



数字书法研究综述

张俊松^{1,2}

1. 华中师范大学国家数字化学习工程技术研究中心, 武汉 430079

2. 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

E-mail: jszhang@outlook.com

收稿日期: 2018-11-21; 接受日期: 2019-01-09; 网络出版日期: 2019-02-18

国家自然科学基金(批准号: 61772440)和航空科学基金(批准号: 20165168007)资助项目

摘要 数字书法将传统书法的创作工具、视觉艺术效果、书写技巧和创作等用数字化的方式再现. 本文首先在回顾数字书法研究历史和研究特点的基础上, 给出数字书法的主要研究内容和研究方向, 包括: 书法工具的数字化建模、书法图像的分析与处理、书法字形的合成与美化等; 然后阐述数字书法每一类问题的具体研究目标、研究现状和研究趋势; 最后, 探讨数字书法进一步发展需要予以关注的重要问题和研究方向.

关键词 数字书法, 虚拟毛笔, 碑帖图像, 字形合成, 审美评价, 计算美学, 人工智能

1 引言

中国书法是以汉字为载体, 以文房四宝“笔、墨、纸、砚”作为主要创作工具, 以笔法、章法为主要表现技巧, 以文字涵义和书法审美取向为表现内容的一种融时间和空间于一体的线条造型艺术^[1,2]. 随着计算机和信息技术的发展, 数字书法(digital calligraphy)应运而生. 数字书法将传统书法的创作工具、视觉艺术效果、书写技巧和书法创作等用数字化的方式再现. 数字书法经过三十余年的发展, 已成为一个十分有特色的交叉研究领域. 数字书法的研究, 对于丰富计算美学和计算机辅助艺术设计的基础理论, 有着重要的科学和理论价值; 同时, 数字书法的研究, 对于文化遗产的数字保护和传承、书法欣赏和教育、计算机辅助字库建设, 以及广告传媒等领域, 也有着实际应用价值.

书为心画, 书法是最能代表中国人审美心理特征的艺术形式之一. 其除具有规范文字书写、陶冶性情的实用功能外, 也蕴含十分丰富和深刻的美学和哲学思想. 林语堂曾指出“在书法上, 也许只有在书法上, 我们才能够看到中国人艺术心灵的极致”^[2]. 不同于主要用于表音和表意的西方字母文字, 汉字“象形”的特点是其发展成为世界独特艺术的一个重要因素. 除了象形, 汉字的书写工具“毛笔”具有软的特性, 利于书写者通过丰富变化的笔画线条传达书写者的情感, 而西方的书写工具相比毛笔而言, 其表现形式不如毛笔丰富. 此外, 汉字字形比字母文字的形状也更复杂, 加之中西方文化和审美观

引用格式: 张俊松. 数字书法研究综述. 中国科学: 信息科学, 2019, 49: 143-158, doi: 10.1360/N112018-00202

Zhang J S. A survey of digital calligraphy (in Chinese). Sci Sin Inform, 2019, 49: 143-158, doi: 10.1360/N112018-00202

点的差异,如中国传统文化的“阴阳和谐、对立统一”等核心思想都能在书法中得到完美展现,具体是通过汉字的笔画之间,以及一幅书法作品中字与字之间,行列之间的呼应、揖让、计白当黑等创作技法(笔法和章法)来实现。另外,中国书法艺术与西方传统绘画、雕塑等艺术形式相比具有明显的抽象艺术特点,正如书法家沈尹默在其所著的《历代名家学书经验谈辑要释义》中说到“世人公认中国书法是最高艺术,就是因为它能显出惊人奇迹,无色而具画图的灿烂,无声而有音乐的和谐,引人欣赏,心畅神怡”^[3]。因此,中华文化的源远流长、博大精深投射于汉字之中,就形成世界上独特的艺术形式“中国书法”。从甲骨文、金文演变成大篆、小篆、隶书,至定型于东汉、魏、晋时期的草书、楷书和行书诸体,书法一直传递着其特有的艺术魅力。如果仔细分析中国书法的演变和发展历程,可以发现:无论是书法的创作工具和书写技巧,还是书法的呈现内容和表现形式,甚至是审美标准和取向都伴随社会的发展和进步在不断地演进。吴冠中先生^[4]曾指出:“保留传统,只有发展才能保留,不发展就可能保留”。因此,在数字时代,书法的创作工具和载体只有与时俱进,才能符合书法发展的历史规律。

数字书法的研究历史,可以追溯到20世纪80年代。1986年,吉林大学王易工等^[5]提出一个数字书法系统。同年,美国麻省理工学院媒体实验室的Strassmann^[6]也在国际图形学顶级会议SIGGRAPH上提出一个能模拟生成毛笔笔触效果的模型。随后,两岸三地、日本、韩国和欧美等部分高校的研究者开始数字书法的研究探索。2012年,在甲骨文的发现地河南安阳召开了第一届全国文字与计算学术研讨会(National Symposium on Character and Computing, NSCC),国内从事数字书法和汉字字形计算的部分研究者与会交流探讨数字书法领域的最新研究进展和发展趋势,该会现在每年一届定期召开,至今已在安阳、北京、南京、杭州、西安等地举办八届,成为了国内数字书法和字形计算领域的重要学术会议。除了以上会议,国际上计算机图形学、人工智能和计算机视觉的著名会议,如SIGGRAPH, Eurographics, Pacific Graphics, NPAR, AAAI, IJCAI, CVPR等会议上,也能时常见到国内外学者在数字书法方面的最新研究成果。

纵观国内外已有的数字书法研究,根据其研究内容和特点,可以将其分为如下几项主要研究内容:(1)书法工具的数字化建模;(2)书法图像的分析与处理;(3)书法字形的表征和合成。数字书法早期的大部分工作集中在书法工具的数字化建模,如毛笔仿真建模,以及墨-纸交互效果的仿真等^[5]。这些模型依据其建模原理,可以大致归为两类:基于经验的模型和物理驱动力的模型。基于经验的模型,忽略毛笔实际书写过程中的笔、纸和墨及其交互的物理机制,着重模拟书法创作过程中笔墨在纸上的视觉效果;物理驱动力的模型,则着重仿真毛笔书写和墨-纸交互的物理过程和状态。集中在笔、墨、纸的建模和视觉效果仿真方面的上述工作,是数字书法的基础研究工作。涉及数字书法和字形计算的另外一部分工作,是从汉字图像入手,如书法碑帖图像处理 and 识别,包括书法碑帖图像的去噪、矢量化、识别和检索等。近年来,随着社会上对个性化字库应用需求的增加,个性化字形的表征和合成正成为一个重要研究方向。值得指出的是,以上提及的书法工具的数字化建模、书法图像的分析与处理,以及书法字形的表征和合成,都涉及到一个共同的问题,即书法的审美计算与评价问题。除上述研究方向外,借助外部设备,如机械臂来模拟人的书写行为和书法创作研究^[7],也是一个近年来兴起的研究方向,限于篇幅,本文没有对这一研究方向进行深入探讨。

随着以上数字书法的深入研究,数字书法也面临一些挑战性和需要深入研究的问题,如复杂书法视觉效果的仿真问题,特别是如何在移动设备等终端上表现复杂笔画纹理的虚拟毛笔模型;如何将笔墨正向建模和书法图像逆向分析相结合;如何依据书法的笔法和章法理论来辅助书法作品分析和计算机创作;以及如何将前沿的深度学习等人工智能技术与数字书法相融合。此外,构建计算模型来评判数字书法的美学效果,即审美评价问题,依然是一个难点,还没有得到很好地解决。近几年来,有关审美认知的研究取得了很多有效的成果,并诞生了一个新的研究方向——神经美学,产生了一些针对审美

认知评价的实验设计和客观度量方法^[8], 这些方法为构建符合审美认知机理的数字书法作品提供了理论支持.

以上概述了数字书法的研究背景、研究历史、研究对象, 以及目前数字书法发展还存在的难点和挑战性问题, 本文后续将系统回顾总结数字书法已有的研究成果及发展趋势(第 2 节)、分析阐述数字书法进一步研究需要关注的问题(第 3 节), 最后总结全文(第 4 节).

2 数字书法的研究进展

2.1 书法工具的数字化建模

早期数字书法研究的大部分工作集中在毛笔仿真建模, 以及墨-纸交互效果的仿真方面. 由于毛笔丰富的表现力, 使得中国书法富于变化、一字千面, 能创作出不同风格的书法作品. 所以毛笔的发明和使用对于中国书法艺术风格的形成和发展起到了至关重要的作用, 是中国书法的物质基础和载体. 书法家运笔过程中施加于毛笔的速度、方向和力量的变化, 加之墨的浓淡, 以及墨在宣纸上的扩散给了书法家充分的表现空间. 1986 年, 吉林大学的 Wang 等^[5] 提出一个计算机汉字书法系统 CCC. 同年, 美国麻省理工学院的 Strassmann^[6] 提出第一个虚拟毛笔模型. 随后, 国内外陆续出现了数十种虚拟毛笔和墨-纸交互仿真模型, 这些模型依据其建模原理, 可以大致归为两类: 经验模型和物理模型.

2.1.1 经验模型

基于经验的模型, 忽略实际书写过程中的笔、纸和墨的物理机制, 着重模拟书法创作过程中笔墨在纸上的视觉效果, 如模拟毛笔在实际书写过程中, 笔头所含墨量及书法纹理的视觉效果随书写者的运笔速度, 以及“提、按、行、留、驻”等笔法动作而带来的变化. 这方面的研究工作, 如早期 Strassmann^[6] 建立的二维毛笔模型, 能绘制简单的书法纹理效果. 还有研究者分别采用散点集合方法^[9]、CAD 实体造型方法^[10]、参数雨滴模型^[11]、分形的方法^[12]、遗传算法^[13]等, 从不同的角度模拟毛笔书写呈现的笔墨效果. 也有研究者^[14] 为模拟草书纹理的复杂视觉效果, 构建了草书纹理生成模型(效果如图 1 所示). 下面对基于经验的模型的一些代表性工作予以介绍和分析.

Strassmann^[6] 提出第一个二维虚拟毛笔模型, 该模型能模拟一些典型的书法笔画效果. 该模型由笔画、笔头、蘸墨和纸张 4 个基本部分组成. 笔画需要用户指定落笔的位置和压力大小, 再通过插值关键点生成笔画形状, 其中压力值决定笔画宽度; 笔头定义为一个笔毛阵列, 每根笔毫都赋予墨量信息; 蘸墨和纸模型用于模拟笔头的墨浸润到纸上形成笔触效果. 作为早期的虚拟毛笔模型, 该方法生成的书法纹理与真实的书法纹理相比, 视觉效果上与真实笔画效果相比还不太自然. 因此, Guo 和 Kunii^[15] 在 Strassmann 的研究基础上增加了墨扩散效果的模拟, 考虑了纸张纤维对墨扩散效果的影响. 具体地, 通过观察宣纸的微观结构, 这种微观结构由一些不规则分布的纤维组成的纤维网模拟, 从而构建一个交互式水墨画绘制系统, 模拟水墨在纸上的动态扩散过程. 相比 Strassmann 等提出的模型, 该模型计算复杂度高. Yu 等^[9] 在 1996 年提出一个笔刷模型, 该笔刷模型用散点集合模拟笔刷的笔触, 将笔刷运动轨迹设置为导引骨架属性函数, 通过控制散点的分布形状、密度和颜色, 来形成不同的笔触. Wong 和 Ip^[16] 考虑到毛笔与宣纸的接触面形状似椭圆, 利用椭圆模拟笔触形状, 并设计一个墨在纸上的沉积模型来实时生成笔触效果. 该模型通过设置毛笔模型的属性参数如笔管的半径、笔头的长度和笔毫的数量来构造毛笔的三维几何模型, 并定义了毛笔的运动模型, 通过沿着笔画轨迹变换笔触, 模拟毛笔改变方位、旋转笔杆以及顿笔产生的不同笔触效果. 考虑椭圆是真实笔触形状的简化,

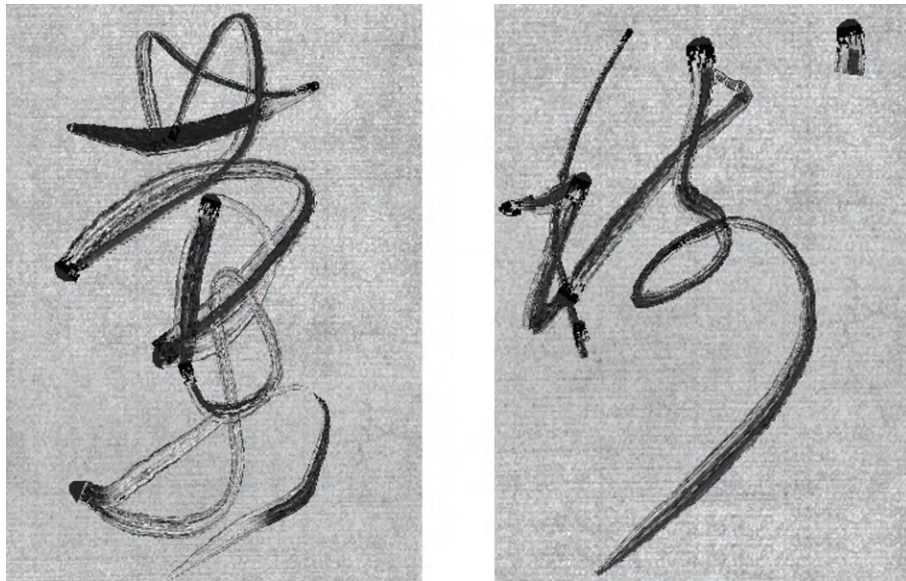


图 1 书法纹理模拟仿真^[14]

Figure 1 Calligraphic texture modeling^[14]

Mi 等^[11,17] 摒弃了毛笔的真实物理模型,用参数化的“雨滴”模型来模拟纸面和毛笔之间的接触区域,以实际书写中的运笔经验驱动模型,简化了参数设置和运算.

然而以上模型大多需要手工输入控制点参数,通过样条曲线设置笔画路径,繁琐的参数设置对于用户来说非常不方便. Xu 等^[10] 提出了一种基于实体造型的虚拟毛笔模型,其基本思想是以一簇行为相近的笔毫作为书写单元,用计算机辅助设计理论中的广义扫成法生成“书写元”,并引入自动机器学习系统,根据惯性理论动态地调整相关参数,再结合输入的“墨量”在虚拟的纸上产生笔画效果,虚拟毛笔的整体行为即为所有书写单元行为的集合,该模型能根据优化算法自动地调整毛笔的参数. Girshick^[18] 通过对毛笔运动的实际观察发现,笔毫的个体运动与毛笔的整体运动紧密相关,于是在此基础上提出了一个参数化毛笔模型. 该模型由一个表示毛笔笔头整体形状的控制体和笔毫构成. 笔毫被定义为由 4 个控制点确定的 Bézier 曲线. 控制体模型则类似于 Xu 等^[10] 提出的实体模型,由一条控制曲线 CA 定义中心轴,两个控制圆 CC1 和 CC2 分别对应笔头的前两个控制点,一个控制椭圆 CE 和一条控制线 CL 分别被定义为笔头的后两个控制点. CA 为一条 Bézier 曲线,由 4 个控制点确定. 前两个点位置相对固定,位于从笔头底部引出的一条线上;另两个点则靠的很近,位于平行于纸平面的线上,当笔毫有变形发生,它们间的距离大小可以根据需要自由缩放,以维持弧长不变. Xu 等和 Girshick 提出的虚拟毛笔模型,不再需要用户指定关键点来指定毛笔的运动轨迹,可以通过移动鼠标在虚拟的纸张上体验数字书画的创作. 除了以上针对毛笔仿真建模,以及墨-纸交互效果的仿真,近来,为了模拟西方油画等的笔触效果, Lu 等^[19] 提出一种基于真实笔触纹理图像和数据驱动的笔画纹理合成方法,该模型能合成色彩和纹理丰富的笔触效果.

基于经验的模型,多数研究者从如何模拟毛笔在宣纸上的笔触形状以及书法纹理的视觉效果角度考虑,这些系统一般需要事先设定多个经验参数. 在实际书法创作过程中,笔、墨与纸的交互动态过程是中国书法展现艺术魅力的重要方面,目前基于经验的虚拟毛笔模型,还很难呈现这一动态过程. 而能真实模拟书法创作过程中笔、墨和纸的动态交互过程,尤其那种墨在纸上晕染和扩散的动态视觉效

果,正是下面要介绍的基于物理的建模方法的一个重要目标.

2.1.2 物理模型

基于物理的模型,着重仿真毛笔书写和墨-纸交互的物理过程和状态^[20~23],如 Lee^[20]借助弹性力学理论,表现书写过程中笔毫的形变.还有 Chu 等^[24]通过在真实毛笔上安装物理的信号接收装置,设计了虚拟毛笔模型,他们还进一步依据流体力学的方法仿真了墨汁在宣纸上的浸润效果^[25].在上述研究工作的基础上,有研究者基于笔纸墨物理属性^[26]、力反馈技术^[27]仿真毛笔的笔触效果.下面对基于物理的模型的一些代表性工作介绍和分析. Lee^[20]在 Strassmann 的基础上,基于力学弹性理论计算笔毫的形变,通过改变笔毫的位置和方向来模拟整个笔头分岔的效果,构造了一个三维毛笔模型.在该模型中, Lee 还提出了基于网状结构的宣纸模型和墨扩散算法,模拟了墨在纸上的扩散效果.类似于 Lee 以力学弹性理论来模拟毛笔的还有 Saito 等^[21]和 Baxtor 等^[22]. Saito 等以物理力学来构造笔头的形状,以笔头的势能与动能配合纸的摩擦力计算笔头的骨架,再用 Bézier 曲线对笔头的位置和形状进行模拟. Baxtor 以弹性理论来模拟笔头的骨架,通过曲面变形表现笔头在书写过程中的形变.另外 Yeh 等^[23]认为毛笔的笔毫在受力后更像弯曲的弹簧,所以在 Baxtor 的算法基础上采用弯曲弹簧模拟笔头骨架. Chu 等^[24,25]的虚拟毛笔模型引入了新的输入设备,使用者可以握着真实的毛笔进行书画创作.他们在一只真实的毛笔上装上一个超声信号器和一个回转仪,显示器上安装了3个超声接收装置,接受来自超声信号器的信息,计算出毛笔在三维空间的位置.回转仪主要用于捕捉毛笔的倾斜信息.

基于物理的模型,多数研究者从真实毛笔和墨扩散的形状建模,以及物理过程仿真的角度考虑,给出的系统较为复杂,计算量很大,难以在移动终端等计算和存储资源有限的平台上实现.另外,在实际书法创作过程中,笔、墨与纸的交互是个极其复杂的物理过程,特别是墨水在纸上的扩散、变干的过程,基于物理的虚拟毛笔模型还很难真实地模拟,目前的研究对这一物理过程都做了很大程度的简化.

综上所述,对于书法创作工具及视觉效果的模拟和绘制,目前研究工作主要包括虚拟毛笔建模和墨扩散效果绘制.对于虚拟毛笔的建模研究,研究者既有从毛笔的物理结构以及笔、纸、墨交互过程出发提出的基于物理的虚拟毛笔模型,也有根据毛笔与纸张的接触面的形状建模提出的基于经验的虚拟毛笔模型;对于墨扩散效果绘制,研究者主要模拟宣纸的物理结构和墨在宣纸上的扩散效果.如何将基于物理和基于经验的建模思想相结合,是未来书法工具数字化建模发展的一个可能途径;另外,如何在移动终端等计算和存储资源有限的平台上实现书法创作过程的实时、动态和真实地模拟,是书法工具数字化建模的重要研究问题.

2.2 书法图像的分析与处理

涉及数字书法的另外一部分工作,是从书法图像入手^[28],如书法碑帖图像去噪^[29~32]、书法字库的检索^[33~36]、从书法碑帖图像生成轮廓字形描述^[37]、书法纹理图像合成^[14,38]、书法牌匾生成^[39,40]、书法图像笔画提取^[41]、从书法图像生成笔画书写动画^[42](如图2所示)等.

将大量历史文档资料转换成数字资料是文档图像处理与分析以及数字图书馆的重要工作.由于古代文档资料已经保存了很长的时间,加之受当时书写工具和印刷水平的限制,导致这些文档资料的视觉效果较差,需要用一些先进的图像处理和模式识别等技术进行加工处理,以方便人们对这些文档资料进行应用和研究.下面主要介绍一下书法文档图像处理与分析方面的一些研究工作.

古代碑帖图像的去噪增强等图像处理技术是数字书法资源建设的基础.针对古书法文档图像的二

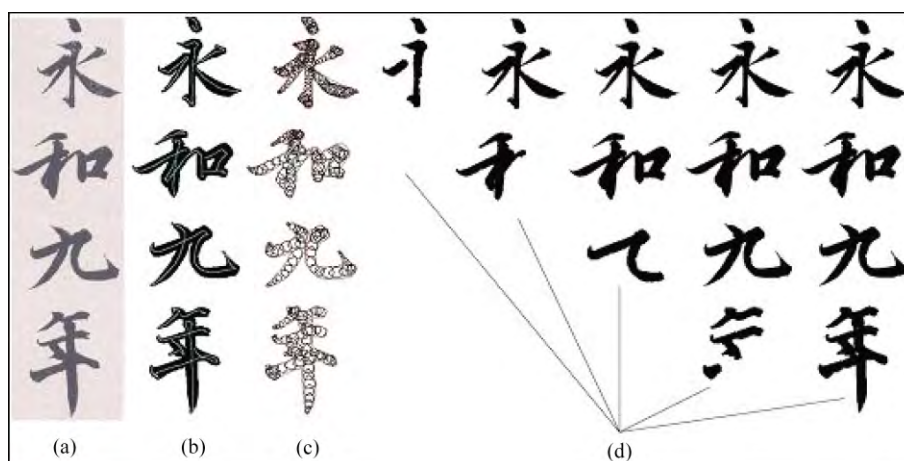


图 2 (网络版彩图) 从碑帖图像“兰亭序”生成书写动画^[42]。(a) 原图扫描; (b) 笔画轨迹; (c) 笔触拟合; (d) 动画模拟

Figure 2 (Color online) Writing animation generated from “Lanting Xu”^[42]. (a) The input image; (b) pen trajectory; (c) brush footprint; (d) writing animation generating

值化问题, Wang 等^[29] 考虑到书法文档图像的噪声分布及图像亮度分布不均匀的特点, 他们先采用各向异性扩散算法对书法文档图像作平滑处理, 再利用二值化算法对碑帖文档图像进行二值化处理来去掉部分随机噪声。由于平滑碑帖图像可能导致离散的碑帖噪声形成较大的块状噪声, 这些块状噪声和笔画在尺寸上十分近似, 会导致接下来的碑帖去噪处理更为困难。

另外, 有研究者对其他国家的古文档图像进行处理和分析, 由于书法文档图像和其具有相似性, 因此, 这方面的工作也可为书法文档图像分析与处理以借鉴。如 Pan 等^[43] 为了辅助历史学家易于辨认古罗马时期的拉丁文手稿, 提出一种图像增强技术用于处理这些文档图像。这些文档资料由 3 种书写工具写成, 包括墨水、木制管心针以及石墨。他们采用的技术包括用同态滤波器校正文档图像表面不均匀的光照效果; 用高通滤波器移除因文档表面不平整导致的阴影效果; 并且提出一种新的方法用于去除文档图像的木纹效果; 最后他们还提出一种基于相位的特征检测算法用于检测文档图像里的笔画, 用笔画进行字符识别。此外, Molton 等^[44] 用模式识别技术处理一种用钢针雕刻在木板上的古罗马时期英国遗留下来的文档图像。木板天然纹理及表面的不平整结构导致雕刻的文字不清晰, 他们将木板放在一定光照条件下, 根据木板上面的阴影区域来推测文字所在的位置, 去掉木纹对文字识别的影响, 还进一步给出如何对断裂的笔画进行插值修复以及恢复木板表面三维结构的方法。

碑帖图像的矢量化有助于将书法文档从图像空间变换到图形空间, 这方面的技术, 包括从碑帖图像生成矢量字形等。Ma 等^[45] 提出一个如何使用 Bézier 曲线拟合甲骨文轮廓字形的方法, 开发了一个甲骨文字形处理系统。他们依据 TrueType 文件格式记录甲骨文的轮廓数据, 可以把甲骨文图像转化为曲线轮廓描述的甲骨文字形, 方便在通用的字处理软件中使用甲骨文。此外, Yang 等^[46] 给出了一个对碑帖图像进行矢量化的方法。该方法通过调整 Bézier 曲线控制点得到拟合误差尽可能小的碑帖汉字的轮廓字形。由于他们用一个曲率门限来确定汉字轮廓上的特征点, 因此他们的方法仅适用于汉字轮廓比较光滑的情况, 对于处理碑帖汉字轮廓有噪声的情况难以获得满意的结果。

如何从古代书法碑帖图像中的汉字, 通过计算反推其创作和书写过程是一个很难的问题, Wong 等^[47] 作出了尝试, 他们提出一种自动从书法图像估计虚拟毛笔模型参数的方法。这些参数包括虚拟毛笔的笔毫数量以及毛笔书写过程中墨量的变化等。该方法可以通过对书法作品图像进行自动分析,

得到虚拟毛笔参数合成高质量以及不同风格的书法作品,用于印刷出版.该方法需要采用复杂的交互方法从汉字图像中提取出基本笔画,然后再从基本笔画估计虚拟毛笔的参数,因此,在实际应用中有很大的局限性.并且该方法局限于处理楷书、隶书、篆书等较为规则的书法风格作品,对于笔画纹理有较大变化的行书、草书作品则非常困难.Cheng等^[48]提出一种从书法作品图像估计汉字骨架的方法.借助汉字的轮廓信息,他们通过插值方法计算得到汉字骨架信息,并通过确定采样点密度来控制抽取骨架的准确性.虽然该方法可以得到反映书法家创作书法作品时的运笔轨迹信息,但书法家在创作时采用的逆锋起笔,收笔时的顿笔及回锋,以及为保持“形断意连”而采用的空中行笔等复杂的笔法技巧,仍然难以从提取出的骨架反映出来.针对书法字检索,Zhuang等^[33]提出了一种基于形状相似性的书法汉字检索方法.他们通过计算汉字的轮廓特征的相似性,能按相似程度检索得到同一个字的不同风格字体.该方法可以用于数字图书馆的书法字检索,还可以方便书法爱好者学习不同风格的书法作品.基于机器臂的书法生成是数字书法领域近来的一个重要研究方向,Yao等^[49]试图从书法作品图像的汉字里面提取运笔轨迹,然后将运笔轨迹数据传递给书法机器手臂,让书法机器手臂根据运笔轨迹模仿创作书法作品.不过对于较自由风格的字体,比如行书和草书,书法机器手臂仍然难以生成满意的书法作品.

书法图像的分析与处理在数字书法领域有很多实际应用,如书法集字、书法牌匾生成等.不过要提出一种理想的书法图像分析和处理方法仍然有很多困难,包括:(1)书法作品一般有复杂的背景(比如帖)和复杂的噪声(碑拓),因此,要求对书法字进行去噪,但目前去噪算法多需要人工交互的方式,去噪过程十分繁琐;(2)在书法字检索方面,随着时代的发展,汉字的字体一直在演变,因此,即使同一个汉字,它的大篆形状和草书形状已经有很大差别,仅从形状上对书法字进行检索仍然存在很大困难.

2.3 书法字形的合成与美化

数字书法研究,除了以上书法工具的数字化建模和书法图像处理外,近年来,随着个性化字体和字库的实际应用需求增加,大量的研究工作开始关注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^[50~53]、个人风格字体生成^[54,55]等研究内容;在字形美化方面,则包括在线手写体美化^[56~60]、离线手写体美化^[61,62],以及笔画线条美化^[63]等研究内容.

2.3.1 字形合成

就单个汉字而言,它的风格特征主要体现在间架结构和笔画形状两方面.因此,在字形合成方面,很多工作都是在分析汉字的笔画和间架结构的基础上,再合成相似风格的字形.

为了生成和样本风格相似的书法作品,Xu等^[50]构建了一个笔画和表征笔画之间拓扑稳定性的计算模型.他们首先抽取待合成字形对应的标准楷体拓扑结构,然后借助拓扑稳定性计算模型,从个人手写样本库中匹配最相似的拓扑结构,并构建笔画稳定性计算模型,再从个人手写样本库中寻找最相似的笔画集合来匹配对应的拓扑结构,从而得到最终合成的字形.在中国书法各种风格的字体中,草书的笔画纹理和形状最富于变化.Yu等^[38]提出一个合成草书风格作品的方法.他们首先从草书风格的作品中采集一些典型的笔画纹理,这些笔画纹理能代表书法家在笔墨不同干枯程度及不同运笔速度条件下产生的笔画纹理.其次基于Markov插值的纹理合成方法,并调整少量的参数,生成不同墨浓度条件下的草书纹理效果.最后,借助草书风格汉字的轮廓和导引骨架信息,通过纹理映射生成草书风格作品.但该方法没有就书法纹理建模做进一步的探讨.Shi等^[61]对汉字部件,如笔画和偏旁部首等进行分析建模,并利用马尔视觉理论和书法先验知识指导字形合成.该方法首先考虑书法家的书写

风格,依据先验知识对汉字笔画、偏旁部首以及部件的拓扑关系进行建模,构建了一个用于字形表示的5层框架,整个字形合成过程被形式化为一个动态 Bayes 模型,其状态方程控制汉字笔画、部首和拓扑关系的更新.考虑书法创作具有形象思维的特点,Xu 和 Dong 等^[64~66]提出基于统计模型的书法创作模型,并将形象思维的模拟引入到书法的计算机生成.Orbay 等^[67]提出了一种个性化字体合成方法.他们通过对汉字的部件位置和大小进行人工标注,然后从用户事先输入的汉字中提取所需的部件来合成其他样本中没有的汉字字形.

近来,也有研究者将深度学习 (deep learning) 等人工智能新技术引入字形的合成,如 Chang 等^[68]使用稠密连接卷积神经网络 (densely connected convolutional networks, DenseNet) 和环形生成式对抗网络 (cycle generative adversarial networks, CycleGAN) 生成个性化书写风格的字形,其主要思想是将个性化手写字形的生成问题,看作是从现有的印刷字体到个性化手写风格的字形映射问题.Lyu 等^[69]将书法字合成问题看作图像到图像的风格迁移问题,该方法基于深度神经网络模型从标准字体图像生成书法字图像,但对于变形较大的行草书还难以取得理想的效果.Sun 等^[70]尝试仅仅通过观察一个或者少数样本生成新字体的工作,提出风格感知变分自编码器 (style-aware variational auto-encoder, SA-VAE) 框架,通过将字形的隐藏特征分解成内容相关和风格相关的成分来捕捉汉字的不同特征.其中将结构信息作为先验知识指导字形的生成,该方法具备一定的单样本/少样本 (one-shot/low-shot) 泛化能力.Xu 等^[71]结合多卷积神经网络 (multiple convolutional neural networks, MCNN) 和长短期记忆网络 (long short-term memory, LSTM) 来识别笔画的时间和空间特征,再与专家模板进行相似度计算给出书法字形的评分.

书法字形的自动评价仍然是数字书法领域的一个难点问题,也是计算机辅助书法教学领域的一个亟待解决的问题.目前书写评价大多基于模板相似度计算,基于书法美学理论的字形评价,即将中国传统书法理论中那些经验性的、微妙的评价理论引入数字书法研究,仍然还有很多需要探究的地方.

2.3.2 字形美化

字形美化通常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,以达到美化字形的目的.

在字形美化方面,大多数工作是利用标准模板笔画库来调整待美化的笔画.Jin 等^[72]基于实例学习的方法生成美化的手写汉字.该工作以鼠标或者触摸板输入手写笔画轨迹,通过识别输入的笔画轨迹,从标准笔画库中检索出与其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,从而达到字形美化的目的.针对英文手写体美化,Zitnick^[57]定义了一种名为 Token 的笔画描述符,并以此进行手写体美化.该工作实时记录用户输入的笔画数据,同时以一定的时间间隔对已输入的笔画重采样,得到一系列的笔画样本.他们将其定义为“Tokens”,并对这个笔画样本集进行聚类.然后采用由粗到精的方式匹配用户最近一段时间内的手写笔画,通过加权平均的方法对这些笔画进行美化.Hou 等^[59]提出一种考虑书写速度和笔画宽度的字形美化方法.该方法首先根据汉字结构将笔画划分为中间部分和笔画连接部分,对汉字笔画连接部分采用 Bezier 曲线进行拟合,同时根据笔画书写速度调整笔画宽度,达到美化字形的目的.Shi 等^[61]对输入的手写体图像进行归一化,并用印刷字体特征调整手写体的视觉效果,然后基于 Bayes 模型对手写字形进行平移、旋转、缩放等操作来美化字形.Dai 等^[73]结合书法理论中“笔断意连”思想,根据几种常见笔画连接模式,确定需要笔断意连的笔画,实现笔画之间的呼应关系的优化,从而得到符合书法审美要求的字形(如图3所示).

随着社会上对个性化字库需求的增加,字形的合成与美化正在成为当前数字书法领域最有活力的

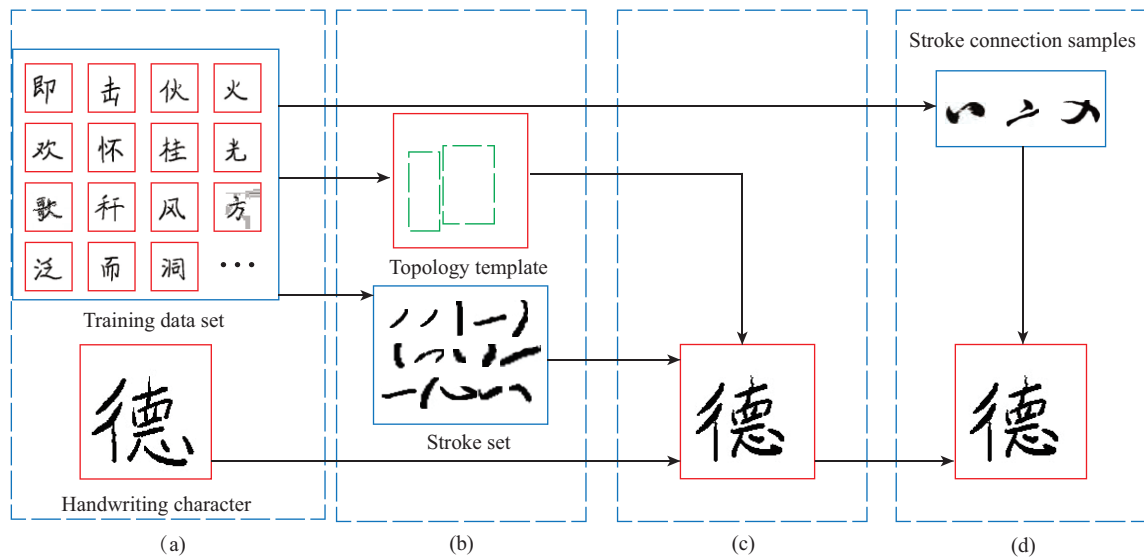


图 3 (网络版彩图) 一个手写字形美化的系统框架^[73]. (a) 输入; (b) 书写稳定性计算; (c) 笔画和拓扑关系美化; (d) 笔断意连

Figure 3 (Color online) A framework for handwriting beautification^[73]. (a) Input; (b) stability calculation of handwriting; (c) the beautify of the stroke and topology; (d) stroke connection

研究方向之一。

3 数字书法研究进一步发展需要关注的若干问题

数字书法研究经过国内外研究者 30 余年的研究探索, 在书法工具的数字化建模、书法图像的分析与处理、书法字形的分析与合成等方面已经开展了大量的研究工作, 基本解决了书法的数字化表征等基本问题, 但在面向移动终端的书法工具建模、面向复杂书法图像的分析与处理、传统书法理论与数字技术的深度融合、结合神经美学的书法审美认知与计算、数字书法与人工智能前沿技术相结合, 以及数字书法公共数据集构建方面, 还有很多值得深入探究的问题, 下面就这些问题进行分析与讨论。

3.1 面向移动终端的书法工具数字化建模

目前书法工具的数字化建模方面, 主要集中在书法创作工具——笔、墨、纸的仿真建模, 由于毛笔、墨与纸的交互包含极其复杂的物理过程, 现在的虚拟毛笔模型仍然难以表现书法的复杂纹理^[38]。

另外, 随着移动终端的普及和发展, 迫切需要能在手机、平板电脑等计算资源有限的平台上构建满足实际应用需求的虚拟毛笔模型^[74], 这样就面临既要满足实时性, 又要视觉效果逼真的挑战。因此, 如何构建符合移动终端计算和显示资源特点的虚拟毛笔模型就成为数字书法亟待解决的新问题。

不过, 近年发展起来的移动云计算技术, 可以突破移动终端的资源限制, 通过云端的计算、存储等资源优势, 满足移动终端用户的需求, 特别是移动云计算所具有的动态部署、多用户共享机制, 以及资源的可扩展性, 为数字书法逼真视觉效果的模拟和复杂计算提供了可能的途径。

3.2 面向复杂书法文档图像的分析与处理

书法图像的分析与处理技术仍然面临如下一些挑战和问题:

首先, 由于书法字形结构和笔画的复杂性, 寻求自动的汉字图像处理、识别方法是十分困难的, 这也是为什么直至今日, 即使离线手写体汉字识别仍然没有取得较大进展的原因^[75]. 因此, 书法图像分析处理方面的研究, 如何将自动的书法图像处理与交互技术相结合, 以满足实际应用需要, 是一个值得探讨的问题.

其次, 目前在书法图像处理分析方面, 集中在图像检索、字轮廓的形状描述等方面. 目前将笔墨正向建模和书法图像逆向分析相结合的研究工作还不多见^[35].

最后, 对于书写相对自由的书体, 比如行、草书的创作, 由于书法家运用枯笔 (毛笔含墨量很少的状态) 配合随意、快速的动笔运作, 使得笔画纹理出现“飞白” (笔画纹理中出现空白、笔画不连续) 的效果, 从而从书法汉字图像正确提取轮廓和骨架十分困难, 因此, 如何从行、草书汉字图像中正确提取其轮廓和骨架信息这一类书法图像处理技术, 仍然是一个难点问题.

3.3 面向传统书法理论深度融合的书法字形分析与合成

书法作为一门线条造型艺术, 其艺术性其实更多体现在书法所强调的笔法、章法等方面^[1], 基于书法笔法和章法理论的计算机辅助书法创作分析方面, 还很少见到相关的文献报道.

传统书法的笔法和章法理论, 探讨运笔的方式, 研究字与字、行与行之间的空间位置、距离等安排策略. 尽管书论里有很多关于笔法和章法的理论描述, 但这些描述是主观和微妙的, 因此, 将我国传统书法中丰富的笔法和章法理论引入书法字形的分析与合成, 实现传统书法理论与数字技术深度融合, 是数字书法一个非常值得探索的研究方向.

3.4 融合神经美学的书法审美评价与计算

数字书法最终目标, 是要让计算机生成符合书法审美要求的书法作品, 因此, 书法字形的审美评价与计算是一个不能回避的关键问题.

然而, 构建计算模型来评判计算机生成书法的效果, 即审美评价问题, 依然是一个还没有得到很好解决的难点问题^[76~78]. 数字书法本质上是让计算机生成有艺术美感和创意的作品, 属于复杂性创造活动, 因此, 审美认知评价对于数字书法是必不可少的步骤, 过去在数字书法中较少考虑审美认知机制的引入问题, 特别是采用客观的、结合心理物理实验的评价手段. 近几年来, 有关审美认知的研究取得了很多有效的成果, 并诞生了一个新的研究方向——神经美学^[8, 79, 80], 其针对审美认知评价的实验设计和客观度量方法, 为我们构建符合审美认知机理的数字书法建模方法提供了理论支持.

因此, 借鉴神经美学领域的最新研究成果, 并与传统书法美学理论结合, 让计算机生成符合书法美学的书法作品, 也是一个值得深入研究的方向.

3.5 数字书法与深度学习等人工智能前沿技术的深度融合

最近几年, 深度学习等人工智能前沿技术得到快速发展, 深度学习技术在绘画作品的计算机合成方面取得了很好的效果, 如 Liao 等^[81] 提出的图像风格迁移方法, 通过卷积神经网络找到图像之间语义的对应关系, 从而实现图像光照、颜色、纹理和绘画风格的迁移和艺术图像合成. 相比绘画而言, 书法与深度学习方法结合具有更大的挑战性, 原因在于: 基于深度学习合成的绘画作品, 如深度学习合成的梵高画, 其局部特征即使合成效果不理想, 观看者不容易觉察出来; 而对于书法字形的合成, 如果某个笔画的形状、空间位置、笔画间的空间关系等稍有差错, 则极容易被观看者觉察出来.



图 4 (网络版彩图) 书法碑帖图像
Figure 4 (Color online) Calligraphic image

基于深度学习的数字书法研究当前存在的主要问题是: (1) 还缺乏公用的书法数据库, 用于对比和测试数字书法系统和算法的效果; (2) 还缺乏深入了解深度神经网络如何表征书法风格的原理. 众所周知, 深度学习具有“黑盒”的特点, 因此, 数字书法研究者需要去深入分析和探讨神经网络如何刻画书法字形风格特征, 如书法笔法和章法方面的内容, 在此基础上, 才能结合深度学习方法生成符合审美要求的书法作品.

3.6 数字书法研究需要标准数据集

事实上, 我国有丰富的碑帖等拓片资源 (仅国家图书馆“碑帖菁华”就有 23 万片之多, 请参见国家图书馆“碑帖菁华”网站¹⁾), 这些书法碑帖是数字书法理想的造型素材 (如图 4 所示). 如果能为挖掘、整理、开发好这笔文化遗产提供好的理论模型和方法, 那么对于书法艺术的继承和发展, 以及今天亟待发展的计算机辅助汉字造型技术是有着极大的借鉴和参考价值的.

但遗憾的是, 到目前为止数字书法领域还没有形成一些公共的、权威的基准数据库. 即使各个研究者或团队已有自己的书法资源库, 其规模往往也不大, 而且较少共享. 因此, 如果数字书法界能对我国丰富的碑帖图像和书法资源进行搜集整理, 构建高质量的数字书法公共资源和数据, 对推动数字书法研究的深入应该是大有裨益的.

1) 中国国家数字图书馆. 碑帖菁华. 2018. <http://mylib.nlc.cn/web/guest/beitiejinghua>

4 结论

本文综述了数字书法研究,回顾了数字书法的研究历史,介绍了数字书法国内外的主要研究方向和内容,并探讨了数字书法进一步发展需要予以关注的研究方向和问题.数字书法是传统与现代、科学与艺术、技术与人文相融合的跨学科研究领域.随着我国在信息时代对优秀传统文化继承与发展的重视,可以预见:数字书法的研究一定会成为越来越富有特色和生机的研究方向,期待国内外有更多同行和研究者能关注这一研究领域,共同推动数字书法研究的发展.

参考文献

- 1 Qiu Z Z. Calligraphic Skills. Shanghai: Shanghai Publishing House for Calligraphy and Painting, 2003 [邱振中. 笔法与章法. 上海: 上海书画出版社, 2003]
- 2 Lin Y T. My Country and My People. Xi'an: Shanxi Normal University Publishing House, 2006 [林语堂. 吾国与吾民. 西安: 陕西师范大学出版社, 2006]
- 3 Shen Y M. The Interpretation of Experience From Famous Calligraphers in the History. Shanghai: Shanghai Education Publishing House, 1963 [沈尹默. 历代名家学书经验谈辑要释义. 上海: 上海教育出版社, 1963]
- 4 Mao G H, Zhang J S, He X H. A survey of virtual hairy brush. J Syst Simul, 2006, 18: 669-674 [毛国红, 张俊松, 何兴恒. 虚拟毛笔模型研究综述. 系统仿真学报, 2006, 18: 669-674]
- 5 Wang Y G, Pang Y J. CCC-Chinese calligraphy system of computer. Inform Control, 1986, 2: 40-45 [王易工, 庞云阶. CCC-计算机中国书法系统. 信息与控制, 1986, 2: 40-45]
- 6 Strassmann S. Hairy brushes. In: Proceedings of Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, New York, 1986. 225-232
- 7 Ma Z, Su J. Aesthetics evaluation for robotic Chinese calligraphy. IEEE Trans Cogn Dev Syst, 2017, 9: 80-90
- 8 Li R, Qin R, Zhang J, et al. The esthetic preference of Chinese typefaces—an event-related potential study. Brain Res, 2015, 1598: 57-65
- 9 Yu J H, Zhang J D. A physically-based brush-pen model. J Comput-aided Design Comput Graph, 1996, 8: 241-245 [于金辉, 张积东. 一个基于骨架的笔刷模型. 计算机辅助设计与图形学学报, 1996, 8: 241-245]
- 10 Xu S, Tang M, Lau F, et al. A solid model based virtual hairy brush. Comput Graph Forum, 2002, 21: 299-308
- 11 Mi X F, Xu J, Tang M, et al. The droplet virtual brush for Chinese calligraphic character modeling. In: Proceedings of Applications of Computer Vision, Orlando, 2002. 330-334
- 12 Zhang H J, Wang X J, Sun J Z, et al. Fractal-based simulation of the diffusion effect of Chinese ink wash drawing. J Comput-aided Design Comput Graph, 2004, 16: 555-558 [张海江, 王秀锦, 孙济洲, 等. 应用分形仿真水墨扩散轮廓. 计算机辅助设计与图形学学报, 2004, 16: 555-558]
- 13 Tang D, Zang C. A new simulation method for Chinese ink wash drawing by GA. J Image Graph, 2009, 14: 537-542 [唐棣, 臧超. 一种应用 GA 的墨扩散效果仿真新方法. 中国图象图形学报, 2009, 14: 537-542]
- 14 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]
- 15 Guo Q, Kunii T. Modeling the diffuse paintings of 'Sumie'. In: Proceedings of IFIP Series on Computer Graphics, Tokyo, 1991. 329-330
- 16 Wong H T F, Ip H H S. Virtual brush: a model-based synthesis of Chinese calligraphy. Comput Graph, 2000, 24: 99-113
- 17 Mi X F, Tang M, Lin J Z, et al. Experience based virtual brush modeling. Comput Res Develop, 2003, 40: 1244-1251 [宓晓峰, 唐敏, 林建贞, 等. 基于经验的虚拟毛笔模型. 计算机研究与发展, 2003, 40: 1244-1251]
- 18 Girshick R. Simulating Chinese brush painting: the parametric hairy brush. In: Proceedings of ACM SIGGRAPH, Gonzalez, 2004. 22
- 19 Lu J, Barnes C, DiVerdi S, et al. RealBrush: painting with examples of physical media. ACM Trans Graph, 2013, 32: 1-12
- 20 Lee J. Simulating oriental black-ink painting. IEEE Comput Graph Appl, 1999, 19: 74-81

- 21 Saito S, Nakajima M. 3D physics-based brush model for painting. In: Proceedings of SIGGRAPH, 1999. 226
- 22 Baxter B, Scheib V, Lin M, et al. DAB: interactive haptic painting with 3D virtual brushes. In: Proceedings of ACM SIGGRAPH, 2001. 104: 10
- 23 Yeh J, Lien T, Ouhyoung M. On the effects of haptic display in brush and ink simulation for Chinese painting and calligraphy. In: Proceedings of Pacific Conference on Computer Graphics and Applications, 2003. 439–441
- 24 Chu N S H, Chiew-Lan Tai N S H. Real-time painting with an expressive virtual Chinese brush. *IEEE Comput Grap Appl*, 2004, 24: 76–85
- 25 Chu S, Tai C. MoXi: real-time ink dispersion in absorbent paper. In: Proceedings of ACM SIGGRAPH, 2005. 504–511
- 26 Chen H Q, Luo J F, Wen G H, et al. Simulation of Chinese calligraphy based on physical properties of pen, paper and ink. *J Comput-aided Design Comput Graph*, 2012, 24: 1134–1138 [陈海强, 罗健飞, 温国华, 等. 基于笔纸墨物理属性的毛笔书法仿真. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2012, 24: 1134–1138]
- 27 Zhen S Z, Hou Z X, Guo C, et al. Simulation of half-dry stroke based on force feedback technology. *J Comput-aided Design Comput Graph*, 2016, 28: 1016–1024 [郑栓柱, 侯增选, 郭超, 等. 基于力反馈技术的干笔飞白仿真方法. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2016, 28: 1016–1024]
- 28 Leung H, Wong S, Ip H. In the name of art. *IEEE Signal Process Mag*, 2008, 25: 49–54
- 29 Wang S, Lee H. Dual-binarization and anisotropic diffusion of Chinese characters in calligraphy documents. In: Proceedings of International Conference on Document Analysis and Recognition, 2001. 271–275
- 30 Zhang J, Yu J, Mao G, 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
- 31 Shi Z, Xu B, Zheng X, et al. An integrated method for ancient Chinese tablet images de-noising based on assemble of multiple image smoothing filters. *Multimed Tools Appl*, 2016, 75: 12245–12261
- 32 Huang Z K, Li Z H, Huang H, et al. Comparison of different image denoising algorithms for Chinese calligraphy images. *Neurocomputing*, 2016, 188: 102–112
- 33 Zhuang Y, Zhang X, Wu J, et al. Retrieval of Chinese calligraphic character image. In: Proceedings of Pacific Rim Conference on Multimedia, Tokyo, 2004. 17–24
- 34 Lu W, Wu J, Wei B, et al. Efficient shape matching for Chinese calligraphic character retrieval. *J Zhejiang Univ - Sci C*, 2011, 12: 873–884
- 35 Zhang X, Zhuang Y. Dynamic time warping for Chinese calligraphic character matching and recognizing. *Pattern Recogn Lett*, 2012, 33: 2262–2269
- 36 Gao P C, Wu J Q, Yuan L, et al. Fast Chinese calligraphic character recognition with large-scale data. *Multimed Tools Appl*, 2015, 74: 7221–7238
- 37 Zhang J, Yu J, Lin H. Capturing character contours from images of ancient Chinese calligraphy. In: Proceedings of the Workshop on Digital Media & ITS Application in Museum & Heritage/digital Media & ITS Application in Museum & Heritage, Suzhou, 2007. 36–41
- 38 Yu J, Peng Q. Realistic synthesis of cao shu of Chinese calligraphy. *Comput Graph*, 2005, 29: 145–153
- 39 Lu W M, Wu J Q, Zhuang Y T. Computer aided calligraphy tablet design. *J Comput-aided Design Comput Graph*, 2008, 20: 469–475 [鲁伟明, 吴江琴, 庄越挺. 计算机辅助书法牌匾设计. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2008, 20: 469–475]
- 40 Zhang T, Zhang L L, Yu J H, et al. Computer generation of 3D inscriptions from 2D images of Chinese calligraphy. *Chin J Comput*, 2014, 37: 2380–2388 [张婷, 章立亮, 于金辉, 等. 用单幅图像生成书法碑刻及牌匾效果. *计算机学报*, 2014, 37: 2380–2388]
- 41 Zhang X F, Liu J Y. Extracting Chinese calligraphy strokes using stroke crawler. *J Comput-aided Design Comput Graph*, 2016, 28: 301–309 [章夏芬, 刘佳岩. 用爬虫法提取书法笔画. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2016, 28: 301–309]
- 42 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]
- 43 Pan X B, Brady M, Bowman A K, et al. Enhancement and feature extraction for images of incised and ink texts. *Image Vision Comput*, 2004, 22: 443–451
- 44 Molton N, Pan X, Brady M, et al. Visual enhancement of incised text. *Pattern Recogn*, 2003, 36: 1031–1043

- 45 Ma X H, Yang Y M, Huang W F, et al. Oracle typeface and database generation. *Appl Linguist*, 2004, (3): 105–111 [马小虎, 杨亦鸣, 黄文帆, 等. 甲骨文轮廓字形生成技术与通用甲骨文字库的建设. *语言文字应用*, 2004, (3): 105–111]
- 46 Yang H, Lu J, Lee H. A Bezier curve-based approach to shape description for Chinese calligraphy characters. In: *Proceedings of International Conference on Document Analysis and Recognition*, 2001. 276
- 47 Wong S T S, Leung H, Ip H H S. Model-based analysis of Chinese calligraphy images. *Comput Vision Image Und*, 2008, 109: 69–85
- 48 Cheng J, Tong R, Tang M, et al. An approach to extract the Chinese calligraphy's approximate skeleton. In: *Proceedings of International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design*, 2004. 2: 727–732
- 49 Yao F, Shao G, Yi J. Extracting the trajectory of writing brush in Chinese character calligraphy. *Eng Appl Artif Intell*, 2004, 17: 631–644
- 50 Xu S H, Jiang H, Jin T, et al. Automatic generation of Chinese calligraphic writings with style imitation. *IEEE Intell Syst*, 2009, 24: 44–53
- 51 Shi C, Xiao J, Xu C, et al. Automatic generation of Chinese character using features fusion from calligraphy and font. In: *Proceedings of Engineering Reality of Virtual Reality*, 2014. 90120N
- 52 Xu S, Jiang H, Jin T, et al. Automatic facsimile of Chinese calligraphic writings. *Comput Graph Forum*, 2008, 27: 1879–1886
- 53 Shi C, Xiao J, Jia W, et al. Automatic generation of Chinese character based on human vision and prior knowledge of calligraphy. In: *Proceedings of Natural Language Processing and Chinese Computing*, Beijing, 2012. 23–33
- 54 Lin J, Hong C, Chang R, et al. Complete font generation of Chinese characters in personal handwriting style. In: *Proceedings of Computing and Communications Conference*, 2016. 1–5
- 55 Pan W, Lian Z, Sun R, et al. FlexiFont: a flexible system to generate personal font libraries. In: *Proceedings of ACM Symposium on Document Engineering*, 2014. 17–20
- 56 Li H, Liu P, Xu S, et al. Calligraphy beautification method for Chinese handwritings. In: *Proceedings of the 4th International Conference on Digital Home*, 2012. 122–127
- 57 Zitnick C L. Handwriting beautification using token means. *ACM Trans Graph*, 2013, 32: 1
- 58 Yi T, Lian Z, Tang Y, et al. A data-driven personalized digital ink for Chinese characters. In: *Proceedings of International Conference on Multimedia Modeling*, 2014. 254–265
- 59 Hou S, Xu P. An algorithm of calligraphy beautification based on improved velocity and width model. In: *Proceedings of International Conference on Computer Science*, 2015. 124–127
- 60 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]
- 61 Shi C, Xiao J, Xu C, et al. Nonlinear and non-gaussian bayesian based handwriting beautification. In: *Proceedings of IS&T/SPIE Electronic Imaging*, 2014. 902012
- 62 Shi C, Xiao J, Xu C, et al. Visual improvement for bad handwriting based on Monte-Carlo method. In: *Proceedings of IS&T/SPIE Electronic Imaging*, 2014. 902708
- 63 Chen J, Zhu F X. Novel Chinese calligraphy style generation based on curve analogy with FSVM. *J Image Graph*, 2010, 15: 340–345 [陈颀, 朱福喜. 结合模糊支持向量机的曲线类比在书法风格仿真中的研究. *中国图象图形学报*, 2010, 15: 340–345]
- 64 Xu M, Dong J. Generating new style of Chinese stroke based on statistic model. In: *Proceedings of the 1st International Symposium Advances in Artificial Intelligence and Applications (AAIA'06)*, Wisla, 2006. 215–222
- 65 Dong J, Xu M, Pan Y H. Statistic model-based simulation on calligraphy creation. *Chin J Comput*, 2008, 31: 1276–1282 [董军, 徐淼, 潘彦鹤. 基于统计模型的书法创作模拟. *计算机学报*, 2008, 31: 1276–1282]
- 66 Dong J, Xu M, Zhang X, et al. The creation process of Chinese calligraphy and emulation of imagery thinking. *IEEE Intell Syst*, 2008, 23: 56–62
- 67 Orbay G, Kara L B. Beautification of design sketches using trainable stroke clustering and curve fitting. *IEEE Trans Visual Comput Graph*, 2011, 17: 694–708
- 68 Chang B, Zhang Q, Pan S Y, et al. Generating handwritten Chinese characters using CycleGAN. In: *Proceedings of IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV)*, Lake Tahoe, 2018. 199–207

- 69 Lyu P, Bai X, Yao C, et al. Auto-encoder guided gan for Chinese calligraphy synthesis. In: Proceedings of the 14th IAPR International Conference on Document Analysis and Recognition (ICDAR), 2018. 1095–1100
- 70 Sun D, Ren T, Li C, et al. Learning to write stylized Chinese characters by reading a handful of examples. In: Proceedings of the 27th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI), 2018. 920–927
- 71 Xu P, Wang L, Guan Z, et al. Evaluating brush movements for Chinese calligraphy: a computer vision based approach. In: Proceedings of the 27th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI), 2018. 1050–1056
- 72 Jin L W, Zhong Z Y, Yang Z, et al. Applications of deep learning for handwritten Chinese character recognition: a review. *Acta Autom Sin*, 2016, 42: 1125–1141 [金连文, 钟卓耀, 杨钊, 等. 深度学习在手写汉字识别中的应用综述. *自动化学报*, 2016, 42: 1125–1141]
- 73 Dai Q H, Zhang J S. Beautifying handwriting characters based on the optimization of strokes and structure. *Sci Sin Inform*, 2017, 47: 468–481 [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]
- 74 Wang P J, Wang M. Research on the implementation form and interaction model of calligraphy in digital terminals. *Art Sci Tech*, 2013, 12: 414–415 [王鹏江, 王敏. 书法笔法在数字终端上的实现形式与交互模型研究. *艺术科技*, 2013, 12: 414–415]
- 75 Srihari S N, Yang X, Ball G R. Offline Chinese handwriting recognition: an assessment of current technology. *Front Comput Sci China*, 2007, 1: 137–155
- 76 Bianco S, Ciocca G. User preferences modeling and learning for pleasing photo collage generation. *ACM Trans Multimedia Comput Commun Appl*, 2015, 12: 1–23
- 77 Denzler J, Rodner E, Simon M. Convolutional neural networks as a computational model for the underlying processes of aesthetics perception. In: Proceedings of ECCV 2016 Workshops, 2016. 871–887
- 78 Brachmann A, Redies C. Computational and experimental approaches to visual aesthetics. *Front Comput Neurosci*, 2017, 11: 102
- 79 Ding X J, Zhou C L. A neurological study on aesthetic process and its significance to aesthetics. *Psychol Sci*, 2006, 29: 1247–1249 [丁晓君, 周昌乐. 审美的神经机制研究及其美学意义. *心理科学*, 2006, 29: 1247–1249]
- 80 Huang Z L, Zhang W D. Neuroaesthetics: exploring aesthetics and the brain. *Adv Psychol Sci*, 2012, 20: 672–681 [黄子岚, 张卫东. 神经美学: 探索审美与大脑的关系. *心理科学进展*, 2012, 20: 672–681]
- 81 Liao J, Yao Y, Yuan L, et al. Visual attribute transfer through deep image analogy. *ACM Trans Graph*, 2017, 36: 1–15

A survey of digital calligraphy

Junsong ZHANG^{1,2}

1. *National Engineering Research Center for E-Learning, Central China Normal University, Wuhan 430079, China;*

2. *Mind, Art & Computation Group, Cognitive Science Department, Xiamen University, Xiamen 361005, China*

E-mail: jszhang@outlook.com

Abstract Unlike its traditional counterpart, digital Chinese calligraphy is created and presented using digital technology in human-computer interaction environments. Here, we provide a state of the art introduction to digital calligraphy research. After analyzing the research background and goal of digital calligraphy, we present the most important topics of digital calligraphy: calligraphic tool modeling, calligraphic image analyzing and processing, and calligraphic shape analysis and synthesis. Each research topic is accompanied by a state-of-the-art introduction and current trends of the topic. Finally, we discuss important issues concerning the further development of digital calligraphy.

Keywords digital calligraphy, virtual brush, tablet image, typeface synthesis, aesthetic evaluation, computational aesthetics, artificial intelligence



Junsong ZHANG received his Ph.D. degree in computer science from the State Key Lab of Computer Aided Design and Computer Graphics, Zhejiang University, Hangzhou, China, in 2008. He is currently a professor at the National Engineering Research Center for E-Learning, Central China Normal University, China. His main research interests are computer graphics, computational aesthetics, Chinese information processing, and brain

& cognitive science.