SCIENTIA SINICA Informationis

中国图形学新进展专题・论文





考虑笔画和拓扑结构的字形美化方法

戴庆辉1、张俊松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. 福建省仿脑智能系统重点实验室, 厦门 361005
- * 通信作者. E-mail: zhangjs@xmu.edu.cn

收稿日期: 2016-07-14; 接受日期: 2016-09-29; 网络出版日期: 2017-02-20 国家自然科学基金 (批准号: 60903129) 资助项目

本文提出了一种基于在线手写输入的字形美化方法. 首先给定手写体的笔画和拓扑结构的 形式化描述; 然后借助拓扑结构和笔画的稳定性计算, 采用类似轮盘赌的方法从用户手写样本中得 到最佳的拓扑结构和笔画集, 并分别对输入汉字的空间布局和各个笔画进行美化; 最后通过分析书 法理论中"笔断意连"的几种常见模式,确定需要笔断意连的笔画,实现笔画之间的呼应关系优化, 从而得到符合书法审美要求的字形.

关键词 手写体,字形美化,笔断意连,在线,书法

引言 1

字形美化是指结合书法的审美要求和经验知识,对在线或离线手写汉字的笔画、空间拓扑关系等 进行优化, 达到美化字形的目的. 尽管在数字时代, 印刷体的广泛使用的确为人们在文字录入等方面 带来极大的便利, 然而在一些特定的文字应用场合, 比如人们在书写电子贺卡、私人信件和使用即时 通信软件时, 手写体 "见字如面"的效果仍然具有印刷体无法取代的作用, 如果能录入具有个人手写 风格的文字,则能更好地传达情感.

近年来,随着人机交互设备的普及,特别是数位板、触摸屏的广泛应用,为手写体字形的美化提供 了硬件支持. 但在数位板或触摸屏等媒介上书写汉字毕竟不如纸上书写那么自然. 加上人们已习惯使 用电脑而疏于练习书法,导致手写体的质量不如人意. 因此,如何提供一种有效的手写体美化方法,在 美化用户手写体字形的同时又不失其个人风格, 就成为手写字形美化的关键问题.

众所周知, 汉字是由笔画以一定的空间布局方式组合而成的. 从书法的角度来看, 字形优美的汉 字不仅要求每一个笔画书写美观,而且部首的空间拓扑关系也要符合书法结体的审美要求. 从个人风 格的角度来看,如果用户以某一种空间拓扑关系书写汉字部首次数越多,或者以某一种笔画形状书写

引用格式: 戴庆辉, 张俊松. 考虑笔画和拓扑结构的字形美化方法. 中国科学: 信息科学, 2017, 47: 468-481, doi: 10.1360/N112016-00173

Dai Q H, Zhang J H. Beautifying handwriting characters based on the optimization of strokes and structure (in Chinese). Sci Sin Inform, 2017, 47: 468–481, doi: 10.1360/N112016-00173

次数越多,则这种空间拓扑关系和笔画的书写稳定程度就越高,也越能体现用户的书写风格.除上述单个笔画和部首间的拓扑关系影响字形的美观外,笔画之间的呼应关系,即笔断意连的视觉艺术效果,也对字形的美观度也有重要影响.

因此,字形美化主要考虑如下三个问题: (1) 如何获取用户稳定程度高的笔画和拓扑关系; (2) 如何美化单个笔画和笔画之间的空间拓扑关系; (3) 如何增强笔画之间的呼应、连带, 即笔断意连的艺术效果. 目前大部分字形美化工作主要通过分析单个笔画的形状特征, 如利用形状匹配等方法找到相似的标准笔画进行美化 [1~5], 或者利用曲线拟合, 调整笔画的形状, 以达到美化目的 [6~8]. 这些工作虽然能做到单个笔画的美化, 却往往忽略了笔画与笔画之间的空间拓扑关系, 特别是笔画之间的呼应、连带等艺术效果的实现, 因此美化结果还不理想.

本文提出了一种基于在线手写输入的字形美化新方法, 具体有如下两方面的贡献:

- (1) 在手写体字形的笔画和拓扑结构的形式化描述的基础上, 构建在线手写字形拓扑关系稳定性 和笔画形状稳定性度量方法, 实现对在线字形的笔画和拓扑结构进行美化;
- (2) 引入书法理论中笔断意连的思想, 通过分析书法理论中笔断意连的几种常见模式, 实现笔画之间的呼应关系优化, 从而得到美观的汉字字形效果.

2 相关工作

近年来, 研究人员在汉字字形计算方面开展了很多工作, 除了传统的汉字识别以外, 结合书法的 汉字字形研究可大致分为两类: 字形合成和字形美化. 在字形合成方面, 主要涉及书法作品合成 ^[9~12]和个人风格字体生成 ^[13,14]等; 在字形美化方面, 则主要包括在线手写体美化 ^[1~3,6,8]、离线手写体美化 ^[4,5], 以及笔画线条美化 ^[15]; 此外, 也有一些工作侧重于字形的美学评价 ^[16,17]、书法临摹过程仿真 ^[18]、虚拟毛笔仿真 ^[19],以及书法图像去噪 ^[20]等.

在字形美化方面, Li 等 [1] 通过识别在线输入的笔画, 从标准笔画库中找出最相似的笔画对输入笔画进行美化, 并利用标准楷体风格的汉字调整输入汉字的间架结构, 从而达到美化目的. Zitnick ^[2] 采用一种实时匹配用户的样本笔画, 通过加权平均的方法来对在线手写字形进行美化. Hou 等 ^[6] 对汉字笔画连接部分进行贝塞尔曲线拟合, 同时调整笔画的书写速度和宽度, 得到理想的笔画形状. Shi 等 ^[4] 对输入的手写体图片进行归一化, 并用对应的印刷体调整手写体的视觉效果, 然后用贝叶斯方法对手写体进行平移、旋转、缩放等操作, 从而美化手写字形. 上述这些工作大多针对单一笔画进行美化, Li 等 ^[1] 由于每次都从笔画库中寻找最相似的笔画来美化笔画, 难以满足书法对笔画多样性的要求, 导致生成的结果缺乏变化; Zitnick ^[2] 由于缺乏对用户样本笔画进行筛选, 使得一部分书写效果不好的笔画同样用来美化当前的书写笔画, 导致美化的效果不佳. Hou 等 ^[6] 对于有多个连接组件的笔画, 采用随机不重复选择的原则, 导致美化结果和真实的书写风格存在一定的偏差.

在字形合成方面, Xu 等 ^[9] 通过构建一个计算笔画书写稳定性和笔画之间拓扑关系的稳定性模型, 生成和用户风格相似的书法作品. Shi 等 ^[11] 对汉字部件, 如笔画和偏旁部首等结构进行分析建模, 并利用 Mar 视觉理论和书法先验知识指导汉字自动生成. Lin 等 ^[13] 利用网络接口对汉字的部件位置和大小进行人工标注, 然后利用少量的汉字提取所需的部件来合成其他汉字. 大多数工作 ^[9~12,14] 都是在离线情况下进行字形处理, 需要对汉字图片进行降噪, 骨架轮廓提取等矢量化操作, 因而对合成结果有一定的影响.

此外, 在书法的创作过程中, 书法家除了考虑笔画和间架结构遵循书法的审美要求, 在行笔时也很注重笔画与笔画之间的呼应、连带等视觉效果, 即笔断意连, 而以上无论字形合成, 还是字形美化的

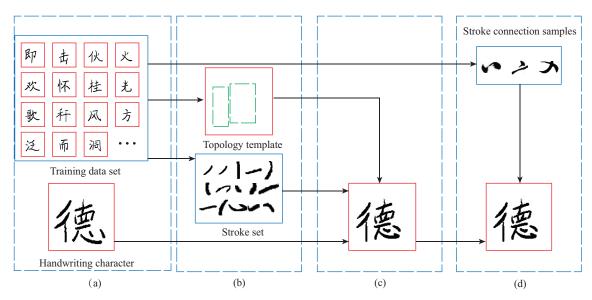


图 1 (网络版彩图) 系统整体流程图

Figure 1 (Color online) System framework. (a) Input; (b) stability calculation of handwriting; (c) the beautify of the stroke and topology; (d) stroke connection

前人工作在构建字形美化算法时,都忽略了这一重要书法视觉效果.

为了提供一种有效的字形美化方法,本文在上述方法的基础上,综合考虑字形结构、笔画的优化,尤其是笔画之间笔断意连,即空中行笔的视觉特征,通过分析笔断意连的几种常见模式,实现笔画之间的呼应关系优化,从而得到符合书法审美要求的汉字.

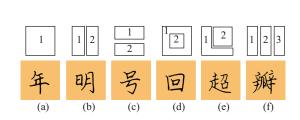
3 方法

本文方法的整体流程如图 1 所示. 首先, 实时记录用户书写过程的笔画, 构建训练样本库, 获得手写汉字的笔画、部件和结构信息. 其次, 利用手写识别方法识别出用户手写输入汉字, 并对识别汉字的所有部件查找对应的训练样本集, 以及根据部件拓扑关系稳定性和笔画形状稳定性度量方法计算合适的部件和笔画集, 从而对手写汉字的各个笔画进行美化. 最后引入书法中笔断意连的几种常见模式对前一步得到的结果做进一步美化.

3.1 训练样本采集和预处理

由于汉字是由不同的笔画组合而成的,加上手写笔画形状的多样性,使得自动分割汉字并识别出每一个部件变得相当困难.此外,即使相同的部件,由于汉字部件间的拓扑关系不同,其各个部件的书写风格往往不同,如"好"字和"委"字中部件"女"书写风格就有一定的差异.因此,为了得到准确的汉字部件划分结果,主要采用交互的方式来实现.

训练样本采集、预处理阶段主要有汉字结构布局分类、部件信息录入和笔画数据采集.根据汉字使用频率表,本文收录了最常用的 500 个汉字作为训练样本集.对每一个汉字,通过指定其所属的结构布局种类,记录其每一个部件的详细信息,以及针对不同手写用户 (书法家或者普通书写者),实时记录其手写该汉字的笔画数据,引入自然语言处理中倒排索引的方法[21],倒排索引是一种用来存储在



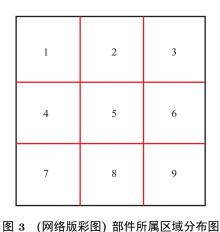


图 2 (网络版彩图) 汉字结构布局. (a) 独体结构; (b) 左右结构; (c) 上下结构; (d) 全包围结构; (e) 半包围结构; (f) 左中右结构

Figure 3 (Color online) The distribution of component

Figure 2 (Color online) The structure style of Chinese characters. (a) Sole structure; (b) left-right structure; (c) up-down structure; (d) all surrounding structure; (e) half surrounding structure; (f) left-middle-right structure

全文搜索下某个单词在一个文档或者一组文档中的存储位置的映射的索引方法.通过倒排索引,可以根据单词快速获取包含这个单词的文档列表.将所有的信息以部件为查询关键字,以倒排索引的方式存入该用户的个性化训练样本库中,以便后续用于手写体美化.

3.1.1 汉字结构布局分类

类似文献 [10] 的汉字拓扑结构分类方法, 根据常见汉字结构类型, 汉字的结构布局主要考虑如图 2 所示的六种情况.

3.1.2 部件信息录入

通过观察不同汉字的结构布局,本文首先将汉字划分为九个区域,如图 3 所示. 针对不同结构布局的汉字,本文对该结构布局的每一个部件根据其部件包围盒中心确定其大致所处的区域,如图 2 中结构 (a) 的部件 1 所处的区域为 5,结构 (c) 的部件 2 所处的区域为 8,结构 (e) 的部件 2 所处的区域为 3 等. 同时,记录每一个汉字各个部件的起笔数和终笔数,如图 2 中汉字"号"的部件 2 的起笔数为 4,表示第四笔为该部件的起始笔画,终笔数为 5,表示第五笔为该部件的终止笔画.

3.1.3 笔画数据采集

有了汉字的结构布局信息和部件信息,针对不同的手写用户,借助手写板,实时记录其手写笔画数据(每一个点的位置 (x, y) 和压感值 P),并根据该部件的起笔数和终笔数,将对应的笔画数据存入该部件的倒排索引文件中以便手写体美化查询.

3.2 字形美化

字形美化主要分为三步: 首先根据手写风格稳定性计算, 从训练样本库中选出合适的拓扑关系和笔画集. 接着按照选出的拓扑关系和笔画集对输入的手写汉字进行笔画和拓扑关系的美化. 最后根据

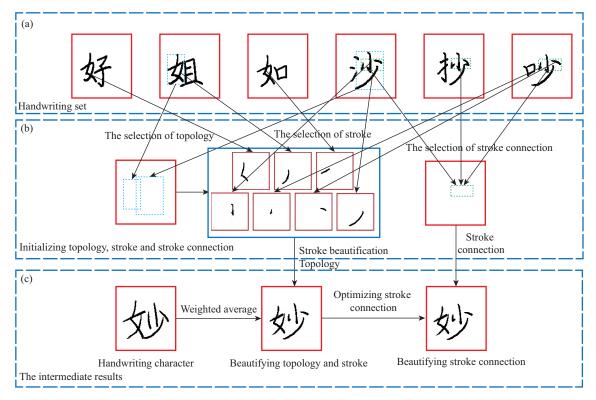


图 4 (网络版彩图) 字形美化过程. (a) 用户手写样本集; (b) 确定需要笔断意连的笔画, 通过笔画呼应优化方法生成美化结果; (c) 美化过程的中间结果图

Figure 4 (Color online) The process of character beautification. (a) Handwriting set; (b) determining which strokes need to consider stroke connection, and generating the result using stroke optimization method; (c) the intermediate results

几种常见的笔断意连模式对前一步得到的结果进行笔画之间呼应的美化.

3.2.1 书写风格的稳定性计算

给定一个待美化的在线手写汉字 Character^H,利用汉字手写识别方法识别出该手写汉字的标准楷体字 Character^S,接着按照汉字结构布局可以得到该汉字的 m 个部件 Component,然后对该汉字的每一个部件 Component $\{1 \le i \le m\}$,通过倒排索引表得到相应的 n 个手写样本 Component $\{1 \le i \le m\}$,通过倒排索引表得到相应的 n 个手写样本 Component $\{1 \le i \le m\}$,是 Xu 等 $\{0 \}$ 的启发,本文计算每个手写样本的拓扑关系稳定程度 $\{0 \}$ 中各笔笔画的书写稳定程度 $\{0 \}$ がおいた。 $\{0 \}$ 从而利用类似轮盘赌的方法来选出一个合适的拓扑关系 $\{0 \}$ 和等值集 $\{0 \}$ 。接着由拓扑关系 $\{0 \}$ 的部件包围盒来约束待美化手写汉字对应部件的位置和大小,由笔画集 $\{0 \}$ 和待美化手写汉字 Character $\{0 \}$ 来生成新的笔画。如图 4 所示为字形美化过程。

一般来说, 书写者以一个特定的拓扑关系或者笔画形状来书写的次数越多, 该拓扑关系或者笔画形状的稳定程度也就越高. 越稳定的拓扑关系和笔画形状, 越能体现个人书写风格 ^[9].

给定两个笔画形状 S_1 和 S_2 , 笔画形状由一系列离散笔画数据点和对应的宽度构成, 与文献 [9] 所述方法不同, 他们的笔画形状是图片层次的, 因而采用的是笔画形状重叠区域的面积来计算两者的相似性. 而本文笔画数据点是由数位板在线输入得到的, 因此采用的是笔画数据点的重叠点数目来计算

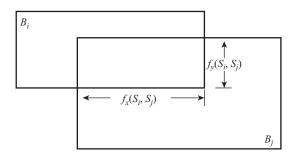


图 5 包围盒重叠程度计算

Figure 5 Computing the overlapping of bounding boxes

两者的相似性. 如果两个笔画数据点距离在一定的阈值内, 则认为其笔画数据点重叠. 定义如下:

$$\varphi^{\text{stroke}}(S_1, S_2) = 1 - \max_{T} \frac{C(S_1 \cap T(S_2))}{C(S_1 \cup T(S_2))},\tag{1}$$

其中, C(X) 表示集合 X 的个数, $T(S_2)$ 是通过平移、旋转和缩放等变换将笔画 S_2 和笔画 S_1 对齐, 使两个笔画最大化地重叠. $\varphi^{\text{stroke}}(S_1,S_2)$ 的值介于 0 和 1 之间, 0 表示两个笔画完全一致, 1 则表示两个笔画完全不同.

假设一个人多次书写某个笔画,得到多个不同的笔画形状 $S_i(i=1,2,...,m)$. 为了刻画这些笔画形状的稳定程度,本文首先用式 (1) 计算这些笔画形状的成对距离,寻找最大的成对距离,记为 D_{\max}^{stroke} .接着,对每个笔画 S_i ,计算其书写稳定程度 $\psi^{\text{stroke}}(S_i)$,定义如下:

$$\psi^{\text{stroke}}(S_i) = \frac{\psi^{\text{stroke}}(S_i)}{\sum_{j=1}^m \psi^{\text{stroke}}(S_j)},\tag{2}$$

$$\widehat{\psi^{\text{stroke}}(S_i)} = \sum_{j=1}^{m} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(\frac{\varphi^{\text{stroke}}(S_i, S_j)^2}{-2\sigma^2}\right),\tag{3}$$

其中, $\sigma = 0.1 D_{\text{max}}^{\text{stroke}}$.

对于任意两个部件 Component₁ 和 Component₂, 记它们对应的拓扑关系分别为 T_1 和 T_2 , $\varphi^{\text{topo}}(T_1, T_2)$ 为两者的相似程度, 定义如下:

$$\varphi^{\text{topo}}(T_1, T_2) = \| \boldsymbol{F}_x(T_1) - \boldsymbol{F}_x(T_2) \| + \| \boldsymbol{F}_y(T_1) - \boldsymbol{F}_y(T_2) \|, \tag{4}$$

其中, ||●|| 为欧氏距离.

因此,假设一个人多次书写同一个汉字部件,在得到多个不同的拓扑关系后,记为 $T_1, T_2, ..., T_m$. 我们用式 (4) 计算这些拓扑关系的成对距离,寻找最大的成对距离,记为 D_{\max}^{topo} . 接着,对每一个拓扑关系 T_i , 计算其书写稳定程度 $\psi^{\text{topo}}(T_i)$, 定义如下:

$$\psi^{\text{topo}}(T_i) = \frac{\psi^{\widehat{\text{topo}}}(T_i)}{\sum_{j=1}^{m} \psi^{\widehat{\text{topo}}}(T_j)},\tag{5}$$

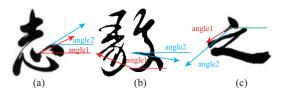


图 6 (网络版彩图) 笔断意连的几种常见模式. (a) 前一笔的末尾方向和下一笔的起始方向一致; (b) 前一笔的末尾方向和下一笔的起始方向相反; (c) 下一笔的起笔位置正好处在前一笔的末尾方向的延长线

Figure 6 (Color online) Some common patterns of stroke connection. (a) The direction is the same between the end of current stroke and the begin of next stroke; (b) the direction is opposite between the end of current stroke and the begin of next stroke; (c) the begin of next stroke locates on the extension cord of the end of current stroke

$$\widehat{\psi^{\text{topo}}(T_i)} = \sum_{j=1}^{m} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(\frac{\varphi^{\text{topo}}(T_i, T_j)^2}{-2\sigma^2}\right),\tag{6}$$

其中, $\sigma = 0.1 D_{\text{max}}^{\text{topo}}$.

3.2.2 笔画和拓扑关系的美化

在得到每个手写样本的拓扑关系稳定程度 $\psi^{\text{topo}}(T_i)$, 手写样本中各笔画的书写稳定程度 $\psi^{\text{stroke}}(S_i)$ 后, 本文利用类似轮盘赌的方式来决定合适的拓扑关系 \hat{T} 和笔画集 \hat{S} . 接着由拓扑关系 \hat{T} 来约束待美化手写汉字 Character 中每一个笔画包围盒的位置和大小, 由笔画集 \hat{S} 和待美化手写汉字 Character 来生成新的笔画. 具体地, 首先将笔画集 \hat{S} 和待美化手写汉字 Character 按照拓扑关系 \hat{T} 对应笔画的包围盒进行映射, 使得新的笔画集 \widehat{S}_{new} 和待美化手写汉字 Character 的笔画处于相同的包围盒内, 接着对新的笔画集 \widehat{S}_{new} 和待美化手写汉字 Character 进行重新采样, 使其每一个笔画的数据点数目一致, 然后用如下公式来计算新的笔画数据点生成:

$$point_i = \lambda \cdot point_i^{S_j} + \mu \cdot point_i^{C_j}, \tag{7}$$

其中, $S_j \in \widehat{S_{\text{new}}}$ 表示笔画集 $\widehat{S_{\text{new}}}$ 中第 j 个笔画, $C_j \in \text{Character}_{\text{new}}^H$ 表示待美化手写汉字 $\text{Character}_{\text{new}}^H$ 中的第 j 个笔画, $\text{point}_i^{S_j}$ 表示 S_j 中第 i 个数据点, $\text{point}_i^{C_j}$ 表示 C_j 中第 i 个数据点, λ , μ 分别表示手写样本和待优化手写汉字所占的权重, 本文经验地设置 $\lambda = \mu = 0.5$.

3.2.3 笔断意连

上述手写体美化结果仅仅考虑到单个笔画的优化,还没有考虑到笔画与笔画之间的关系.有经验的书法爱好者不仅要注意笔画的先后顺序,还要注意笔画间的承接呼应方式,即笔断意连.所谓笔断意连是指书写时,笔画与笔画之间虽然不一定相连,但是气势却是连续不断,给人一种一气呵成的感觉.正确地认识和把握好笔画间的承接呼应方式,才能使写出来的字气韵畅达、遒劲优美、充满生机活力.笔断意连是当前手写体美化、合成工作所忽略的部分.因此,本文试图对手写样本集中每一个部件中笔画与笔画之间的相互关系进行分析,学习用户书写风格,对前面的手写体美化结果做进一步优化,实现汉字笔断意连的效果.具体地,主要考虑以下三种情况来判断笔画与笔画之间是否需要笔断意连效果,如图 6 所示:

(a) 如果第 i 笔的末尾方向和第 i+1 笔的起始方向一致,则这两个笔画之间需要考虑笔断意连效果.

$$\operatorname{Term}_{a}(S_{i}, S_{i+1}) = \begin{cases} 1, & \text{if } |\operatorname{angle}_{1} - \operatorname{angle}_{2}| < \tau; \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases}$$
 (8)

(b) 如果第 i 笔的末尾方向和第 i+1 笔的起始方向相反,则这两个笔画之间需要考虑笔断意连效果.

$$\operatorname{Term}_{b}(S_{i}, S_{i+1}) = \begin{cases} 1, & \text{if } ||\operatorname{angle}_{1} - \operatorname{angle}_{2}| - 180| < \tau; \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases}$$

$$(9)$$

(c) 如果第 i+1 笔的起笔落在第 i 笔的末尾方向的延长线上, 则这两个笔画之间需要考虑笔断意 连效果.

$$\operatorname{Term}_{c}(S_{i}, S_{i+1}) = \begin{cases} 1, & \text{if } |\operatorname{angle}_{1} - \operatorname{angle}_{2}| < \tau; \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases}$$
 (10)

其中, $\tau = 30$ 为一个预先给定的经验阈值.

因此, 对于任意部件的连续两笔需要笔断意连效果的概率 Prob, 可以通过如下公式计算得到:

$$Prob(S_i, S_{i+1}) = \frac{1}{t} \sum_{j=1}^{t} sgn(Term_a(S_i^j, S_{i+1}^j) + Term_b(S_i^j, S_{i+1}^j) + Term_c(S_i^j, S_{i+1}^j)),$$
(11)

其中, t 表示训练样本集中该部件的个数.

对上述得到的手写体美化结果, 分别计算每一对连续笔画需要笔断意连效果的概率 Prob, 如果需要笔断意连, 则首先对该笔画对进行贝塞尔曲线拟合, 然后从两笔之间拟合得到的贝塞尔曲线选取适当数目的点 n(本文经验地设置 $n = 0.1 \times N$, 其中, N 为第一笔的采样点数) 加入到第一笔的末尾, 从而生成类似笔断意连效果.

4 实验及结果分析

本文在 Windows 8.1 系统下用 VS 2012 编程实现了本文算法, 硬件环境为 Intel 酷睿四核处理器 i5-3470 (3.2 GHz), 8 GB 内存, 用户交互采用 Wacom (intuos 5 PTH-650) 数位板.

图 7~9 所示为分别针对单个笔画、笔画空间布局,以及笔断意连的美化效果. 图 7 所示为本文方法对汉字进行笔画美化的效果. 给定的待美化手写体均为部件空间位置正常, 但笔画书写不好的例子. 如"清"字的三点水过长; "侗"字的单人旁过短等.

图 8 所示为本文方法对汉字进行空间布局美化的效果. 给定的待美化手写体均为笔画书写正常,但部件与部件之间的空间位置不好的例子. 如 "秋"字的 "禾"和 "火"两个部件离得太开; "掉"字的 "扌"和 "卓"没有对齐等.

图 9 所示为本文方法对汉字进行笔断意连效果美化的结果. 如"小"的第一笔和第二笔之间, 第二笔和第三笔之间; "之"字的第一笔和第二笔之间等; 根据用户书写风格, 均需要笔断意连效果. 从实验结果可以看出美化后的笔断意连效果很好地保留了用户的手写样本风格.

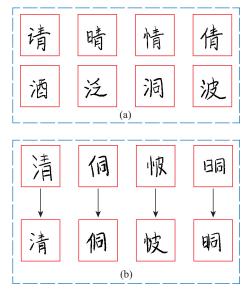


图 7 (网络版彩图) 笔画美化结果

Figure 7 (Color online) Beautified stroke. (a) Handwriting examples; (b) the beautification of stroke

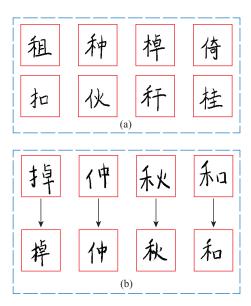


图 8 (网络版彩图) 空间布局美化结果

Figure 8 (Color online) Beautified structure. (a) Hand-writing examples; (b) the beautification of topology structure

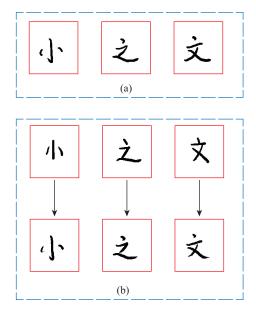


图 9 (网络版彩图) 笔断意连美化结果

Figure 9 (Color online) Beautified stroke connection. (a) Handwriting examples; (b) the beautification of stroke connection

图 10 展示了使用本文方法得到更多字形美化结果. 由实验结果可以看出, 本文方法在笔画的书写、部件与部件之间的空间布局, 以及笔断意连的表现方面, 都可以很好地保留用户的书写风格, 并且适用于大多数常见汉字的美化.



图 10 (网络版彩图) 更多实验结果

Figure 10 (Color online) More experiment results. (a) Training data set; (b) handwriting examples; (c) beautification results

图 11 为本文工作与文献 [9] 的对比. 其中图 11(a) 为文献 [9] 中书法家的手写样本, 本文将其作为我们的训练样本; 图 11(b) 为本文待美化的手写体; 图 11(c) 为输入标准楷体字采用文献 [9] 方法合成的结果; 图 11(d) 为输入图 11(b) 采用本文方法美化的结果. 从图 11 可以看出, 本文方法不仅能很

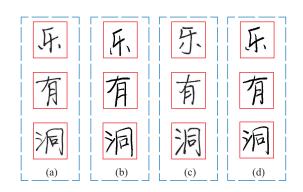


图 11 (网络版彩图) 实验结果比较. (a) 来自文献 [9] 中书法家的作品作为本文的训练样本; (b) 为本文的待美化手写体; (c) 为文献 [9] 生成的结果; (d) 为本文美化的结果

Figure 11 (Color online) The comparison of experiment results. (a) The input from Ref. [9]'s work; (b) the handwriting before beautification; (c) the results of Ref. [9]; (d) our results

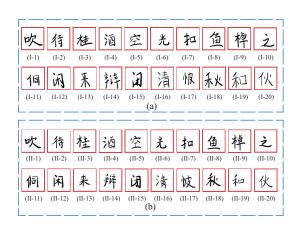


图 12 (网络版彩图) 不同汉字美化前后效果对比图 Figure 12 (Color online) The results before and after beautification. (a) Handwriting examples; (b) the beautification results

好地保留训练样本的手写风格, 还考虑了笔画之间的呼应关系, 即笔断意连的效果. 如图 11(d) 中 "乐"字的第 3 笔和第 4 笔, 第 4 笔和第 5 笔之间的呼应; 图 11(d) 中 "有"字的第 4 笔和第 5 笔, 第 5 笔和第 6 笔之间的呼应; 图 11(d) 中 "洞"字的第 2 笔和第 3 笔之间的呼应等. 而这些方面文献 [9] 却没有体现.

此外, 我们也采用用户问卷调查的方式, 进一步测试了本文方法得到的结果是否能达到美化效果, 以及是否能保留用户的手写风格. 总共有 10 名志愿者参加了本次问卷调查, 其中男性 6 名、女性 4 名, 年龄在 18 岁到 30 岁之间. 我们给每位志愿者提供了 20 组不同汉字美化前后的效果, 如图 12 所示, 其中 (I-1) 到 (I-5) 是用户顺着钢笔字帖随意临摹的手写体美化前后对比, (I-6) 到 (I-10) 是用户看着钢笔字帖仔细书写的手写体美化前后对比, (I-11) 到 (I-20) 是用户无任何参考随意书写的手写体美化前后对比. 我们要求志愿者对每组对比图的美化程度进行打分, 打分的范围是 1~7 分. 1 分表示"美化得很不美观", 7 分表示"美化得很美观". 同时对每组对比图的用户手写风格保留程度进行打分, 打分的范围是 1~7 分. 1 分表示"用户手写风格保留得很好".

评分的统计结果如图 13 所示. 从问卷结果统计中可以得知, 手写体美化程度的平均得分为 5.46, 标准偏差为 0.36. 书写风格保留程度的平均得分为 5.35, 标准偏差为 0.42. 由此可以看出本文的美化结果大多介于较美观和美观之间, 手写风格保留大多介于较好和好之间. 实验结果说明本文方法能较好地对手写体进行个人风格保留的美化. 当然本文方法由于训练样本的差异性, 导致不同汉字的美化效果有所偏差, 如 (I-8) 的美化程度评分为 6.4, 手写风格保留程度为 6.2, 而 (I-6) 的美化程度只有 4.1, (I-16) 的书写风格保留程度只有 4.9.

另外,本文的方法也存在一定局限性,如目前不能处理所有风格的汉字 (如草书),因为不同用户手写风格差异较大,导致其部件的起笔数和终笔数难以确定.此外,本文的美化直接使用加权平均,达到兼顾美化和输入风格的目的,但理论上得到的笔画在视觉上不一定"好看".如图 10 美化结果的"客"字,由于训练样本中的部首"宀"的第三笔中的"折"较短,导致图 10 手写样本的"客"字第三笔加权

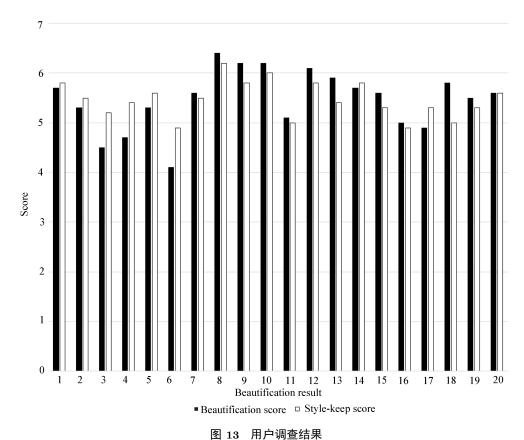


Figure 13 The results of user study

后的笔画"折"的效果不太明显. 上述这些不足, 我们将在未来工作中改进.

5 结语

本文提出了一种基于在线手写输入的字形美化新方法. 首先构建字形拓扑关系稳定性和笔画形状稳定性的度量方法, 然后利用用户手写样本中书写较好的笔画和拓扑关系较好的部件对字形的笔画和拓扑结构进行美化. 最后分析书法理论中笔断意连的几种常见模式, 利用曲线拟合方法对笔画之间的衔接关系进行优化, 从而得到美观的汉字字形效果. 本文方法在个性化字库构建、汉字书法教育等领域有着潜在的应用前景.

参考文献

- 1 Li H, Liu P, Xu S, et al. Calligraphy beautification method for Chinese handwritings. In: Proceedings of the 4th IEEE International Conference on Digital Home, Guangzhou, 2012. 122–127
- 2 Zitnick C L. Handwriting beautification using token means. ACM Trans Graph, 2013, 32: 53
- 3 Yi T, Lian Z, Tang Y, et al. A data-driven personalized digital ink for Chinese characters. Lect Notes Comput Sci, 2014, 8325: 254–265
- 4 Shi C, Xiao J, Xu C, et al. Nonlinear and non-gaussian Bayesian based handwriting beautification. In: Proceedings of International Society for Optics and Photonics, IS&T/SPIE Electronic Imaging, San Diego, 2014. 902012

- 5 Shi C, Xiao J, Xu C, et al. Visual improvement for bad handwriting based on monte-carlo method. In: Proceedings of International Society for Optics and Photonics, IS&T/SPIE Electronic Imaging, San Diego, 2014. 902708
- 6 Hou S, Xu P. An algorithm of calligraphy beautification based on improved velocity and width model. In: Proceedings of 2nd International Conference on Computer Science, Computer Engineering, and Social Media, Kuala Lumpur, 2015. 123–127
- 7 Liu L, Xia W, Jin L, et al. A kai style contour beautification method for Chinese handwriting characters. In: Proceedings of IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, Istanbul, 2010. 3644–3649
- 8 Chen L K. A contour-based real time handwriting beautification method and applications. Dissertation for Ph.D. Degree. Guangzhou: South China University of Technology, 2014 [陈露开. 基于轮廓方法的实时手写美化技术及应用. 博士学位论文. 广州: 华南理工大学, 2014]
- 9 Xu S, Jiang H, Jin T, et al. Automatic generation of Chinese calligraphic writings with style. IEEE Intell Syst, 2009, 24: 44–53
- 10 Xu S, Jiang H, Jin T, et al. Automatic facsimile of Chinese calligraphic writings. Comput Graph Forum, 2008, 27: 1879–1886
- 11 Shi C, Xiao J, Jia W, et al. Automatic generation of Chinese character based on human vision and prior knowledge of calligraphy. Nat Lang Proc Chin Comput, 2012, 333: 23–33
- 12 Shi C, Xiao J, Xu C, et al. Automatic generation of Chinese character using features fusion from calligraphy and font. In: Proceedings of International Society for Optics and Photonics, IS&T/SPIE Electronic Imaging, San Diego, 2014. 90120N
- 13 Lin J W, Hong C Y, Chang R I, et al. Complete font generation of Chinese characters in personal handwriting style.
 In: Proceedings of IEEE 34th International Performance Computing and Communications Conference, Nanjing, 2015.
 1–5
- 14 Pan W, Lian Z, Sun R, et al. FlexiFont: a flexible system to generate personal font libraries. In: Proceedings of the 2014 ACM Symposium on Document Engineering, Fort Collins, 2014. 17–20
- 15 Orbay G, Kara L B. Beautification of design sketches using trainable stroke clustering and curve fitting. IEEE Trans Vis Comput Graph, 2011, 17: 694–708
- 16 Chang W D, Shin J. A statistical handwriting model for style-preserving and variable character synthesis. Int J Doc Anal Recog, 2012, 15: 1–19
- 17 Sun R, Lian Z, Tang Y, et al. Aesthetic visual quality evaluation of Chinese handwritings. In: Proceedings of the 24th International Conference on Artificial Intelligence, Halifax, 2015. 2510–2516
- 18 Zhang J S, Zhang Y M, Zhou C L. Simulating the writing process from Chinese calligraphy image. J Comput Aided Design Comput Graph, 2014, 26: 963–972 [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. 计算机 辅助设计与图形学学报, 2014, 26: 963–972]
- 19 Zhang J S, Yu J H, Mao G H, et al. Generating brush texture for cursive style calligraphy with autoregressive and stratified sampling. J Comput Aided Design Comput Graph, 2007, 19: 1399–1403 [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. 计算机辅助设计与图形学学报, 2007, 19: 1399–1403]
- 20 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 Zhejiang Univ Sci A, 2006, 7: 1178–1186
- 21 Wang Y D, Liang J Z. Real-time retrieval in Chinese webpage by using keywords inverted table. Comput Eng Appl, 2010, 46: 135–137 [王远定, 梁久祯. 利用关键词倒排表实时检索中文网页. 计算机工程与应用, 2010, 46: 135–137]

Beautifying handwriting characters based on the optimization of strokes and structure

Qinghui DAI¹ & Junsong ZHANG^{2*}

- 1. Mind, Art & Computation Group, Cognitive Science Department, Xiamen University, Xiamen 361005, China;
- 2. Fujian Key Laboratory of the Brain-like Intelligent Systems, Xiamen University, Xiamen 361005, China
- * Corresponding author. E-mail: zhangjs@xmu.edu.cn

Abstract In this paper, we propose a method for beautifying online handwriting characters. First, we introduce a formalization description of the handwriting's topological structure and strokes. Then, in order to beautify the spatial arrangement and strokes of the input character, we capture the writers' stability factors for the topology and strokes of their handwriting, and select a suitable topological structure and strokes from users' handwritten samples, using the "roulette wheel" method. In addition, we analyze certain classical stroke connection types as described in calligraphy theory, and determine which strokes need to consider visual effects. Finally, we apply curve fitting to optimize the stroke relations in order to generate a final result that meets the calligraphy aesthetics requirements.

Keywords handwriting, handwriting beautification, structure optimization, online, calligraphy



Qinghui DAI was born in 1991. He received a B.S. degree in Intelligent Science and Technology from Xiamen University, Xiamen, China, in 2014. He is currently pursuing an M.S. degree at Xiamen University. His research interests include calligraphy beautification and spatial layout optimal.



Junsong ZHANG was born in 1978. He received a Ph.D. degree in Computer Science from the State Key Lab of CAD & CG, Zhejiang University, Hangzhou, China, in 2008. He is currently an associate professor at the Mind, Art and Computation Group, Cognitive Science Department, Xiamen University, Xiamen, China. His main research interests include computer graphics, human computer interaction, Chinese informa-

tion processing, and brain & cognitive science.