

书法临摹过程的交互式动画建模方法

张俊松^{1,2)}, 张悠苗^{1,2)}, 周昌乐^{1,2)}

¹⁾(厦门大学智能科学与技术系艺术认知与计算实验室 厦门 361005)

²⁾(厦门大学福建省仿脑智能系统重点实验室 厦门 361005)

(zhangjs@xmu.edu.cn)

摘要: 为了从书法汉字图像重建其动态笔画书写过程, 提出一种书法临摹过程的交互式动画建模方法. 首先收集几种典型的真实笔触样本, 通过统计建模的方法构建一个新的毛笔笔触模型; 然后借助数位板, 通过书法图像交互获得汉字的笔锋运动轨迹; 再结合书法经验知识计算每个笔锋轨迹点的笔触形状, 得到笔触变化的时间序列, 生成汉字书写动画. 实验结果表明, 该方法适合不同字体风格汉字的书写动画生成, 能广泛地应用于涉及汉字书写动画制作的影视传媒等数字媒体应用领域.

关键词: 书法; 动画; 虚拟毛笔; 笔触模型; 笔锋运动轨迹

中图法分类号: TP391

Simulating the Writing Process from Chinese Calligraphy Image

Zhang Junsong^{1,2)}, Zhang Youmiao^{1,2)}, and Zhou Changle^{1,2)}

¹⁾(Group of Mind, Art & Computation, Department of Cognitive Science, Xiamen University, Xiamen 361005)

²⁾(Fujian Key Laboratory of the Brain-Like Intelligent Systems, Xiamen University, Xiamen 361005)

Abstract: This paper presents a novel approach for interactively recovering dynamic writing processes from static Chinese calligraphy images. After collecting some ink samples from real calligraphic works, we first propose a statistic-based method to model the footprints between brush bundles and the paper. Using pen input devices, we then propose an efficient method for generating stroke trajectories from Chinese character images. Finally, we reconstruct a writing animation by calculating footprint series along given stroke trajectories. The proposed method has many potential applications, such as Chinese character teaching and digital media applications.

Key words: Chinese calligraphic; animation; virtual brush; footprint; stroke trajectory motion

中国书法具有很高的艺术欣赏价值, 历史上流传下来了大量的书法碑帖. 但是, 以静态图像呈现的书法碑帖已不能满足当前很多实际应用需求, 如影视传媒及对外汉语教学等, 需要大量地制作汉字书写的临摹动画. 目前大多采用 flash 等工具手工逐帧地制作汉字书写动画, 缺点是耗时且制作过程烦琐. 如果能提供更加便捷的书法临摹过程的动画生

成方法, 由静态书法汉字图像生成其动态书写过程的动画, 不仅能表现书法艺术的魅力, 还将大大提高汉字书写动画的制作效率, 满足更多实际应用需求.

实现书法临摹过程的动画生成存在以下挑战:

1) 书法在长期的历史演变过程中产生了诸多书体, 如常见的篆、隶、楷、草、行等, 其笔画形态存在很大差异, 难以构建统一的笔画模型; 2) 传统书法临摹过程

收稿日期: 2012-06-08; 修回日期: 2014-03-31. 基金项目: 国家自然科学基金(60903129); 数字出版技术国家重点实验室开放课题. 张俊松(1978—), 男, 博士, 副教授, CCF 高级会员, 主要研究方向为计算机图形学、艺术认知与计算; 张悠苗(1987—), 女, 硕士, 主要研究方向为非真实感图形学、数字图像处理; 周昌乐(1959—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为人工智能及其应用技术.

中十分强调笔法的灵活运用,但即便是同一书体,如楷体,不同书法家在运笔方法(如毛笔的提、按、顿、挫与各种笔锋的组合运用)上也有明显差异,目前基于模式识别及图像处理的方法还不能很好地提取书法汉字的笔锋运动轨迹^[1].

在毛笔书写过程中,毛笔与纸在某一时刻接触产生的墨点称为笔触,此时笔触内毛笔的作用点称为书写过程的轨迹点,这些轨迹点组成了笔锋在点画内的运动轨迹,简称笔锋运动轨迹.书法点画形状则由笔锋运动轨迹上的笔触序列构成(如图 1 所示).要实现书法临摹过程的动画生成需要解决 2 个问题:一是对笔触形状建模;二是从汉字图像重建其笔触时间序列.

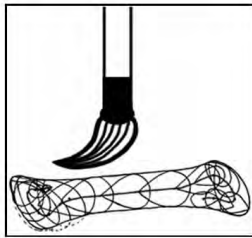


图 1 笔锋运动轨迹上的笔触序列构成笔画“横”

近年来,研究人员对于书法的计算机模拟开展了很多工作,这些工作可分为 2 类:1)虚拟毛笔及墨扩散效果建模^[2-10];2)书法图像处理与分析,如书法碑帖图像去噪^[11]、笔画轮廓提取与表达^[12]等.也有一些工作将两者结合起来考虑,Yao 等^[13]结合书法知识提出了一种提取笔锋运动轨迹的方法,但该方法适用于楷书汉字的笔锋运动轨迹提取;Wong 等^[14]通过分析书法汉字图像获得虚拟毛笔模型参数,用于电子书法创作,但该方法较少考虑书法的“藏锋”、“逆锋”等笔法;最近 Ning 等^[15]提出基于图像的水墨画生成方法,但该方法得到的笔锋运动轨迹不能很好地表现书法藏锋、逆锋等运笔方法.

在书法临摹过程的动画生成方面开展的研究工作还很少,Zhuang 等^[16]借助离线汉字识别方法提取汉字笔画顺序并生成书写动画,Yang 等^[17]实现了楷书汉字图像的动态书写动画.由于行、草等书体的汉字笔画骨架难以借助图像处理自动抽取,因此这 2 种汉字动画的生成方法对于草书等书写相对自由的书体还不能获得理想的效果.

在笔触形状建模方面,于金辉等^[4]用散点集合模拟笔触,通过控制散点的分布形状、密度和颜色模拟不同的笔触效果;也有研究者简化了毛笔笔头的实际形状,采用椭圆模拟笔触形状^[5-7,14-17];还有研究者用“水滴”模拟笔触形状^[8-15,18],如宓晓峰等^[8]根据毛笔书写过程中笔毫的形变,用“水滴”模拟笔触形状,考虑了几种常见的毛笔笔头形状;孙美君等^[19]提出的 3D 虚拟毛笔模型模拟了笔触受压的形变效果.以上这些笔触形状建模方法中,只有较少工作是通过统计分析毛笔书写的真实笔触来构建基于统计的笔触模型.

为了提供一种有效的书法临摹过程的动画生成方法,本文借鉴上述方法的优点,并针对其在笔锋运动轨迹获取和笔触模型建模方面存在的不足,提出一种书法临摹过程的交互式动画建模方法.本文方法能够实现包括草书、行书在内多种书体的书写动画效果,弥补了已有方法多适用于楷书动画生成的不足;此外,引入书法经验知识,通过统计常见毛笔的笔触形状(如长锋羊毫、大狼毫、中狼毫、小狼毫等),建立的参数笔触模型可模拟不同类型毛笔的笔头形状,并能在书写过程中根据笔画轮廓约束自适应地调整笔触形状,模拟不同的笔锋效果.

1 本文方法概述

本文方法的总体流程如图 2 所示,首先自动提

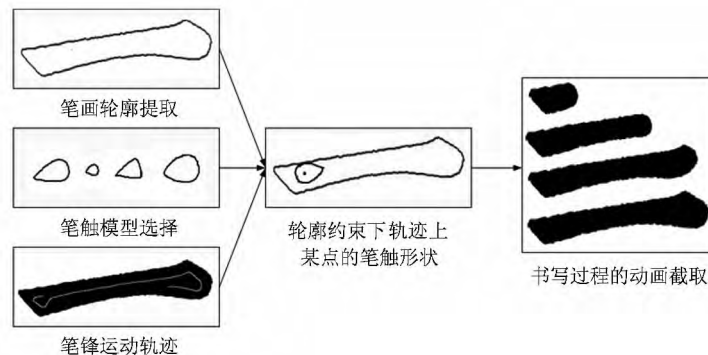


图 2 本文方法总体流程图

取书法汉字的笔画轮廓;其次根据书法风格选择笔触模型,交互地给定笔锋运动轨迹;然后引入书法在笔法等方面的经验知识,在汉字笔画轮廓的约束下

重建书写过程中每个轨迹点的笔触形状;最后生成汉字书写动画.图 3 所示为《兰亭序》中“永和九年”的书写动画生成过程示意图.



图 3 《兰亭序》中“永和九年”的书写动画生成

2 书法图像预处理

由于扫描的书法碑帖图像通常带有噪声点,因

此本文首先用滤波方法^[11]对书法图像去噪,然后将其转换成二值图像,再用 freeman 链码检测得到其轮廓信息,如图 4 所示.



图 4 书法汉字图像预处理

3 基于统计的笔触模型

通过采集真实的毛笔书写笔触,借助统计建模的方法,本文提出一种新的笔触模型,用于模拟毛笔书写过程中的笔触形状.

3.1 标准笔触模型

通过认真观察实际的毛笔笔触形状,如图 5 a 所示,本文用上下 2 条对称的 3 次 Bézier 曲线来拟

合标准笔触模型,如图 5 b 所示.笔触形状定义为 $S_i=(L_t, L_h, L_l, L_r)$,其中, L_t 为笔锋长度, L_h 为笔根长度, L_l 与 L_r 分别代表笔肚左右两侧长度.标准情况下 L_l 与 L_r 等长对称,但在书写过程中由于笔毫与纸面摩擦导致笔触形变,使得 L_l 与 L_r 的值发生变化.图 5 b 所示为本文定义的标准笔触模型,其坐标原点 o 为毛笔笔杆中心对应位置,与坐标轴相交的 4 个点 T_0, T_1, T_2, T_3 为笔触顶点,它们到原点 o 的距离分别为 L_t, L_h, L_l 和 L_r .

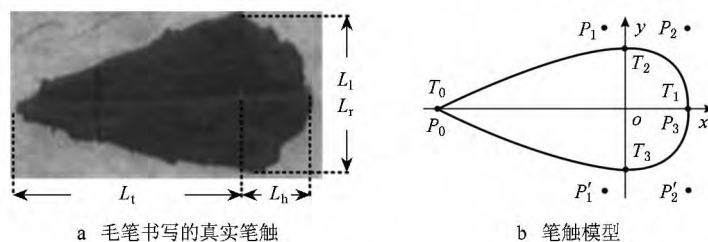


图 5 笔触模型

3.2 确定笔触模型参数

与文献[4-8,14-15,17-18]方法不同,本文提出的笔触模型从统计常见毛笔类型的实际书写笔触而得,笔触形状的顶点由毛笔笔毫长度 L ,笔根与笔锋的关系参数 α ,以及两侧笔肚与笔锋的关系参数 β 3 个参数计算得到.

3.2.1 L_t

根据毛笔的书写经验,对于同一支毛笔,在笔头没有形变且落笔没有超过笔毫长度 $L/2$ 的情况下,压感值 P 和笔毫长度 L 是线性相关的;由于笔根长度较短、毛量密集,对压感值较不敏感,因此本文假定与压感值 P 直接相关的是笔锋长度 L_t . 由于不同种类毛笔的笔毫长度 L (单位为 cm)、材质和毛量分布都有差别,定义笔锋长度

$$L_t = \frac{p}{P_{\max}} \times \rho \quad (1)$$

其中, P_{\max} 是数位板输出压感值的上限, ρ 为单位转换系数(把长度单位 cm 转换成屏幕像素).

3.2.2 L_h, L_l 和 L_r

毛笔的材质和毛量分布主要体现在笔根和两侧笔肚与笔锋的相对长度上,即 α 和 β . 在触面笔锋长度相同的情况下,用软毫笔书写时两侧笔肚与根部的形变较硬毫笔大;同样地,毛量较密的毛笔其 L_h, L_l, L_r 也较长. 为了印证这一点并找到具体参数,本文选取 4 种典型的毛笔类型在相同的纸面上书写,得到一系列笔触形状,再分别对这 4 种笔触的 L_t, L_h, L_l 和 L_r 进行统计,如图 6 所示.

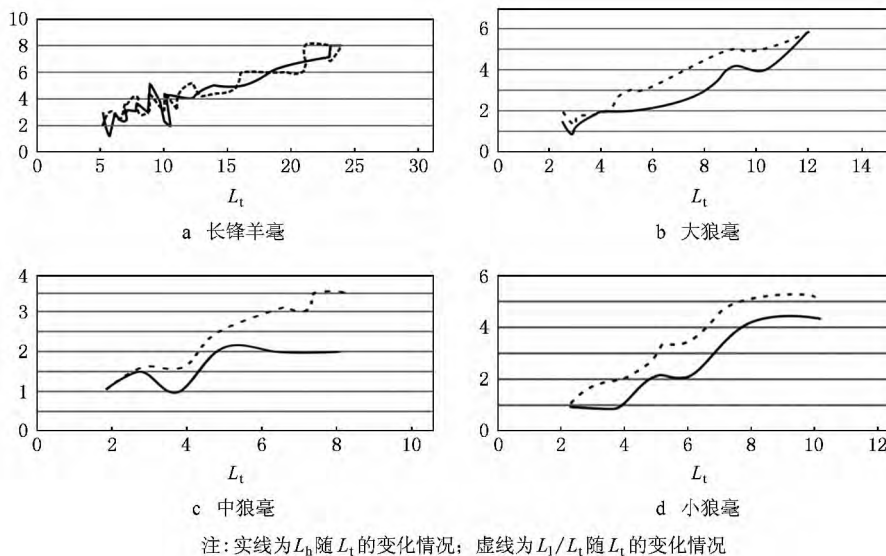


图 6 4 种毛笔类型的关系参数统计

直观上来看, L_t, L_h, L_l, L_r 存在的线性关系为

$$\begin{cases} L_h = \alpha \times L_t \\ L_l/L_r = \beta \times L_t \end{cases} \quad (2)$$

对以上 4 类数据进行线性最小二乘拟合,得到不同类型毛笔的关系参数 α 和 β ,如表 1 所示. 根据表 1 中不同类型毛笔的 3 个参数,就可以求得其初始笔触模型的 4 个顶点

$$\begin{cases} T_{0y} = T_{1y} = T_{2x} = T_{3x} = 0 \\ T_{0x} = -L_t = -\frac{P}{P_{\max}} \times \rho \times L \\ T_{1x} = L_h = \alpha \times \frac{P}{P_{\max}} \times \rho \times L \\ T_{2y} = L_l = \beta \times \frac{P}{P_{\max}} \times \rho \times L \\ T_{3y} = -L_r = -T_{2y} \end{cases} \quad (3)$$

表 1 4 种典型毛笔类型的统计参数

毛笔类型	L/mm	α	β
长锋羊毫	5.0	0.25496	0.25954
大狼毫	2.8	0.43541	0.46564
中狼毫	2.2	0.17273	0.43455
小狼毫	1.7	0.46970	0.57851

3.3 笔触形状曲线拟合

在书法创作过程中,书法家根据需要对毛笔不时蘸墨,这样做不仅能保持毛笔的墨量,还能起到恢复笔毫形状的作用. 由笔触形状特点可得, T_1, T_2 和 T_3 分别与其所处的坐标轴垂直. 本文用 2 条 3 次 Bézier 曲线来拟合笔触形状.

3 次 Bézier 曲线参数形式为 $B(t) = P_0(1-t)^3 +$

$3P_1t(1-t)^2+3P_2t(1-t)+P_3t^3, t \in [0, 1]$, 它有如图 5b 所示的 4 个控制点 P_0, P_1, P_2 和 P_3 , 其中 P_3, P_0 的坐标分别与 T_1, T_0 的重合. 由 Bézier 曲线的性质可得, 曲线在 P_0 点与线段 P_0P_1 相切, 在 P_3 点与线段 P_2P_3 相切. 假设 P_1P_2 是水平的线段, 由于曲线最高点处切线也水平, 结合平行线定理与 Bézier 曲线的定义, 可以得到当 $t=0.5$ 时曲线达到最高点. 由于 P_2, P_3 的横坐标相同, P_1, P_2 的纵坐标相同, 因此顶点 T_0, T_1, T_2 的坐标为 $(-L_t, 0), (L_h, 0), (0, L_l)$, 计算控制点 P_1, P_2 为

$$\begin{cases} P_{1x} = (L_t - 4 \times L_h) / 3 \\ P_{2x} = P_{3x} = L_h \\ P_{1y} = P_{2y} = 4 \times \frac{L_l}{3} \end{cases} \quad (4)$$

同理可计算 P'_1, P'_2 , 这样就确定了标准笔触模型的参数.

4 书写过程模拟

以上建立了几种常见毛笔的标准笔触模型. 下面讨论笔锋运动轨迹, 以及在轮廓与轨迹约束下每个轨迹点的笔触形状的计算方法.

4.1 笔锋运动轨迹

汉字不仅结构和笔画书写复杂, 而且运笔方法也存在多样性, 因此要想从书法汉字图像自动获得其书写时的笔锋运动轨迹非常困难. 图 7 所示为采用本文方法模拟北宋书法家米芾所书“寧”字^[20]的过程, 其“绞转”的运笔方法及复杂的笔锋运动轨迹难以借助现有图像处理或模式识别方法自动得到, 因此本文采用交互方法来确定笔锋运动轨迹.



a “寧”及笔锋运动轨迹 b 本文方法生成的笔触序列

图 7 米芾字帖中“寧”字的笔锋运动轨迹及笔触序列提取

从用户输入的轨迹中得到书写过程每个轨迹点的压感值、坐标和时间, 并在此基础上计算它们的切线角度 θ (由斜率 κ 求得) 和压感值变化程度 η ,

$$\eta = (P_{n,p} - P_{o,p}) / (P_{n,p} + P_{o,p}) \quad (5)$$

其中, P_n 为当前时刻的轨迹点, P_o 为 P_n 前一时刻的轨迹点.

利用 θ, η 可以分析当前的笔锋及运笔方法. 若切线角度 θ 和压感值变化程度 η 都在一个很小的范围 $\pm \epsilon$ 内, 可以判断此时的笔锋为中锋; 若切线角度 θ 较大而压感值变化程度 η 处于 $\pm \epsilon$ 内, 表示“逆锋”、“弯钩”、“折”等情况; 而压感值变化程度 η 较大时则表示出现“提”、“按”等笔法.

为保证轨迹曲线的平滑、笔触形状与动画效果的连续, 计算完每点的 θ 和 η 后, 本文用拉格朗日法结合线性内插法^[21] 得到连续的笔锋运动轨迹. 考虑到所要插值的点距离都很近, 则只取前后 4 点作为取值点, 设 P_o 的前一点为 P_r , 其他同上. 计算 P_o, P_t 差值较大的一个轴, 其线性插值点基函数为

$$P_i \cdot x | y = P_o \cdot x | y + i \times \frac{P_n \cdot x | y - P_o \cdot x | y}{5} \quad (6)$$

再由此基函数分别计算另一个轴的坐标、压感值 P 、时间 t 和切线角度 θ (以下用 P_o, P_1, P_2, P_3 代替 P_r, P_o, P_n, P_t),

$$S(x | y, p, t, \theta)_{P_i} = \sum_{n=0}^3 \lambda_j S(y | x, p, t, \theta)_{P_j} \quad (7)$$

其中 λ_j 为插值基函数,

$$\lambda_j = \prod_{m=0, m \neq j}^3 \frac{P_i \cdot x | y - P_m \cdot x | y}{P_j \cdot x | y - P_m \cdot x | y}$$

这样就获得了连续的笔锋运动轨迹.

4.2 笔画轮廓约束下的笔触形变

综合以上得到的每个轨迹点的坐标、压感值、时间、角度、笔锋和运笔信息, 根据平移、旋转公式就可以求得每个轨迹点上笔触模型的 4 个顶点. 设当前轨迹点坐标为 (N_x, N_y) , 旋转角度为 θ , 那么从标准笔触模型变换到图像坐标系的公式为

$$[x' \ y' \ 1] = [x \ y \ 1] \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ N_x & N_y & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

标准笔触模型的顶点由式(3)得到, 由于笔锋轨迹点已经过插值平滑, 相邻两点的压感值不会突变, 所以笔触形状的变化也是连续的. 再结合以下 4 个步骤, 确定每个轨迹点对应的笔触形状:

Step1. 利用式(8)将标准笔触模型的 4 个顶点旋转平移到当前位置, 根据当前轨迹点的笔锋对顶点进行微调. 如为中锋, 先判断 T_2, T_3 是否在笔画轮廓内, 不在则减小其 L_l, L_r 宽度, 并根据表 1 查找关系参数 α 和 β 来修改 L_t 和 L_h 长度; 否则, 先判断 T_0 是否在笔画轮廓内, 做法同上. 由于笔画轮廓是连续的, 因此经过调整的笔触形状仍然是连续的.

Step2. 将调整后的 4 个顶点平移旋转至标准笔触模型坐标系中, 用式(4)计算 Bézier 曲线的控制点.

Step3. 用式(8)将控制点旋转平移到图像坐标系中,并用 Bézier 曲线参数方程生成笔触形状.

Step4. 结合笔画轮廓再次调整 Step3 中生成的笔触. 每

生成一个笔触,就从原图中复制相应笔触形状所在位置的像素点信息填充到动画的一帧中,保存到动画文件里.

该方法的整个过程如图 8 所示.

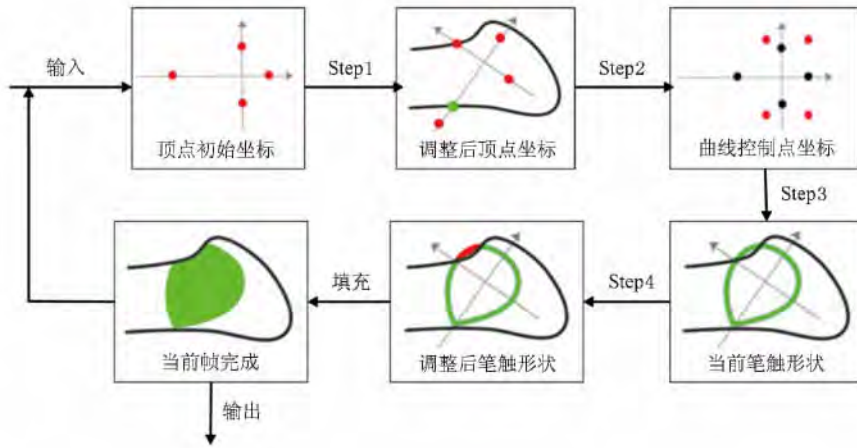


图 8 控制书写过程中笔触形状变化的流程

5 实验及结果分析

我们在 Windows XP 系统下用 VC++ 编程实现了本文算法,硬件环境为 Intel 酷睿双核处理器 T2300(1.66 GHz), 2 GB 内存,用户交互采用 Wacom(Bamboo Pen CTL-460)数位板.

本文提出的笔触模型融入了书法知识,相比于其他模型^[4-8,14-15,17-18],该模型计算速度快、其形变易于控制,尤其在模拟“折”、“弯”、“钩”等笔画连接处表现更加自然,且适用于多种书体的书写动画生成.另外,基于本文方法用户可根据实际应用需要增加

更多的毛笔类型.本文实验中,笔触序列的间隔时间为 300 ms.

楷书是中国书法中最常用的书体,它由点、横、竖、撇、捺和提 6 种基本笔画和其他复杂笔画组成,其笔画多用中锋书写.对于楷书笔画的模拟, Yang 等^[17]用椭圆组合模拟各种笔触效果,再由基本笔画组合成复杂笔画,本文用参数控制笔触模型可以实现不同风格笔画的模拟. Wong 等^[14]则用标准椭圆模拟笔触形状,图 9 所示为该方法与本文方法的实验结果对比,可以看出,本文方法模拟的笔触形状更接近毛笔书写的与纸接触面的真实形状;如表 2 所示,本文提出的笔触模型可随笔锋运动轨迹在笔画

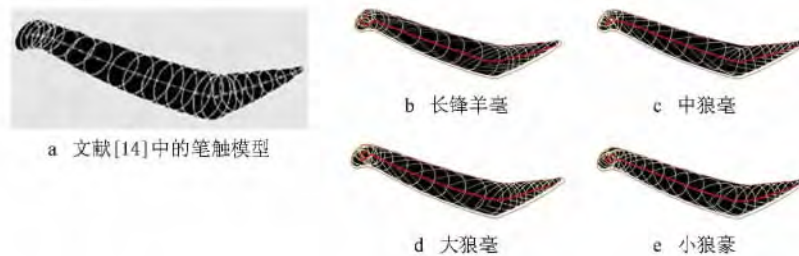




















图 9 不同笔触书写模型结果比较



图 10 本文方法与文献[14]方法生成效果比较

表 2 采用本文不同笔触模型生成的楷书笔画效果

笔画	毛笔类型	楷书轨迹	笔触形状拟合	笔画书写过程截取
横折撇	大狼毫			
横折弯钩	中狼毫			
横折斜钩	大狼毫			
竖钩	大狼毫			
竖弯钩	大狼毫			
撇折点	中狼毫			

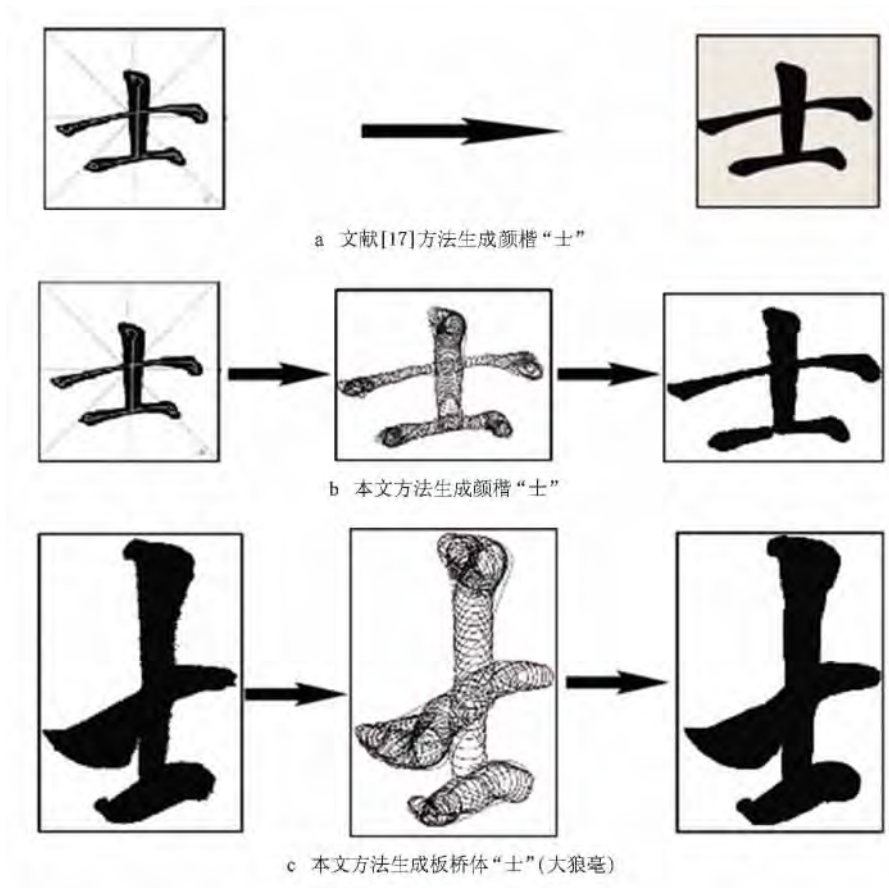


图 11 本文方法与文献[17]方法比较

轮廓约束下自动地调整方向、形状与大小,特别是在笔画的转折、起笔和收笔等处,笔触能更好地拟合字形轮廓,拟合时每 300 ms 显示一次.另外,从图 10 中可以看出,本文方法能更好地还原输入汉字的轮廓细节.从图 11 中可以看出,本文方法能生成笔锋轨迹更为复杂的汉字书写动画.

篆书是中国最古老的书体之一,其笔画宽度均匀齐整、头尾运笔圆转,多用中锋书写,图 12 所示为用本文方法模拟的篆书书写过程截图.隶书产生于

篆书之后,字形偏方,其笔画富于变化,强调“蚕头燕尾”,图 13 所示为用本文方法模拟的隶书书写过程截图.草书是为了书写简便从隶书演变而来的,其结构简单、笔画连绵,图 14 所示为用本文方法模拟的草书书写过程截图.行书是介于草书和楷书之间的一种书体,图 15 所示为用本文方法模拟的行书书写过程截图;另外,本文方法也能生成具有草书效果的笔触纹理,如图 16 所示为用本文方法生成带有飞白效果的书法字.

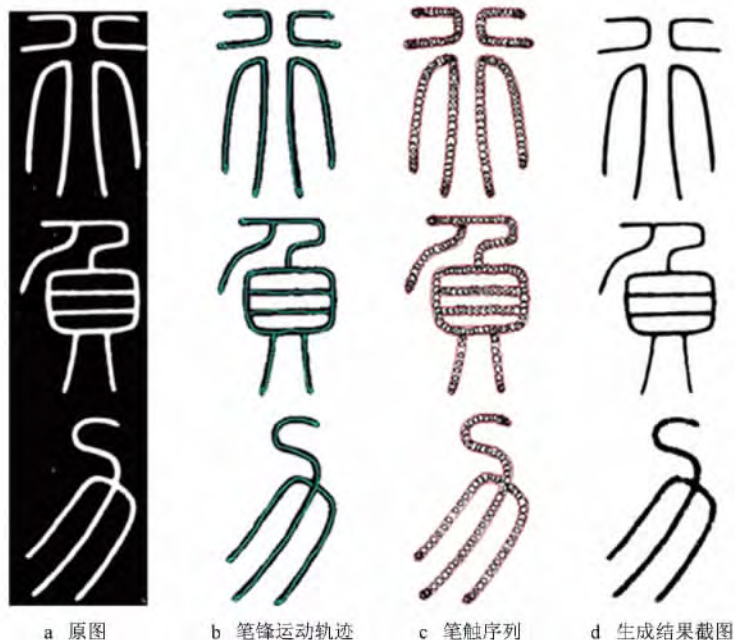


图 12 使用小狼毫书写秦代李斯篆书“行负力”



图 13 使用小狼毫书写汉代隶书“闻所损益”



图 14 使用小狼毫书写唐代怀素草书“颇好笔翰”



图 15 使用小狼毫书写宋代米芾行书“山清气爽”



图 16 有飞白效果的草书“入”

从实验结果可以看出,本文方法能从不同风格的书法图像来临摹其书写动画.但是,本文方法也有不足之处,如需要用户具备一定的书法基础知识.我们将在以后的工作中完善人机交互界面,让用户使用时更为便捷和高效.

6 结 语

本文借助笔触建模方法,建立的参数笔触模型可模拟不同类型毛笔的笔头形状,并通过交互给定

书法汉字的笔锋运动轨迹,自动恢复沿笔锋运动轨迹的笔触时间序列,从书法汉字图像生成其书写动画.该方法提高了传统汉字书写动画的制作效率,能满足影视传媒、数字博物馆以及对外汉语教学等应用领域的汉字书写动画制作需要.

参考文献 (References):

- [1] Srihari S N, Yang X S, Ball G R. Offline Chinese handwriting recognition: an assessment of current technology [J]. *Frontiers of Computer Science in China*, 2007, 1(2): 137-155
- [2] Strassmann S. Hairy brushes [J]. *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, 1986, 20(4): 225-232
- [3] Lee J. Simulating oriental black-ink painting [J]. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 1999, 19(3): 74-81
- [4] Yu Jinhui, Zhang 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]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 1996, 8(4): 241-245)
- [5] 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
- [6] Xu S, Tang M, Lau F, *et al.* A solid model based virtual hairy brush [J]. *Computer Graphics Forum*, 2002, 21(3): 299-308
- [7] Yu J H, Peng Q S. Realistic synthesis of Cao Shu of Chinese calligraphy [J]. *Computers & Graphics*, 2005, 29(1): 145-153
- [8] Mi Xiaofeng, Tang Min, Lin Jianzhen, *et al.* An experience based virtual brush model [J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2003, 40(8): 1244-1251 (in Chinese)
(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)
- [9] 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)
- [10] Zhang Junsong, Yu Jinhui, Mao Guohong, *et al.* Generating brush texture for cursive style calligraphy with autoregressive and stratified sampling [J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2007, 19(11): 1399-1403 (in Chinese)
(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)
- [11] Zhang J S, Yu J H, Mao G H, *et al.* Denoising of Chinese calligraphy tablet images based on run-length statistics and structure characteristic of character strokes [J]. *Journal of Zhejiang University SCIENCE A*, 2006, 7(7): 1178-1186
- [12] Zhang J S, Mao G H, Lin H W, *et al.* Outline font generating from images of ancient Chinese calligraphy [M] // *Lecture Notes in Computer Science*. Heidelberg: Springer, 2011, 6530: 122-131
- [13] Yao F H, Shao G F, Yi J Q. Extracting the trajectory of writing brush in Chinese character calligraphy [J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2004, 17(6): 631-644
- [14] Wong S T S, Leung H, Ip H H S. Model-based analysis of Chinese calligraphy images [J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2008, 109(1): 69-85
- [15] Ning X, Laga H, Saito S, *et al.* Contour-driven Sumi-rendering of real photos [J]. *Computers & Graphics*, 2011, 35(1): 122-134
- [16] Zhuang Y T, Zhang X F, Lu W M, *et al.* Web-based Chinese calligraphy retrieval and learning system [M] // *Lecture Notes in Computer Science*. Heidelberg: Springer, 2005, 3583: 186-196
- [17] Yang L J, Li X S. Animating the brush-writing process of Chinese calligraphy characters [C] // *Proceedings of the 8th IEEE/ACIS International Conference on Computer and Information Science*. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2009: 683-688
- [18] Lam J H M, Yam Y. Stroke trajectory generation experiment for a robotic Chinese calligrapher using a geometric brush footprint model [C] // *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2009: 2315-2320
- [19] Sun Meijun, Sun Jizhou, Wang Zheng, *et al.* Physical simulation of practical 3D brush model [J]. *Journal of Tianjin University*, 2008, 41(3): 293-299 (in Chinese)
(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)
- [20] Shi Zhiwei. *Shu in the post techniques and gen* [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Literature Press, 2008: 1-72 (in Chinese)
(施志伟. *蜀素帖技法与临创* [M]. 上海: 上海科学技术文献出版社, 2008: 1-72)
- [21] Meijering E. A chronology of interpolation: from ancient astronomy to modern signal and image processing [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2002, 90(3): 319-342