

# 基于三维力信息的笔交互毛笔书法效果表达<sup>①</sup>

## Handwriting Representation of Chinese Brush Calligraphy Based on Three-Dimension Force Information

邢冲<sup>1,2</sup> 吴仲城<sup>1</sup> (1.中国科学院合肥物质科学研究院智能机械研究所安徽合肥230031;  
2.中国科学技术大学自动化系安徽合肥230031)

**摘要:** 针对笔交互中手写笔迹毛笔效果表达问题,通过分析实际毛笔书写过程及墨水的渗透过程,提出了融笔,墨,纸三者为一体的模拟方法。从全面模拟书写过程角度,使用几乎被研究者忽略的笔尖三维力信息作为主要输入信息,对笔尖受力变形笔迹建模;并在此模型上提出使用由纸张整体性能指标控制的DLA模型仿真墨水在纸张中的渗透作用。本模型完成了对墨水从笔尖到纸张纤维中的完整过程的仿真。三维力信息控制着笔的移动和笔尖的变形,能全面表现书写过程。

**关键词:** 笔迹表达 毛笔书法 手写输入 三维力 DLA模型

中国毛笔书法是一门古老而深邃的艺术,它伴随着中华文明的发展而发展。在计算机高速发展的今天,这门国粹仍然受到人们的关注。人们希望能使书法与时俱进,与现代科技相融合。计算机科技有处理速度快,易存储,易交流等的功能特点;而书法体现的是对历史文化的传承与个性化。计算机技术和书法的结合是科技和历史文化的结合。人机笔交互的发展给书法和计算机的结合提供了有利条件。

### 1 引言

早在笔交互开始的时候已经有研究者在进行毛笔书法效果的研究。1986年,Strassmann<sup>[1]</sup>提出了对毛笔笔迹的模拟,提出增加控制点连成矩形来填充,1990年Chua<sup>[2]</sup>提出使用贝塞尔曲线来拟合笔迹,1991年,Guo和Kunii<sup>[3]</sup>最早提出了基于纸张纤维束的扩散模型,同年,Pahm<sup>[4]</sup>提出了使用B样条来模拟笔道的轮廓,中间填充使用四边形来拟合填充。之后,Lee<sup>[5]</sup>提出了在此模型上的改进,使用sin曲线模拟纤维束。Kunii<sup>[6]</sup>等后提出了使用偏微分方程。国内,孙济州领导的课题组进行中国水墨画物理仿真研究,提

出了多种方法,例如基于纸张物理模型<sup>[7]</sup>,基于经验的笔道模拟<sup>[8]</sup>等等。香港科技大学的Chu于2004<sup>[9]</sup>,2005<sup>[10]</sup>年使用在毛笔上添加传感器来捕捉真实毛笔的动作,进行笔迹的模拟等等。

在众多的相关研究工作中力信息是常常被忽视的。书写时的力信息因其很强的自然性而被忽视,但这是一个最基本的书写因素,没有力信息是不会有书写过程。书写过程是一系列连续的动作,由笔尖的变形动作和墨水的扩散动作组成的。

本文提出从全面模拟书写过程角度进行建模,把模型分为笔迹模型和纸墨交互模型:使用力信息为主要输入信息对笔尖变形所留笔迹建模;并使用纸张整体性能指标为控制参数对纸墨交互建模,使用DLA模型模拟墨水扩散的随机性和自相似性。

### 2 力信息获取

由于毛笔尖的柔软性,直接获取毛笔尖和纸张之间的力是不太容易实现的。因此,我们使用普通的硬笔以毛笔书法的姿势,在F\_Tablet上书写以获取笔尖的三维力信息。

① 基金项目:国家自然科学基金(60575058,10576033);国家高技术研究发展计划(863)(2008AA04Z205)

收稿时间:2009-02-15

F-Tablet<sup>[11]</sup>是一个三维力信息手写板。它能获取硬笔在其感应区书写时笔尖上的三维力信息。F\_Tablet 是基于自主专利知识产权多维力传感器专利技术而提出的,已经申请发明专利(一种计算机手写输入平台和信息获取方法 0310106083.4),并同时申请国际发明专利 PCT 申请保护(一种计算机手写输入平台和信息获取方法, PCT/CN2004/001166)。其能够同时采集签名过程中的三维书写力信息以及二维字形信息,所设计 F\_TabletTM 平台的实物外形如图 1 所示。

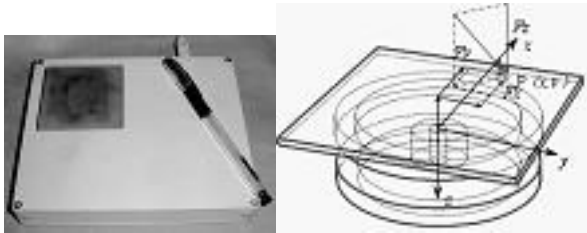


图 1 F\_Tablet 手写板 图 2 受力作用原理图

它可把获得的三维力信息分解到  $x, y, z$  轴方向,并能同时获得  $x, y$  轴方向的力矩信息。图 2 为三维力  $F_x, F_y, F_z$  的方向示意图。

### 3 笔迹表达建模

毛笔书写过程可以被分拆成为两个部分:一是手和笔的运动产生运动轨迹,这是笔迹的骨架;二是毛笔尖的受力变形,填充轨迹,产生墨迹效果,这是笔迹表达的重点。下面分别详述。

#### 3.1 运动轨迹表达

在现实中,毛笔书写是一个连续的动作,呈现在纸张上的墨迹也同样是连续的,这种连续的变化映射到计算机中的实现需要进行 AD 转换。使用手写板书写,通过一定频率的采样来实现这种连续变化的数字化。把各个采样点相连就形成了笔迹的主线,是手和笔运动的轨迹。

由于使用的是 F-Tablet 手写板,我们记录的采样点数据为  $(x, y, F_x, F_y, F_z)$   $x$  为该点的  $x$  轴坐标,  $y$  为该点的  $y$  轴坐标,  $F_x$  为该点受到笔尖的  $x$  轴方向的力,  $F_y$  为该点受到笔尖的  $y$  轴方向的力,  $F_z$  为该点受到笔尖的  $z$  轴方向的力。

接下来是模拟毛笔尖的变形来填充笔迹,使之具有宽度,这是笔迹表达的关键。

#### 3.2 墨迹效果表达

毛笔尖在随手的运动中由于受力会有变形,这种变形形成了多种多样的笔迹效果。毛笔尖在书写时受到力作用变形,这是墨水能在纸张上留下痕迹的前提。毛笔的笔尖为圆锥形,一般是由狼毫,羊毫等制成,均是易变形的材料。毛笔尖的这种特性使笔迹在书写过程中一般为椭圆形或圆形,笔迹的前边沿是弧形,其弧度随着笔尖力的变化而变化。因此提出使用由力信息控制的椭圆来填充轨迹骨架,这个椭圆的大小由笔尖  $z$  轴力的大小所控制,中心在采样点,而笔迹前边沿凸向的方向由采样点的  $F_x, F_y$  的合力的方向所决定。图 3 为一个最简单的情况,这表示是一个水平提笔动作:笔只做水平运动,运动渐渐变慢,力也随之减小,因此椭圆渐渐变小,并使之在小到一定值时设定为圆形填充。

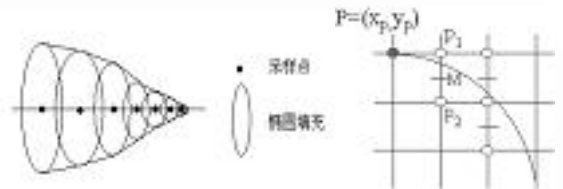


图 3 椭圆填充笔迹过程 图 4 中点椭圆算法示意图

椭圆笔迹的算法分两部分:通过经典算法来实现椭圆绘制,和受控平移旋转。

##### 3.2.1 经典中点椭圆算法

经典的中点椭圆算法<sup>[12]</sup>是把椭圆绘制在以原点为中心,  $X, Y$  轴为对称轴的位置上。

中点椭圆算法的图示为图 4。对于这部分的上半部分( $\frac{d_x}{d_y} > -1$ ),设定  $(x_p, y_p)$  为最接近方程的起始点,那么,中点决策参数为:

$$d_1 = F(x_p + 1, y_p - 0.5) = b^2(x_p + 1)^2 + a^2(y_p - 0.5)^2 - a^2b^2 \quad (1)$$

通过判断  $d_1$  的正负来绘制下一点:

①  $d_1$  为负,则绘制  $(x_p + 1, y_p)$ , 并把此点代入方程(1)计算下个  $d_1$ ;

②  $d_1$  为非负,则绘制  $(x_p + 1, y_p - 1)$ , 并代入方程(1)计算下个  $d_1$ 。

之后,使用对称法则进行其它三个象限部分的绘制。

##### 3.2.2 椭圆的平移与旋转

由于笔迹是一条运动的轨迹,下一个笔迹都和上

一个是不同的，所以椭圆笔迹的对称中心和方向随着书写而不断变化的。因为，要对在标准位置绘制的椭圆进行平移和旋转坐标变换<sup>[12]</sup>。最终合成方程为：

$$\begin{cases} x' = x_o + x \times \cos \theta - y \times \sin \theta \\ y' = y_o + x \times \sin \theta + y \times \cos \theta \end{cases} \quad (2)$$

而旋转之后的椭圆在边缘上是不连续的，如图5(a)所示，这给后面的工作笔迹填充带来了不便。



图5 (a) 原算法旋转后 (b) 4邻域填充后的图

这里我们提出使用4-邻域填充方法来解决：对每一个边缘点进行检测，若其4-邻域中点没有被全部填充，则填充4-邻域中的剩余点。这样保证了椭圆的边缘的连续性，而且还可以很好的表达笔迹的轻微抖动。图5(b)为填充过的椭圆。

### 3.2.3 力信息的控制作用

墨汁是在毛笔尖和纸张的摩擦过程中流到纸张上的，而笔尖的  $F_x F_y$  的合力正是摩擦力的反作用力，合力的方向正是笔尖的运动方向。图6是采集到的  $x, y$  轴力信息由 Matlab 做出的合力分布。

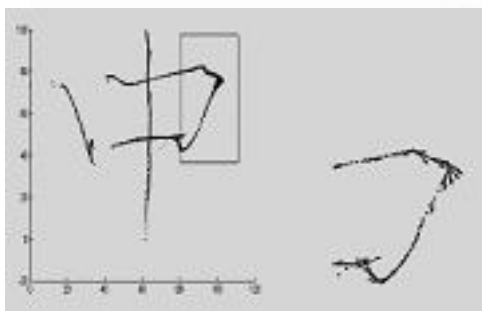


图6 X, Y轴力信息的合力分布图

从图上可以看出， $F_x F_y$  的合力方向体现了毛笔尖的运动方向。由此提出  $F_x, F_y$  合力的方向控制椭圆短轴的方向。

我们定义短轴的方向为椭圆的方向。所以，根据

$F_x F_y$  合力的方向,椭圆笔迹需要旋转的角度为：

$$\theta = \begin{cases} \pi \text{ or } 0, & F_x = 0 \\ \frac{\pi}{2} + \text{atg}(\frac{F_y}{F_x}), & \text{else} \end{cases} \quad (3)$$

而笔迹的大小是由毛笔尖向下的变形有直接关系的，毛笔尖越向下变形，变形的形状越大越圆。因此提出使用  $F_z$  控制椭圆的大小，即长短轴的大小。

由于  $F_z$  和笔尖变形的大小成正比关系，我们假设， $F_z$  和椭圆笔迹的长短轴成正比线性关系：

$$\begin{cases} a = k_a \times f_{zuse} \\ b = k_b \times f_{zuse} \end{cases} \quad (4)$$

$k_a, k_b$ ，分别为长轴短轴的比例系数。

### 3.3 DLA 模型表达纸墨交互

墨水的扩散可以看到是中心一些墨水向周围各个方向扩散，因此我们提出使用分形几何中的 DLA 模型来模拟墨水的扩散。扩散置限凝聚模型(DLA)<sup>[13]</sup>是由 T.A.Witten 和 L.M.Sander 于 1981 年首次用计算机模拟求得的。最初模型是放置一个静止的微粒做为种子，以该点为圆心， $R$  为半径做一个圆，在这个圆上随机地释放一个微粒，在圆内做布朗运动的随机行走；如果微粒与种子微粒相撞，那么就令它附着在种子微粒上并与之结合形成凝集团，如果微粒走到圆的边界或离开这个圆，则令它消失。图7(a)所示为最初提出的 DLA 模型规则。

在二维环境中，按照扩散粒子的随机行走，我们定义有两种：8 自由度扩散(针对点为凝聚核)，和 3 自由度扩散(针对线为凝聚核)。其形成过程正好可以看成是墨水扩散的反过程。图7(b)为 DLA 模型的凝聚核为中心的效果图。

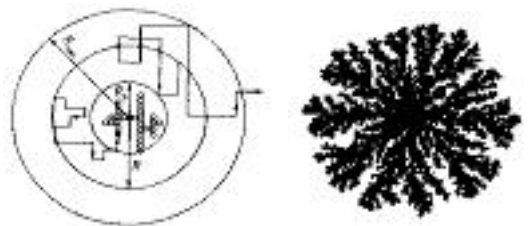


图7 (a) DLA 模型示意图 (b)点为凝聚核的效果图

由于表现出来的墨水扩散是在笔尖变形笔迹外进行扩散的，所以，要以椭圆笔迹为中心进行。DLA 模型有多种扩散方式，在二维环境中，按照扩散粒子的

随机行走,我们定义有两类:4自由度扩散(针对一个点为凝结核),和3自由度扩散(针对线为凝聚核)。

利用纸张的指标来控制DLA模型的一些参数:使用吸收度控制扩散粒子数,纵横向控制扩散方向,纸张紧度控制扩散步长。

① 纸张的吸收度直接影响墨水可以扩散的总量:使用吸收度来设定DLA模型中的扩散粒子数,两者为成正比关系。设 $p_{ab}$ 为吸收度, $n_{sum}$ 为可扩散粒子总数, $k_{ab}$ 为比例系数:

$$n_{sum} = k_{ab} \times p_{ab} \quad (5)$$

② 纸张的纵横向表示的是纸张纤维的丝络方向是水平或是垂直。利用纸张的纵横向,在扩散方向分配不同数量的扩散粒子。设定使用 $p_{or}$ 表示纵横向,数值为0或1,1表示为水平方向,即x轴方向,0表示为竖直方向,设定权重为 $k_x, k_y$ ;  $n_x, n_y$ 分别表示x轴,y轴方向的扩散粒子数。

$$\begin{cases} n_x = k_x \times n_{sum} \\ n_y = k_y \times n_{sum} \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} k_x = a_x \times (p_{or} + 1) + b_x \\ k_y = 1 - k_x \end{cases} \quad (7)$$

③ 纸张的紧度反映了纸张纤维之间的紧密程度:紧度小,则墨水的扩散范围会扩大,扩散边缘不会太整齐;紧度大,则墨水扩散范围小,边缘会比较整齐。这与扩散步长的表现成反比。表现的是各个释放粒子与凝结核的距离,步长小,则扩散边缘比较密集,范围小;步长大,则扩散边缘会稀松,范围变大。紧度可以看成和扩散步长成反比关系。设为紧度 $k_s$ 为比例系数, $r_d$ 为扩散步长:

$$r_d = \frac{k_s}{p_t} \quad (8)$$

## 4 实验结果

实验结果:图8设定了参数后得到的结果:

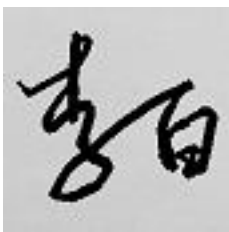


图8 效果图

改变纸张的渗透度:图9为增大/减小渗透度的效果(扩散粒子数的增多/减少):

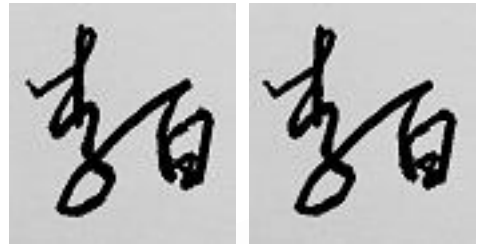


图9 (a) 增大渗透度 (b) 减小渗透度

可以看到增大渗透度后墨水的扩散边缘变大,但是同时带来的还有边缘的不整齐性。纸张的纵横向:图10为突出x,y轴为丝络方向的效果:

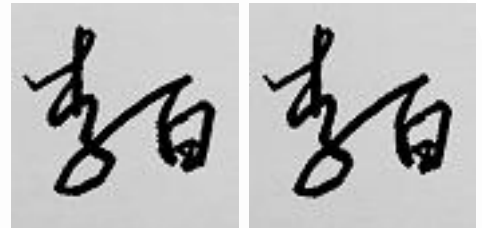


图10 (a) X轴为丝络方向 (b) Y轴为丝络方向

当纸张的纵横向差异比较大时就会出现这种扩散明显向一个方向进行的情况。紧度:图11为增大/减小紧度的对比图:(扩散步长的变小/变大)

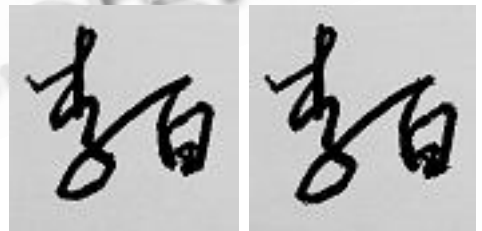


图11 (a) 增大紧度 (b) 减小紧度

步长增大后边缘的不整齐性明显增大。

## 5 总结

本文使用了三维力信息和纸张的整体性能指标来实现笔交互中的毛笔效果表达。该模型从整体上真实地模拟了现实书写过程,力信息的引入使得使用者能很好的控制书写,并能达到练习书法的作用。纸张整

(下转第31页)

(上接第 147 页)

体性能指标控制墨水扩散,体现了不同的纸张性能的不同墨水扩散效果。

### 参考文献

- 1 Strassmann S. Hairy brushes. Proc. of SIGGRAPH'86, 1986:225 - 232.
- 2 Chua Y. Bezier brush strokes. Computer Aided Design 1990,22(9):5505.
- 3 Guo Q, Kunii TL. Modeling the diffuse painting of sumie, IFIP Modeling in Computer Graphics, 1991.
- 4 Pahn B. Expressive Brush Strokes. Graphical Models and Image Processing, 1991, 53(1):1 - 6.
- 5 Lee J. Diffusion rendering of black ink paintings using new paper and ink models. Computer & Graphics, 2001,25:295 - 308.
- 6 Kunii TL, Nosovskij GV. Two-dimensional diffusion model for diffuse ink painting. Int. J. of Shape Modeling, 2001,1(7):45 - 58.
- 7 余斌,孙济洲,等.基于纸的物理建模的水墨画扩散效果仿真.系统仿真学报, 2005,17(9):2305 - 2309.
- 8 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.电子测量技术, 2007,30(10):38 - 41.
- 9 Chu NSH, Tai CL. Real-Time Painting with an Expressive Virtual Chinese Brush. IEEE Computer Society, 2004,9(10):76 - 85.
- 10 Chu NSH, Tai CL. Real-Time Ink Dispersion in Absorbent Paper. ACM Transactions on Graphics, 2005,24(3):504 - 511.
- 11 Wu ZC, Fang P, Meng M, *et al.* A Novel Force Sensitive Tablet for Handwriting. Information Acquisition Advances in Biometric Person Authentication, 2005,3338:654 - 662.
- 12 Donald Hearn. 计算机图形学(第 3 版).北京:电子工业出版社, 2004.
- 13 Kaye BH.分形漫步.沈阳:东北大学出版社, 1994.