{ij} 点处发生渗透现象的抑制因子, 即

$$facw_{i,j} = 8 - (Pwet_{i-1,j-1} + Pwet_{i-1,j+1} + Pwet_{i-1,j} + Pwet_{i+1,j+1} + Pwet_{i+1,j-1} + Pwet_{i+1,j} + Pwet_{i,j-1} + Pwet_{i,j+1}) / top. \quad (8)$$

在上述公式中, $random()$ 为一个取值在 $[0, 8]$ 之间的随机数, 其分布的数学期望为 1. 此外, 另有一个纸张的干燥参数 Dry . 每经过一个系统模拟时间片 dT , 虚拟纸面上所有点的湿润度都会自动减小 Dry , 直至为 0.

步 7. 为充分模拟书写和绘画时经常出现的枯笔和飞白效果, 对步 6 中每个被选中进行绘制的点再做筛选, 即通过计算一个 $harsh$ 值, 实现到某个纹理图案的映射. 若被映射到的点的灰度值为 gr , 该纹理图案中的最大灰度值为 gr_max , 则该点被再次选中的概率为 gr/gr_max . 这样就可以利用现有的纹理图案对墨迹分布进行控制. 在做筛选映射时, 也可由计算机为不同的点的映射过程随机选择待映射成的纹理坐标. 此外, 在对墨色分布进行随机模拟的过程中, 还加入了下面的 $token$ -bucket 算法来提高枯笔和飞白效果的逼真度: 根据当前的笔毛数目, 产生一个分段因子 fra . 初始时, $bucket$ 中的 $token$ 数为 0, 若某点被选中, 则下面连续 fra 个点均被一次性选中进行绘制, $bucket$ 中的 $token$ 数置为 $fra-1$; 继续后续点的选择, 每一次满足选中条件, 则 $bucket$ 中的 $token$ 数递减 1, 但该点不会进入绘制阶段, 直至 $bucket$ 中的 $token$ 数重新为 0 才允许下一个连续的 fra 个点被选中进行绘制.

基于上述算法 1、算法 2 的使用虚拟毛笔进行交互式电子书画创作的完整的计算模拟框架如图 4 所示. 其中带星号*的步骤只有在相应的条件满足时才被执行.

4 虚拟毛笔的品质参数及面向用户的毛笔品质定制

众所周知, 毛笔由软毛制成. 不同毛笔在书写或绘画过程中表现出较大的品质差异. 例如, 含笔毛数目较多的毛笔蘸墨也较多, 其饱和度也较大; 而对于笔毛很长的毛笔, 其笔毛的扭曲变形程度会很大. 在本文虚拟毛笔模型中, 引入了用户可调的多个品质参数(Quality Parameters), 以供仿真不同种类、特性的毛笔. 这些品质参数将会直接影响到最终由虚拟毛笔生成的书画作品的效果. 类似地, 本文也引入了一些品质参数用于仿真不同类型的虚拟纸张的特性. 在本文系统中建立了一个品质参数配置数据库, 用户可根据实际需要或个人喜好选用合适的品质参数配置. 此外, 用户也可以通过与系统的交互对虚拟毛笔的品质参数进行调整. 为此, 本文系统还为用户提供了一个能可视化地调整这些参数的交互界面. 最后, 本文系统还特别设计了一个自适应的参数训练模块, 可以由系统自动调整虚拟毛笔及虚拟纸张的品质参数配置, 以符合用户需求.

这个自适应参数训练模块的工作原理如下: 系统自带一些典型的书画作品

中经常出现的笔划样本。训练时, 用户使用本文系统临摹这些样本笔划。然后衡量根据用户输入模拟生成的笔划效果和训练样本之间在 RGB 空间的距离, 并以此作为训练的目标函数。之后优化系统中虚拟毛笔及虚拟纸张的品质参数的配置, 最小化目标函数。这一优化过程就是计算机根据不同用户的运笔习惯, 为用户自动定制虚拟毛笔及虚拟纸张品质参数的训练过程。

5 实验结果与讨论

基于上述算法, 我们实现了一个基于虚拟毛笔的书画创作软件系统。用户可以借助它进行无纸化的书画创作。图 5 为运行中的软件系统, 图 6 是两个用该系统生成的中国画作品。本文系统中各模块耗时比例的实测结果为: 笔头模型绘制渲染过程占所耗机器时间的 30%, 颜料模型的模拟计算即电子书画过程中对虚拟纸张着色的模拟占 25%, 虚拟毛笔动力学模拟占 20%, 虚拟毛笔几何模型的创建和运行时的模型更新占 15%, 其余运算耗时总和约占 10%。

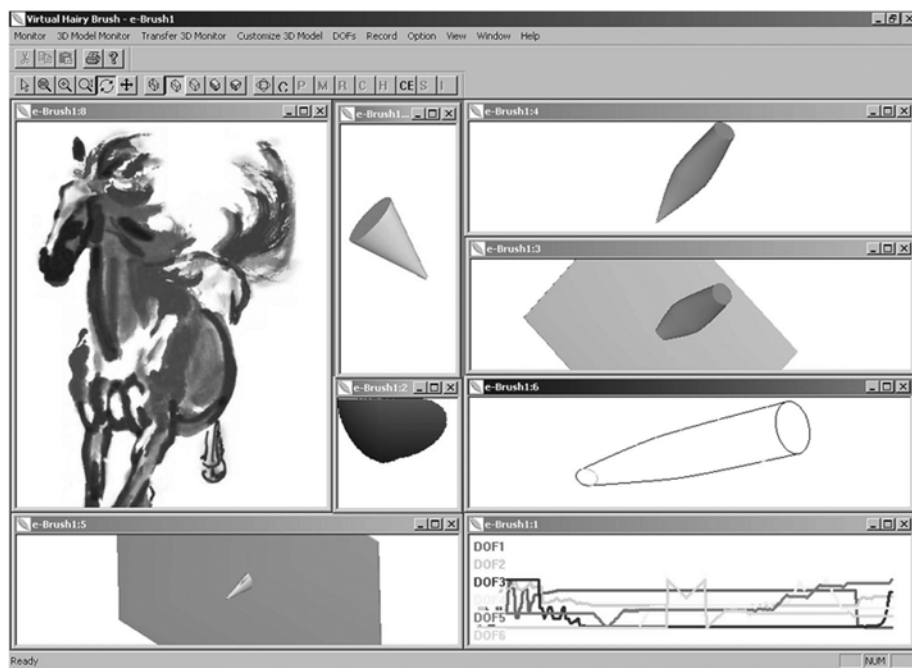


图 5 基于虚拟毛笔的书画创作软件系统运行界面

本文中的基于实体模型的虚拟毛笔能够出色地模拟多灰度、飞白、渗透等艺术效果, 使得它在模拟中国书法、水墨山水画、写意画等方面都具有较强的实用性。当控制点除了记录墨色浓淡信息之外, 还记录墨的色彩值时, 就可支持工笔花鸟画、水彩画等艺术作品的交互创作。如果调节笔毛的硬度, 该系统也可在一

定程度上模拟硬笔的书画效果.

本文提出的基于实体造型技术的虚拟毛笔的模型, 以及利用其进行交互式电子书画创作的算法模拟框架的主要优点是:

(1) 本文引入了基元的概念, 用少数基元来替代大量的笔毛, 以此作为书画模拟的最小单位, 故可避免对虚拟毛笔中的所有单根笔毛的行为进行大量冗余模拟. 相应地, 本文提出了较为精确的动力学及笔墨渗透模拟过程以捕捉笔毛簇的宏观行为, 从而大大加速了虚拟毛笔的书写与绘画的效率, 确保了本文系统的实时响应性. 在书写楷书、隶书和绝大多数行书时, 只用到 1 个基元, 即使在书写狂草时, 50 个就足够了.

(2) 以 NURBS 表达的基元替代传统的简单画笔模型^[2,5,6,8], 绘图基元与纸张相交产生的非规则平面区域较之椭圆提供了瞬时笔迹的形状多样性. 这一模拟更加符合实际物理情况, 大大提高了绘制笔迹轮廓的真实感.

(3) 绘图基元的中轴曲线上各控制点均内嵌有墨色信息, 这使得即使只使用一个绘图基元, 也能表达复杂的墨色浓度、色彩和湿润度的分布. 除了表达方式结构紧凑的优点之外, 利用基元对笔墨渗透现象进行模拟还可以大大增强系统所支持的艺术表达力, 以及提供对数据结构进行高效率操作的实现途径.

(4) 利用概率来控制虚拟纸张上的着墨过程, 这有利于增强所创作的电子书画作品的美学效果.

(5) 在书写和绘画模拟时, 引入了虚拟毛笔运动惯性的模拟机制, 这使得虚拟毛笔的行为更加灵活, 从而提高了用户操作虚拟毛笔的手感.

(6) 由于本文的模拟框架是建立在参数化虚拟毛笔基础之上, 因此不再需要用户交互式地人为指定书画过程中虚拟画笔的大量几何参数和运动参数, 而是在实时采集虚拟毛笔运动的六个自由度上的变化信息之后, 由计算机进行全自动模拟. 这有助于将用户从繁琐的参数设置任务中解脱出来, 使得他们能够集中精力进行电子书画创作.

(7) 本文系统为用户提供了一个定制虚拟毛笔品质的交互界面, 使他们能够通过手动或自动方式来调整这些品质参数.

(8) 本文系统的所有组成部分(包括虚拟毛笔模型、用户的 6 个自由度输入, 甚至是最终生成的笔划)都已参数化. 正因为本文系统中的电子书画表达和模拟具有参数化的特性, 故不再需要存储大量的位图, 从而极大地节省了内存空间, 使得电子书画创作过程的完全参数化成为可能. 基于这个优点, 我们的方法可以进一步应用于基于参数化表示的动漫创作, 以及书画风格的高层语义分析等应用领域.

未来的主要工作是如何基于本文系统研发电子书画辅助教学环境. 在将来的书画教学中, 学习资料可以不再是二维的字帖, 取而代之的将是三维的动画场

景. 供学员临摹的素材, 不仅是书画大师们最终的墨宝, 更有他们在创作过程中如何用笔的完备资料. 计算机还可以智能地充当教师, 指正学员在临摹过程中出现的用笔不当之处. 此外, 通过本文系统创作出的书画作品在本质上是完全参数化的. 这一特点能够很好地支持后期编辑、复用以及基于参数化的国画作品表达, 从而可创作出带有国画风格的动画短片. 这些高级功能都是真实的毛笔所难以支持的. 此外, 开发一个计算机辅助智能书画创作系统也很有挑战性^[18]. 最后, 如何集成更多智能化的交互手段, 提供更为亲切、廉价的人机交互接口等都是富有实用与理论价值的研究方向.



图 6 奔马图(左)与鹦鹉(右)

致谢 感谢审稿专家对本文提出的宝贵修改意见. 并对多位两院院士、中国科协的专家们在过去四年中就本研究课题提出的大量建设性意见以及陈健松协助本文的排版, 一并致谢.

参 考 文 献

- 1 李泽厚. 美学三书(第一部: 美的历程). 合肥: 安徽文艺出版社, 1999
- 2 Strassmann S. Hairy brush. Proceedings of SIGGRAPH'86, Dallas: USA, 1986. 225~232
- 3 Hsu S C, Lee I H H. Drawing and animation using skeletal strokes. Proceedings of Siggraph'94, Orlando: USA, 1994. 109~118
- 4 Schlechtweg S, Raab A. Rendering line drawings for illustrative purpose. In: Strothotte T, Wagener H, eds. Abstraction in Interactive Computational Visualization: Exploring Complex Information Space. Springer-Verlag, 1997
- 5 Lee J. Simulating oriental black-ink painting. IEEE Computer Graphics and Applications, 1999, 19(3): 74~81 [\[DOI\]](#)
- 6 Wong H T F, Ip H H S. Virtual brush: A model-based synthesis of Chinese calligraphy. Computers & Graphics, 2000, 24(1): 99~113
- 7 Baxter B, Scheib V, Lin M, et al. DAB: Interactive haptic painting with 3D virtual brushes. Proceedings of

- SIGGRAPH'01, Los Angeles: USA, 2001. 461~468
- 8 Chu N, Tai C. An efficient brush model for physical-based 3D painting. Proceedings of Pacific Graphics'02, Beijing: China, IEEE Press, 2002
 - 9 Greene R. The drawing prism: a versatile graphic input device. Proceedings of SIGGRAPH'85, San Francisco, USA, 1985. 103~109
 - 10 Lee J. Diffusion rendering of black ink paintings using new paper and ink models. Computers & Graphics, 2001, 25(2): 295~308[DOI]
 - 11 Xu S, Tang M, Lau F C M, et al. A solid model based virtual hairy brush. Proceedings of Eurographics'02, Saarbrücken: Germany, 2002. 299~308
 - 12 Xu S, Tang M, Lau F C M, et al. A Solid Model Based Virtual Hairy Brush. Technical Report, HKU-CSIS-TR-2002-04, Department of Computer Science, The University of Hong Kong, 2002
 - 13 Xu S, Lau F C M, Tang F, et al. Advanced design for a realistic virtual brush. Proceedings of Eurographics'03, Granada: Spain, 2003. 533~542
 - 14 Shao L, Zhou H. A new contour fill algorithm for outlined character image generation. Computers & Graphics, 1995, 19(4): 551~556[DOI]
 - 15 Shamir A, Rappoport A. Quality enhancements of digital outline fonts. Computers & Graphics, 1997, 21(6): 713~725[DOI]
 - 16 Wacom Technology Co. <http://www.wacom.com/>
 - 17 Bernd F, John P, Jurgen W, et al. Cubic-Mouse-Based Interaction in Virtual Environments. IEEE Computer Graphics & Applications, 2000, 20(4): 12~15
 - 18 Xu S, Lau F C M, Cheung K W, et al. Automatic Generation of Artistic Chinese Calligraphy. Proceedings of the Nineteenth National Conference on Artificial Intelligence and the Sixteenth Conference on Innovative Applications of Artificial Intelligence (AAAI/IAAI), San Jose: USA, 2004. 937~942