

# 水墨画仿真中画笔的行为实现

李丹 孙美君 孙济洲

(天津大学计算机科学与技术系, 天津 300072)

**摘要** 对中国水墨画进行仿真研究是计算机艺术领域的一个具有挑战性的课题。本文基于对水墨画感性艺术效果图形的分析, 建立起画笔模型, 并对其进行数字化、标准化处理。通过初始化不同画笔的数据结构, 使用户通过鼠标、键盘、电子画笔等输入设备, 生成交互式的、可控制的、结构化的水墨典型艺术效果。试验结果表明, 该算法较为成功地实现了对水墨画笔的仿真。

**关键词** 画笔模型 水墨艺术效果 Bresenham 算法

中图法分类号: TP391.9 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2004)02-0184-06

## The Realization of Brush in the Simulation of Chinese Ink Wash Drawing

LI Dan, SUN Mei-jun, SUN Ji-zhou

(Department of Computer Science and Technology, Tianjin University, Tianjin 300072)

**Abstract** One of the most challenging work in computer art research field is to studies of the simulation of Chinese ink wash drawing. On the basis of the graphical analysis to the sensible art effects of ink wash drawing, this paper extracts the typical artistic effects which can represent the characters of Chinese ink wash drawing. Then we set up a brush model, and digitize and standardize it. In order to produce the interactive controllible and structured ink wash drawing effects with simple input instrument shcu as the mouse, keyboard and electronic pen, we initialize different data structure of brush to simulate different brushworks. In order to realize the daedal effects of the real brush, we change the state of the brush continually during the course of drawing. In this paper, more attention is focused on the simulation of special effects such as side edge of brush, and finally we realize a fine interactive system. The experiment results indicate that this algorithm simulates the Chinese ink wash brush successfully.

**Keywords** brush model, ink wash drawing effects, beshenham algorithm

## 1 引言

水墨画——朴素抽象, 富于暗示的画风, 是用墨的线条即笔法来表现的“素描”和根据墨的浓淡层次表现出物体的量感和空间。

中国水墨画利用毛笔灵活多变的笔法, 或抑扬顿挫, 或轻重缓急, 或干湿浓淡地在宣纸上创造出富有魅力的、千变万化的点和线, 以抒发自己不同的思想情感。水墨画常见的笔法有中锋、侧锋、藏锋、逆锋、散笔等, 运笔施墨时, 由于疾徐(速度)、提按(力度)、中偏(角度)、顺逆(向度)、浓淡(色度)、枯润(湿

度)等因素的参与, 可以发生更丰富的变化, 形成更多层次的组合交响。但是中国画的笔墨也具有一定的程序性和符号性。通过仔细分析可以发现, 中锋和侧锋是最基本的两种笔法, 结合用笔力度、向度、速度等的变化, 可演化为其他几种笔法。所以, 为了便于对毛笔进行行为仿真, 将笔法归纳为两种简单的基本笔法——中锋和侧锋。

中国水墨画的用墨, 主要是运用墨色变化的技巧。由于笔中含水墨量的差异, 便产生了干、湿、浓、淡的变化。以墨代色, 产生了墨分五色的说法, 唐张彦远《历代名画记》曰:“运墨而五色具”。五色, 即焦、浓、重、淡、清, 而每一种墨色又有干、湿、浓、淡的变化。

中国水墨画,正是依靠了毛笔运动的灵活多变和水墨的丰富性,留下斑斑迹象,在纸面上形成有艺术意味的黑白构成。因此,在水墨画仿真<sup>[1]</sup>中,对水墨画笔模型体系进行科学、合理地抽象与划分是至关重要的。本文基于长期的绘画实践,建立起具有一定数据结构的画笔仿真模型,通过初始化不同的数据结构,并在行笔过程中不断进行修整,实现了水墨画笔计算机仿真交互系统。

## 2 画笔模型

### 2.1 模型建立

画笔用笔毛为模型,在描述笔道方向上有所发展,并且可画出具有墨迹笔刷笔迹的真实感图形<sup>[2]</sup>。真实的毛笔是由笔毛组成的,每一根笔毛都有它自己的位置、颜色和墨水量等参数信息。在本文所建立的画笔模型中,把画笔看成是由若干特性参数组成的一个数据结构,即在确定的时间空间坐标下画笔的状态,而笔毛的整体作用效果则转化为对画笔数据结构的处理。未经处理的初始画笔模型如图 1 所示。模型数据结构中的 Color 结构由 Red、Green、Blue 和 Alpha 4 个成员组成,其中 R、G、B 用来存储颜色信息,Alpha 则表示画笔模型各部分的透明程度,直接影响了生成笔迹的质量。水墨画中千变万化的墨色效果可以通过 R、G、B 及 Alpha 4 个分量的灵活组合来体现;在水墨画创作过程中,画家会随不同艺术效果的要求和自己的笔感,对毛笔进行提、压等操作,通过研究真实毛笔行为对压力的响应,我们发现,改变毛笔的压力值能产生扩展和接触两种不同的效果(如图 2 所示),其中,扩展是指增大压力可使笔毛扩展得更宽;接触是指增大压力可使更多的笔毛与纸接触。



图 1 初始画笔模型

图 2 毛笔行为示意图

即改变压力后,所得笔划的宽度和颜色的深度会对压力直接作出响应。因此在画笔模型数据结构中定义了 pressure 和 Brushsize 结构,pressure 接收输入设备传递的压力信息,影响和改变 Brushsize 和 Color 结构的值,从而控制笔迹的宽窄和深浅。这样的画笔模型就能够较为完整地描述水墨画笔的各种特性参数,通过对模型数据结构的多种运算可以

实现对水墨画笔行为的模拟。

### 2.2 模型优点

在现有软件中,尚没有一个真正适合水墨画创作的软件。纵然是绘图功能非常强大的 Photoshop,对一些特殊水墨效果的实现,也有一定难度,如水墨变化丰富的侧锋、飞白等效果,还有单笔扩散、多笔次叠加等。而这里的仿真模型恰恰在这些方面具有优势,可以通过对画笔数据结构的处理来实现颜色和透明度变化丰富的侧锋效果;可以充分利用数据结构各个特性分量的变化消除尖锐的边界,解决走样问题;画笔模型中灵活改变透明度 Alpha,可以模拟晕染的效果以及体现多笔次叠加中水墨画的不可覆盖性。在笔法的多变性方面,甚至可以超越真实的毛笔。

### 2.3 系统结构

画笔行为仿真模型实现的系统框图如图 3 所示,按两个基本步骤去完成。首先是落笔之前按既定的艺术效果对初始画笔数据结构的处理;其次是落笔后,运笔过程中,怎样控制画笔运行轨迹,画出蕴涵水墨韵味的平滑曲线,从而实现系统的交互性和易行性。

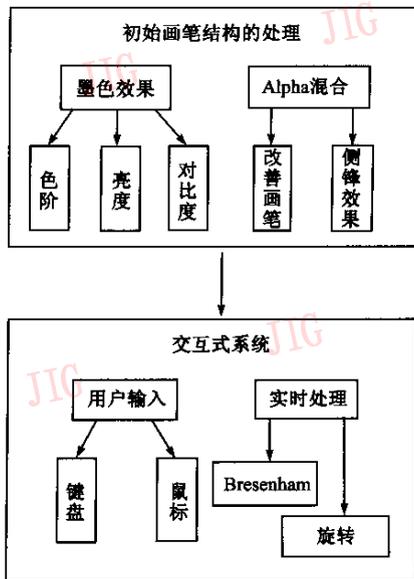


图 3 系统框图

## 3 基本笔划的仿真实现

在已有的计算机绘画系统中,采用的输入工具没有毛笔的柔软性和多变性,因而也不会具有像毛笔那样丰富的表现力,无法充分体现出中国水墨画的真正魅力。这就需要我们定义出各种笔法效果所

采用的初始画笔的数据结构,找到适合不同效果的画笔模型,这样才能真正体现水墨画的特征,从而区别于一般的绘画系统。

### 3.1 墨色效果的实现

水墨画的墨色,在计算机上显示出来无非就是红、绿、蓝颜色的组合。这样焦墨到清墨的效果变化就可以用颜色的深浅来模拟。为了实现水墨画的各种墨色效果,需要对画笔颜色进行特定的处理。

#### (1) 初始画笔的色阶控制

对初始画笔的色阶控制,是指在原有画笔模型的基础上,由用户来设定色阶变化的通道和色阶调整的范围,再对此通道进行颜色调整<sup>[3]</sup>。除了 RGB 主通道外,还可以选择 RED、GREEN 和 BLUE,分别控制红、绿、蓝分量,这样色阶控制就可以只对当前被选中的通道起作用。色阶调整用颜色分量作为特征值,算法可以表示为

$$F_{\text{end}} = \begin{cases} Lever_{\text{low}} & F_{\text{init}} \leq Low_{\text{black}} \\ Lever_{\text{low}} + (F_{\text{init}} - Low_{\text{black}}) \times \frac{Lever_{\text{high}} - Lever_{\text{low}}}{High_{\text{white}} - Low_{\text{black}}} & Low_{\text{black}} < F_{\text{init}} < High_{\text{white}} \\ Lever_{\text{high}} & F_{\text{init}} \geq High_{\text{white}} \end{cases}$$

其中,  $F_{\text{init}}$  和  $F_{\text{end}}$  分别是色阶调整前后的特征值,  $[Lever_{\text{low}}, Lever_{\text{high}}]$  为特征值的存在范围。  $Low_{\text{black}}$  和  $High_{\text{white}}$  是色阶调整的两个参数(即所谓的调整范围),分别用于控制初始画笔的暗色调和亮色调,调整的具体方法是基于线性映射的:  $Low_{\text{black}}$  控制着画笔中最暗部分的范围,该值越大则画笔变得越黑,意味着更多的暗部细节的消失,这就可以实现较浓的墨色;同理,  $High_{\text{white}}$  控制着画笔中较亮部分的范围,变小则意味着更多的亮部细节的消失,就可实现淡墨和清墨的效果。图 4 就是初始画笔模型用该方法处理后所实现的淡墨、重墨和浓墨的效果对比图。

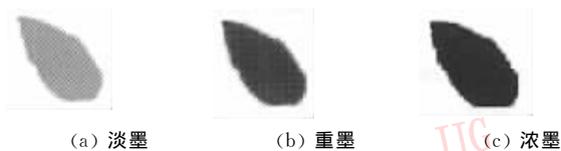


图 4 墨色效果比较图

#### (2) 初始画笔对比度、亮度的调整<sup>[3]</sup>

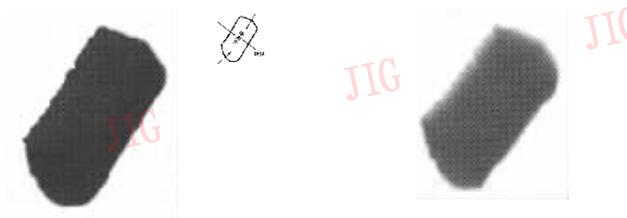
人眼对图像敏感的两个重要性能参数是图像的亮度和对比度,而亮度和对比度调整归根结底也是颜色调整方法,所以墨色效果的变化同样可以用基

于 RGB 颜色模型的亮度/对比度的调整来实现。

### 3.2 用 Alpha 混合模拟笔迹边缘效果

上面定义的初始画笔已经基本能够产生水墨画的笔迹,但是笔迹不够真实,规律性强,有明显的边界范围,笔划比较生硬,缺乏水墨画刚柔并进的特点,与真正的水墨画效果还存在着很大的差异。经过多次实验发现,初始画笔边界的透明度对所生成的笔迹的质量起着至关重要的作用。因此我们以 Alpha 混合算法来尝试达到这种效果。透明度调整是通过改变 Color 结构中 Alpha 分量的值来实现的,Alpha 值越小,透明度越强。

为了得到画笔边界的透明显示,希望能实现从初始画笔边界到内部,透明度逐层递减的效果(如图 5(b)所示),为此我们用灰度作标记逐层寻找边界。当找到边界后改变它的 Alpha 分量,并把这些像素加入到背景像素中,继续用灰度标记找下一层的边界。用户输入的 Alpha 值变化的范围和层数直接影响了画笔的边界透明显示。



(a) 透明处理前效果 (b) 透明处理示意图 (c) 透明处理后效果

图 5 Alpha 混合效果图

#### 算法具体描述为

```
proc Transparency(low,high,Grade)
  Compute_iStep(); //计算每一级变化量
  GrayScale(); //作灰度化标记
  Bin(); //作二值化标记,以便查找画笔边界
  for(int i=0;i<=Grade;i++)
    if(i==1) //若为第二次循环把画笔边界以外的部分设置为全透明;
      Border(iStep*i); //通过标记找边界,改变透明度
  end for
end proc
```

图 5 便是 Alpha 混合的效果图,从图中可以很容易地发现初始画笔边界透明度的优越性,它极大地改善了水墨画的生成效果。透明度的调整同样可以用于模拟特殊笔法——侧锋的效果。

### 3.3 基于 Bresenham 算法的交互式用户输入

在这个交互式系统中,要解决的问题是用户怎样简单易行的来控制画笔的运行轨迹。通过对

MouseDown、MouseMove 和 MouseUp 3 个事件的处理,完成一个笔划从起笔、运笔到收笔全过程的模拟。在鼠标移动过程中,系统只能检测到一些离散、断续的点,为了得到一条光滑连续的曲线,将这些离散的点,存到数组 PointArray 里,每两个相邻点之间,利用 Bresenham 算法<sup>[4]</sup>,用确定的画笔结构去填充,由这些离散的点获得在像素级上连续的曲线。

由于画家在真实作画过程中,往往可以通过不同的笔触改变笔划粗细,对此用鼠标配合其他输入设备的使用,实时检测 pressure 结构值的变化,改变 Brushsize 的大小和 Color 结构的值,使其按一定的步长递增或递减,从而实现按用户需求来实时改变笔划的粗细。图 6 是该交互式系统模拟实现的水墨画起笔和收笔效果。但笔触的改变不仅仅局限于起笔和收笔,在行笔过程中同样可以通过控制输入设备改变画笔结构参数来变换笔划粗细。

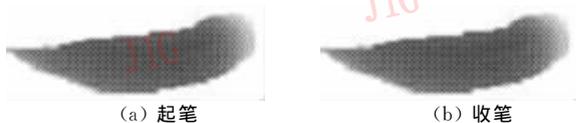


图 6 水墨画起笔和收笔效果

到此用户已经可以交互地实现对一般水墨艺术效果的模拟。

## 4 基于旋转思想的侧锋效果实现

侧锋是水墨画的一个重要笔法,在运笔时笔杆倾斜,笔尖在墨线的一边运行。侧锋笔墨变化多,用墨浓淡交融,墨色结合(或色与色结合),不同于一般的笔法。对于侧锋效果的实现,大体分为初始化侧锋画笔和用旋转算法实时生成侧锋运动轨迹两个步骤。

### 4.1 用渐变算法初始化侧锋画笔

输入设备不能像毛笔那样可以按压之后用侧锋来绘画,因此,为了模拟侧锋的这种特殊效果,首先用透明度(或颜色)渐变的方法来初始化画笔结构,它是在用户指定的两点之间像素透明度(或是颜色)逐渐平滑地变化,从而使画笔的一侧到另一侧呈现渐变的效果。

在初始画笔中确定两个点来表示渐变的方向(如图 7(a)中的  $ptInit$  为初始点,  $ptEnd$  为终点,则渐变的方向就是  $ptInit \rightarrow ptEnd$ , 初始的线段就是  $ptInit \rightarrow ptEnd$ ),有了这两个点,就可以确定渐变的范围(如图 7(a)中阴影部分所示)。沿渐变方向,利

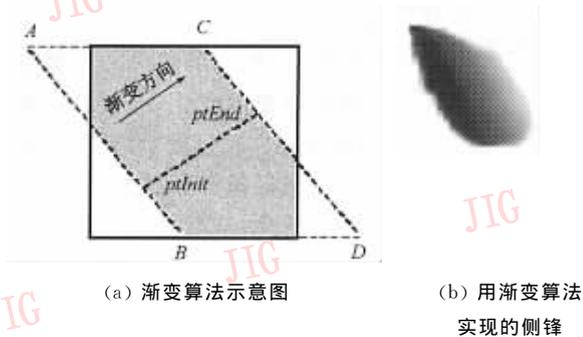


图 7 渐变算法初始化侧锋

用渐变方向的垂线( $AB, CD$ )平移,可以实现渐变区域中透明度(或颜色)的逐层递增,每一层透明度(或颜色)计算也是基于线性映射的方法。根据用户输入的透明度(或颜色)变化的范围和初始点、终点的选择不同,每一步映射的范围也会随之改变。图 7(b)就是用这种方法生成的侧锋画笔,可以很容易地看出侧锋墨色变化的丰富性。

对于用户输入的不同参数,所产生的侧锋画笔风格也有所不同,这恰恰与侧锋的灵活多变相吻合。

### 4.2 任意角度旋转的算法实现

当用经过处理的侧锋画笔进行绘图时发现,由于侧锋画笔中颜色和透明度变化多样,沿用前面的算法很难达到对真实侧锋效果的仿真,其所得笔划僵硬、呆板,而且立体感强烈。对于这个问题的解决,采用将画笔原始图像随鼠标运行的轨迹进行实时旋转的方法,来仿真水墨画笔运笔时毛笔的变化,从而实现中锋、侧锋等水墨特效。这种方法比纹理贴图简单易行,与用户的交互性好。

采用经典的旋转算法<sup>[5]</sup>,将一个给定的画笔结构在大小不变的基础上进行任意角度的旋转。由于经典的旋转算法都是整型数计算,取整时的误差会造成一定的走样问题,这将直接影响到墨色效果的实现,因此,在旋转中采用浮点数运算。从图 8 可以看到取整后造成的误差,灰色点组成的直线段是应该绘制的“真线”,黑色点组成的直线段则是四舍五入后画出的“假线”。

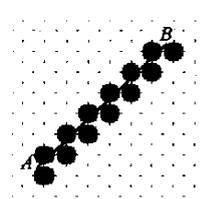


图 8 误差示意图

### 4.3 旋转算法的改进

对于实时旋转的实现,理想化的解决方案就是实时判断鼠标移动过程中斜率的变化,根据斜率来判断所需旋转的角度,但是在实验过程,发现了两个问题:用手控制鼠标时,会有轻微的颤抖现象,此时画笔斜率就发生了敏锐的变化,从而引起画笔图像剧烈的旋转。当笔迹曲率较大时,角度突变严重,会产生明显的扭曲现象。针对以上这两个问题,提出以下解决方案:

(1) 设定步长为  $step$  个像素,当  $l$ (距离) $>step$  时,通过斜率变化,判断所需旋转的角度;

(2) 当  $l < step$  时,将鼠标检测到的点动态存储到一个数组里面,用线性插值的方法,逐渐旋转;

(3) 采用顺时针和逆时针两种方法,按照就近旋转的原则将角度限制在  $0^\circ \sim 180^\circ$  范围之内。

用伪代码表示实时旋转算法如下:

```
proc Rotate-Arithm()
   $l = |p - previousPoint|$ ; //  $p$  为当前所在点, 求出  $p$  点和
     $previousPoint$  两点的距离
   $pointArray.Add(p)$ ; // 将鼠标检测到的点不断添加到
     $pointArray$  数组里;
  if ( $l > step$ )
    if (斜率变化)
      if (两点所成向量在一、二象限) 逆时针旋转
    else 顺时针旋转;
  for ( $pointArray$  数组成员)
     $rotate$ (画笔图像); // 线性插值的方法进行逐渐旋转;
     $Bresenham$ (旋转后的画笔图像,  $previousPoint, p$ );
  end for
end proc
```

通过以上算法的改进,缓冲了画笔斜率的突变,尽可能地减小了其变化的幅度,并且使得由鼠标移动和笔迹生成之间延迟引起的不连续性有了显著改善。用渐变算法初始化的侧锋画笔结构,旋转和不进行旋转的两种效果图如图9所示,从图中可以看



(a) 旋转前的侧锋

(b) 旋转后的侧锋

图9 侧锋效果图

出,未经旋转的,立体感效果过于强烈,而且有明显的扭曲现象,这跟真实的侧锋效果不符,而经过旋转后的侧锋,则是自然流畅,达到了对真实毛笔行为的仿真再现。

## 5 结论

本文建立的画笔模型及其数据结构有效地实现了对水墨画笔行为的仿真模拟,即实时、交互地生成水墨画的笔迹,并成功地解决了各种水墨艺术效果仿真过程中出现的一系列问题。图10是采用侧锋画笔的特殊结构和旋转算法来实现的效果仿真图,其体现了毛笔笔迹变化的多样性。图11是运用本文所提到的各个算法仿真实现的综合效果图,此图充分体现出水墨画的韵味。



图10 侧锋效果

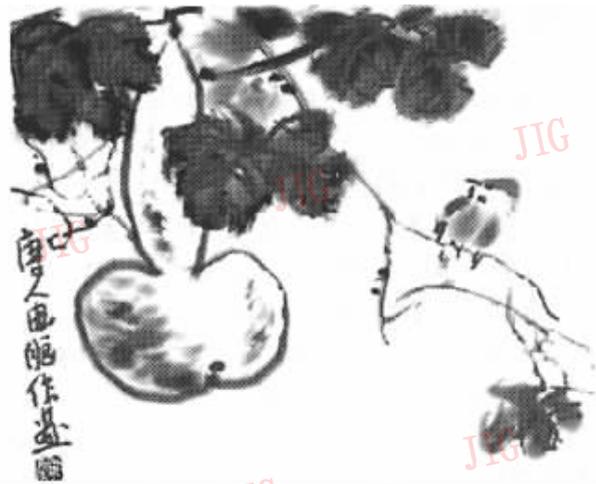


图11 综合效果仿真

当然,这只是对水墨画笔的模拟实现,该仿真系统还存在很多不完善的地方,如尚未考虑纸的纹理,水墨的扩散、渗化作用等,这些都有待进一步研究的问题。

## 参 考 文 献

- 1 焦景山,孙济洲. 中国水墨画效果的图形仿真[A]. 见:辜居一主编. 数字化艺术论坛[M]. 杭州:浙江人民美术出版社,2002:190~204.
- 2 Steve Strassmann. Hairy Brushes [A]. In: Proceedings of SIGGRAPH, 1186[C], Dallas, Texas, USA, 1986:225~232.
- 3 周长发. 精通 Visual C++ 图象编程[M]. 北京:电子工业出版社,2000:281~301.
- 4 孙家广. 计算机图形学[M]. 北京:清华大学出版社,1998:169~170.
- 5 倪明田,吴良芝. 计算机图形学[M]. 北京:北京大学出版社,1999:129~130.



李 丹 1978 年生,2001 年于天津大学计算机科学与技术系获学士学位,现为该系硕士研究生。研究领域为中国水墨画的仿真实现。



孙美君 1978 年生,2002 年于天津大学电气工程及其自动化系获学士学位,现为该校计算机科学与技术系硕士研究生。研究领域为中国水墨画的仿真实现。



孙济洲 1949 年生,教授、博士生导师,1993 于英国 Sussex 大学工程学院获博士学位。主要研究领域为真实感图形生成、基于图像的造型与绘制、科学计算可视化、虚拟现实等。