“千里阵云”的主观物象空间特征测量

律睿慤^{1*}, 张陶洁¹, 梅莉琳^{1,2}

1. 江南大学人工智能与计算机学院, 无锡 214000

2. 常州市钟楼外国语学校, 常州 213000

* 通信作者. E-mail: ruiminlyu@jiangnan.edu.cn

收稿日期: 2021-06-06; 修回日期: 2021-08-11; 接受日期: 2021-09-06; 网络出版日期: 2022-07-15

2019 年度江苏省“六大人才高峰”高层次人才项目 (批准号: XYDXX-161) 资助

摘要 书法笔画能够产生丰富的主观意象, 中国传统绘画也有类似的审美现象. 于是, 在古代的书画论著中, 有大量关于笔画观感的记载, 往往是将笔画引出的各种丰富拟物化意象进行描述. 目前由于书法通常被归入艺术学研究的范畴, 书法理论研究中还极少引入数理建模和科学实验的方法, 因此对于笔画的意象空间还鲜有采取测量及实证的科学方法, 还未能对其建立数理模型. 本文设计了两项实验, 用以探索书法笔画的意象空间. 在第一项实验中, 引入实验美学中常用的审美测量方法, 选取了书法家写的 15 个“一”字作为测试样品, 并选用 21 种拟物化感知维度, 设计了视觉模拟量表, 招募了 252 名普通群众对它们进行意象感受评测实验. 然后, 对数据进行主成分分析, 展现出笔画“一”的意象空间的特征: 其一, 它的前二维占据主导, 主轴对应于书法理论中探讨最多的“质与妍”的风格倾向问题、副主轴对应于“真与草”的书风倾向问题; 其二, 它的第三、四维的分布情况也不可忽略, 其具体的意义有待进一步解释; 其三, 不同形态的笔画分布于该空间的不同位置, 不同的感知维度对应于从空间原点出发的不同方向. 基于第一项实验, 设计了可视化方案, 直观展现该意向空间中占主导的前二维的结构特征. 第二项实验让测试者对实验一中的 15 个笔画样品评价其两两之间的主观差异. 该实验结果经多维缩放分析, 与实验一的结果互为支撑. 不仅验证了书法理论中有关书风和书体的观点, 还为关于“笔法”的审美感知实证研究提供了一种可拓展的数理模型和实验框架.

关键词 书法, 笔法, 笔画, 意象, 实验美学, 主成分分析, 多维尺度分析, 数据可视化

1 引言

“一”如千里阵云, 隐隐然其实有形; ‘点’如高峰坠石, 磕磕然实如崩也. ……”, 这是《笔阵图》中对于简单书法笔画的丰富意象的描述. 古代书论还有很多类似的描述, 例如表 1 中论点 1~7^[1]. 由

引用格式: 律睿慤, 张陶洁, 梅莉琳. “千里阵云”的主观物象空间特征测量. 中国科学: 信息科学, 2022, 52: 1221–1250, doi: 10.1360/SSI-2020-0344

Lyu R M, Zhang T J, Mei L L. Experimental framework to study the subjective materialized image space of horizontal calligraphy strokes (in Chinese). Sci Sin Inform, 2022, 52: 1221–1250, doi: 10.1360/SSI-2020-0344

表 1 书法论著中笔画意象描述摘选
Table 1 Descriptions of subjective images of brushstroke in traditional literatures about calligraphy and painting

Point	The description of calligraphy	Reference	The way of description
1	“‘一’如千里阵云, 隐隐然其实有形. ‘点’如高峰坠石, 磕磕然实如崩也. ……”	东晋 卫夫人《笔阵图》	以自然现象比喻用笔
2	“点为侧, 如鸟之翻然侧下; 横为勒, 如勒马之用缰; ……”	《永字八法》	用事物的运动来比喻用笔
3	“…… 兽跂鸟跬, 志在飞移; 狡兔暴骇, 将奔未驰. ……”	东汉 崔瑗《草书势》	描绘观赏草书笔迹产生的丰富联想
4	“…… 观夫悬针垂露之异, 奔雷坠石之奇, 鸿飞兽骇之资, 鸾舞蛇惊之态, ……”	唐 孙过庭《书谱》	以丰富的事物比喻笔法的表现力
5	“偃仰向背、阴阳相应、鳞羽参差、峰峦起伏、真草偏枯、邪真失则、迟涩飞动、射空玲珑、尺寸规度、随字变转”	唐 张怀瓘《论用笔十法》	以拟物、比喻描绘笔法的要义
6	“…… 观于物, 见山水崖谷、鸟兽虫鱼、草木之花实、日月列星、风雨水火、雷霆霹雳、歌舞战斗、天地事物之变, ……”	唐 韩愈《送高闲上人序》	描述观赏张旭书法产生的丰富联想, 涉及各种各样的情感、事物、运动
7	“景则毫素流靡. 稚恭声彩迢越. ”、“此十五人虽未穷字奥, 书尚文情. 披其丛薄, 非无香草; 视其涯岸, 时有润珠. 故能遗斯纸以为世玩, 允为下之中. ”、“此二十三人皆五味一和, 五色一彩. 视其雕文, 非特刻鹄; 观其下笔, 宁止追响. 遗迹见珍, 余芳可折. ”	南朝 庾肩吾《书品》	以色声香味来形容作品的观感
8	“张僧繇点曳斫拂, 依卫夫人笔阵图, 一点一画别是一巧, 钩戟利剑, 森森然, 又知书画用笔同矣. ”	晚唐 张彦远《历代名画记》	以类似于《笔阵图》的方式评论张僧繇的绘画用笔
9	“笔拖而不断谓之筋; 起伏成实谓之肉; 生死刚正谓之骨; 迹画不败谓之气.”	五代 荆浩《笔法记》	以筋、肉、骨、气来比喻笔法体现的运动感受
10	“焉能使笔墨之下, 有胎有骨, 有开有合, 有体有用, 有形有势, 有拱有立, 有蹲跳, 有潜伏, 有冲霄, 有崩劣, 有磅礴, 有嵯峨, 有嶙峋, 有奇峭, 有险峻, 一一尽其灵而足其神.”	清初 石涛《苦瓜和尚画语录》	列举各种事物的阴阳关系来描述笔墨的表现力
11	“平、圆、留、重、变” ^[3]	清末民初 黄宾虹	以高度概括的五个形容词配合丰富的比喻来描述笔法的要诀

于“书画同源”的传统, 文人画也特别注重“用笔”, 于是古代绘画理论中也有大量关于笔画观感的描述^[2,3], 如表 1 中的论点 8~11.

这些记录, 皆为将笔画联想为丰富的动态事物, 本文称其为拟物化意象. 这些古代书画文献中的叙述, 目前主要被学界归于“艺术理论”. 然而, 常常被忽略的一个事实是, 书法被归入艺术仅仅只有百余年的历史. 古代也有所谓“艺”, 例如大家熟知的“六艺”——礼乐射御书数, 但显然它不同于我们当下所说的“艺术”. 被归入艺术后, 现代的书法理论研究主要归于技法、美学、史论等, 极少涉及科学方法——数理逻辑与实验设计. 于是, 在这种惯性分科的影响下, 上述论述几乎还未曾以数理的方式去看待, 也未经实验验证. 能否以“科学”的方式考察书法笔画的拟物化意象? 能否量化地表达出来? 它们形成的“意象感知空间”有怎样的结构特征? 这是本文关注的问题.

图 1 (网络版彩图) 研究框架——笔画审美的两种研究视角: (a) 对书法“笔画”的审美行为; (b) 将审美感受以语言方式记录; (c) 将审美行为表达为矩阵乘法的形式; (d) 审美感受的矩阵表达形式; (e) 关于审美行为矩阵模型的实验设计要点; (f) 通过数据分析解答研究的核心问题

Figure 1 (Color online) Research framework—two perspectives on the aesthetics of strokes: (a) the aesthetic behavior of calligraphy strokes; (b) verbal recording of aesthetic feelings; (c) expression of aesthetic behavior in the form of matrix multiplication; (d) matrix representation of aesthetic feelings; (e) the key points of experimental design of the matrix model of aesthetic behavior; (f) the core questions of the study by experimental data analysis

对于表 1 中的意象描述 (论点 1~11), 通常会下意识地将其归入“艺术理论”的范畴. 但若撇开“艺术”的成见, 思考其本质, 便发现它们仅仅是记录了一类心理感知现象——由视觉物理刺激形成一定的心理感受, 且这种文学性的描述, 也仅仅是对意象感知现象的表述方式之一, 而非唯一. 于是, 完全可以转换到“科学”的视角去看待之, 这正是本文的基本思路 (图 1). 对表 1 进行归纳, 发现其基本模式是从笔画联想到具有色、声、香、味、触、运动等多种物理—心理感受的事物. 其过程为: 步骤 1, 观看“笔画”并充分调动感知想象力去感受、品评、鉴赏笔画 (图 1(a)); 步骤 2, 以语言的形式将感受结果表述出来 (图 1(b)). 将这一过程以数理模型的思维进行理解, 可看作是运用各种心理感知的“尺子”对书法作品上的各种“笔画”进行“测量”, 若假定该测量近似于“线性”映射, 则可以表达为矩阵乘法的形式, 如图 1(c) 和 (d) 所示. 式中, 矩阵 A 的行向量为一组书法笔画, 张成一个“笔画空间”; 矩阵 B 的列向量为一组物理—心理感知, 形成一个表述“意象”的空间; 乘法运算即表达了从 A 对应的“笔画”空间投射到 B 对应的“意象”空间中. 运算的结果 C 为意象联想的结果, 也即用 B 的每一列对 A 的每一行进行“测量”的结果, 它描述了 A 的行向量与 B 的列向量形成的线性关系.

上述数理模型 (图 1(c) 和 (d)) 还需配合实验设计, 才构成完整的科学研究. 实验材料的范围限定为《笔阵图》中描述的“一’如千里阵云”. 这是因为, 从大量的书法论著可见, 书法笔画意象空间包含极为丰富的感受, 是难以靠一次单独实验探索完善的领域, 本实验也无意于探索出其完整形貌, 而是希望由此建立一个关于笔画意象空间的“种子模型”, 并将其与经典书法理论关联起来, 为将来的研究提供一种可拓展的框架. 因此, 这种限定是对实验材料的广泛代表性和实验的负荷量两方面的折中. 控制变量是主要的实验设计方法, 图 1(e) 表述了其目标, 即让图 1(c) 中的“运算”在确保足够高的信度和效度的条件下执行, 获取到具备足够效力的实验数据 (图 1(d)), 本文中它的实现为一种审美评测实

验. 最后, 通过对实验数据的分析, 解答本文的核心问题: 书法笔画 “一” 的拟物化意象空间有怎样的结构特征? 更具体地, 它对应于一系列子问题 (图 1(f)):

- 问题 1 (Q1). 笔画 “一” 的意象空间是几维的? 每个维度代表什么具体的、可感知的含义?
- 问题 2 (Q2). 矩阵 B 中每一把物理 – 心理 “尺子” 的空间方位如何? 矩阵 A 中每个 “一” 在空间中的位置如何?
- 问题 3 (Q3). 维度、距离、内积、极限、维度、体积等空间属性分别对应于笔画 “一” 的何种感知特性?

2 相关研究

2.1 书画理论

笔法, 是书法理论的焦点. 笔阵图、永字八法都关乎于笔法. 古代文献中有大量的关于笔法的精彩描绘, 如奔雷坠石、悬针垂露、屋漏痕、印印泥等, 记录了它的丰富表现力, 然而多为个人化的观感记录或比喻式的经验总结. 当代的书法理论家则尝试从经验提炼到系统的理论, 例如陈振濂^[4]总结了线条的 3 种感受——力量感、立体感、节奏感, 邱振中^[5]论述了线条与情感的关系. 然而, 至今还未有关于 “笔法” 表现力的实证研究.

笔法, 也即 “笔墨” 中的 “笔”, 关乎于中国绘画的本体. 由于 “骨法用笔”、“书画同源” 的传统, 绘画中的 “笔墨” 和书法中的笔法相通, 特别为文人画家所崇尚. 然而, 到了 20 世纪后半期, 有人对 “笔墨” 提出质疑, 如刘国松提出的 “革中锋的命”^[6], 吴冠中^[7]提出 “笔墨等于零”, 引起了巨大争议. 张仃^[8]旗帜鲜明地反驳道: “人们看一幅中国画, 绝对不会止于把线条仅仅看作造型手段, 他们会完全独立地去品味线条 (包括点、皴) 的 ‘笔性’, 也就是黄宾虹所说的 ‘内美’”. 其核心观点就是笔墨具有独立表现力, 也成为坚守 “笔墨” 传统的艺术家群体的共同意见. 这场争论持续了多年, 直到最近几年仍然有相关论文发表^[9]. 然而, 关于 “笔墨等于多少?”, 这场论战终究没有定论^[10]. 纵观已经采取的论述方法, 有考证、引证、例证、论证和辩证, 唯缺实证.

总之, 古代关于笔法表现力的记载, 多为个人化的感受描述或经验总结; 近现代的书画理论增强了逻辑性和系统性, 依然存在两方面不足: 其一, 限于专家的个人经验, 未能研究一般观赏者的感受; 其二, 缺乏实证, 即缺乏有效数据的支撑.

2.2 审美评测

本研究采取的实验方法, 源于实验美学中的审美评测方法. 研究人员为了定量地评价样品 (绘画、书法、音乐、照片等) 的美学品质, 常常采取语义差异法^[11]来设计审美量表, 其常用形式包括李克特量表 (Likert scale)、视觉模拟量表 (visual analog scale)^[12], 然后让足够数量的测试者对预先选定的样品集进行评测, 最后对评测数据进行统计分析. 量表中, 通常会有特定类别的美学感知属性, 例如复杂度、愉悦度、喜欢程度等, 测试者要对样品按 Likert 量表规定的分值范围对这些感知属性进行打分. 以往的关于视觉艺术的审美评测研究中, 测试样品主要是中西方的绘画艺术、色彩构成^[13], 评测的审美感知包括审美偏好^[14~17]、审美吸引力^[7~10, 17~20]、视觉复杂度^[15, 19, 21, 22]、审美情感^[23~26]. 然而, 至今还鲜有对书法作品的主观美学品质进行测评的尝试, 特别是未对书法论著中大量叙述的各种 “意象” 设计出恰当的评测方法. 有鉴于此, 本文首次尝试对书法笔法的意象感受进行测量.

2.3 拟物化意象感受

若要对“笔法”的意象表现设计感知评价实验,需要选取合适的审美感知属性.从书法论著中存在大量“意象”的描述来看(表 1),书法的审美评价方面特别关注作品的“笔法”表现出来的丰富意象,也可以理解为通过品味线条表现出的运动感受(力度、速度)和物质感受(视、听、触),感受其丰富性,再由此进行审美评价.这恰对应于张仃谈到的“笔性”^[8].这种拟物化的感知以及这种审美逻辑在其他类型的视觉艺术审美中并不常见.

书法笔画的“意象”通常表现为各种想象的动态物象,这在以往的审美评测中通常是忽略的,但在心理学、可视化领域中却已经积累了不少相关的研究,这类研究关注视觉表象与其材质主观感受方面的关联性^[27~29],其涉及感受包括视觉、听觉、触觉^[30]、味觉、嗅觉^[27,31]以及情感偏好等.其中一些研究表明,运动的速度、力度等感受与运动物的物质感知有显著的关联性^[32~34],这或许反映了一个朴素的道理,即我们的触觉必须依赖于肢体运动,才能体验现实世界中的各种事物,于是运动感知与物质感知便关联起来,这也恰好对应于传统书法论著中常常将事物与运动关联在一起的意象描述方式(表 1 中论点 1~11).于是,本文将综合上述研究中采取的感知维度,融入审美评测中,对书法笔画的意象感受进行测量.可以预期的结果是,不同的笔画能够在这些多维感知中表现出足够的丰富程度,形成具有足够广度的多维感知空间.

2.4 基于两两相似度的感知空间测量

多维尺度分析(multidimensional scaling, MDS)是一种用于量化、判断相似性的统计工具,它可以根据给定的样品间距或相似度,为样品赋予合适的空间坐标,在空间中显示各样品间的关系,样品的距离表明样品的相似程度,其中样品间距越小,相似度越高^[35,36].由于可降低数据复杂性、易可视等特性,MDS已被用于探索视觉感知、心理感知的空间维度.其方法就是通过设计感知或主观评测实验,探索实验样品间的两两相似度或距离,再运用 MDS,寻求真实反映相似性的样品空间坐标,从而分析实验样品关于目标概念而构建的空间分布特征.例如,Ekman 等^[37]通过对一组颜色的主观相似度评测,探索了主观色彩空间的环状分布特征;Papesh 等^[38]基于 MDS 构建各种肤色在认知空间的分布,分析肤色带来的认知缺陷;Godwin 等^[39]将 MDS 技术用于视觉搜索领域,构造了一个简单的二维空间,并呈现数字 0~9 的空间分布.本文涉及的“笔画意象”概念,其心理感知空间特征未知,因此也可以运用类似的实验和数据分析方法,即本文的实验 2.

3 概念框架

针对第 1 节提出的 3 个问题(Q1~Q3),提出了图 2 所示的双实验框架.该框架中包含两项实验,用于测量笔画样品的意象感受.

实验 1——笔画的多维意象评测.该实验的目标是获得所有样品的多种意象感受的主观评价值.从数理模型而言,它可以表达为一个矩阵乘法,即 m 个笔画样品构成的矩阵 A ,投射到 n 维意象感受构成的矩阵 B 中,形成 $m \times n$ 个主观评测值的矩阵 C .在实验的实施中,它呈现为心理量表测试,每位测试者需要对样品评价多种感受的分值.于是,实际获得的矩阵 C 中,每个元素都会有多个样本数值,根据中心极限定律可知,它们的均值将趋近于正态分布,于是,可以用其均值作为其最大似然估计,以代表人群整体的平均感受的分值.对于实验数据的信度,将采用最普遍使用的 Cronbach α 系数来评价.这部分内容将在第 4 节详细描述.

图 2 概念框架

Figure 2 The conceptual framework

实验 2—— 笔画主观相似度评测. 该实验的目的是获得所有样品两两之间的主观相似度评价. 从数理模型而言, 它可以表达为 m 个笔画组成的矩阵 A 与自身转置矩阵 A^T 相乘, 获得尺寸为 $m \times m$ 的相似度矩阵 E , 其数值大小代表了对应两个样品之间的主观相似度. 在实验的实施的, 它呈现为对样品两两之间进行相似度评测. 类似于矩阵 C , 矩阵 E 中每个元素也会获得多个取样值, 可以用其均值作为整体感受的最大似然估计. 将采用分半信度来评价实验数据的信度. 这部分内容将在后续详细描述.

有了足够信度的实验数据, 该框架可以解答提出的 3 个问题, 需采取合适的统计分析方法并结合传统的文献研究, 具体内容见第 6 节, 其基本思路如下所述.

- Q1. 综合实验 1 数据 (矩阵 C) 的 PCA 结果及实验 2 数据 (矩阵 E) 的 MDS 结果进行解答, 本部分将在 6.1 小节详述.
- Q2. 利用实验 1 数据的 PCA 结果, 将样品及各种感知维度之间的空间关系量化地表达出来, 本部分将在 6.2 小节详述.
- Q3. 综合数据统计结果及文献调查, 将量化结果与传统理论及审美经验进行关联性分析, 本部分将在 6.3 小节详述.

双实验框架的重要价值就在于, 能够为实验结果的效度进行双重检验. 本文将结合两项实验的数据, 评估结果的结构效度和内容效度, 前者关乎测量结果是否能良好地连接到传统的笔画意象理论, 后者关乎测量的有限实验样品张成的意象空间多大幅度地代表所有 “一” 张成的意象空间. 这部分内容将在第 7 节详细描述, 其基本思路如下所述.

- 结构效度检验: 将实验 1 和实验 2 的数据结果综合判定, 对于实验 1 的数据 (矩阵 C), 在进行主成分分析后, 将其与经典笔法意象感受有关的理论进行对比, 若其主维度能够与传统理论中探讨的笔画意象感知的主题关联起来, 则体现出良好的结构效度. 此外, 还将对实验 2 的数据 (矩阵 E) 进行多维尺度分析 [35, 36], 即通过样品两两间主观相似度的测量值反推出样品的主观感受的空间维度, 在本研究将采取基于 QR 分解的经典算法, 若其获得的各个主维度占比与实验 1 结果经 PCA 后的主维度占比相近, 则相当于对结构效度进行了双重验证.

• 内容效度检验: 内容效度取决于两方面因素, 其一是实验样品 (矩阵 A 中的行) 是否足够丰富, 以至于它们能够很好地代表所有的“一”, 其二是选用的感知维度 (矩阵 B 中的列) 是否能充分体现完整的“意象感受”空间. 于是在实验设计时需要依据传统理论以及专家经验来选取合适的样品和感知维度. 有赖于采取的双实验设计, 可以用两项实验的数据进行相互印证, 从而检验实验数据在表达“笔画意象空间”方面的充分性. 这种双重验证的基本逻辑是: 若矩阵 B 中的意象维度能够充分表达完整的笔画意象空间, 那么所有样品 (矩阵 A) 投射到矩阵 B 的列空间后, 其意象感受不会遭受“降维打击”, 能够很大程度地完整保留所有样品的意象感受. 换言之, 将所有样品表达达到 B 的主成分空间后, 其两两之间的距离应该是接近于样本在原始意象空间中的两两距离.

4 实验 1——笔画的多维意象感知评测

4.1 实验的数学模型

心理学的大量研究表明, 许多心理感知现象, 都可以表达为线性空间, 例如情感可以表达为 2 维情感模型^[21, 22, 40, 41]、3 维 PAD 情感模型^[42~44], 人格具有 5 个主要空间维度^[45, 46], 再如 RGB 颜色空间模型, 也首先是通过感知实验得出了 3 个主维度, 之后才通过研究视觉细胞发现对应于 RGB 的 3 种视锥细胞, 验证了该模型^[47]. 可见, 人的感知器官能够将一定强度范围内的物理刺激线性映射为感知信号, 并且大脑在处理它时, 通常都会将其映射到一个线性空间内. 因此, 将书法笔画的拟物化意象假定为一个线性空间, 并假定书法笔画的意象审美是一种线性映射, 是一种合理的假设.

设要探查的空间为笔画的拟物化意象空间, 用符号 G 表示. 为了探索这个空间的基本特征, 我们设计了以下的研究步骤 (如图 3):

- 步骤 1 笔画样品筛选 (实验 1). 选取足够数量的、表现特征多样化的书法笔画, 作为测试样品, 即选定了 m 个笔画样品, 它们在 G 中表现为 m 个矢量 $a_0; a_1; \dots; a_m$ 让它们按行矢量的形式, 构成矩阵 A , 即 $A = [a_1; \dots; a_m]^T$.
- 步骤 2 感知维度筛选. 选定足够数量的、能够表达丰富意象的 n 个感知维度, 它们表现为 G 空间中的 n 个矢量 $b_0; b_1; \dots; b_n$, 让它们按列矢量的方式构成矩阵 B , 即 $B = [b_0; b_1; \dots; b_n]$.
- 步骤 3 拟物化意象评测实验 (实验 2), 即用 B 矩阵对 A 矩阵进行“测量”, 实现矩阵乘法:

$$A \cdot B = C. \quad (1)$$

- 步骤 4 笔画意象空间特征分析, 即研究 C 的性质, 解答本文关心的核心问题.

前 3 步骤将在后续小节逐一介绍, 对于步骤 4 的空间特征分析, 将结合后续实验 2 结果, 在第 6 节进行分析.

4.2 步骤 1 笔画样品选择

这一步要选出一定数量的笔画“一”样品, 需达成两个目的: 其一, 能够体现丰富的意象感受, 换言之, 即要让选取的样品能够比较广阔地分布在笔画“一”的意象空间 G 内; 其二, 为了将后续审美评测实验的负荷控制在较低范围内, 需要控制笔画样品的数量. 为了达成上述目的, 我们采取以下实验流程:

- 通过专家评判的方式, 选定 13 位最具代表性的书法家, 他们分布于不同的历史时期, 作品具有鲜明的个人特色, 能够较大幅度地代表书法风格分布, 也即能够广阔地分布于笔画意象空间内;

图 3 (网络版彩图) 实验 1 的概念流程
Figure 3 (Color online) The conceptual procedures of the experiment 1

- 从 13 位书法家的代表作上截取多个笔画“一”;
- 再由专家进行评估, 对每位书法家的多个“一”进行评估, 选出一个图片清晰且风格上最具代表性的“一”, 得出 13 个“一”作为测试样品。
- 此外, 自行构造了一批“一”, 试图在外形特征上尽可能区别于已经选出的 13 个“一”, 然后再由专家筛选出 2 个最具特色的“一”, 至此一共获得 15 个“一”作为测试样品, 如图 4 所示。

为何限定为“一”而不是其他笔画呢? 第一, 如引言所述, 本实验并无意于探索完整的书法笔画意象空间, 而是选取“一”这种最具代表性的笔画, 力求建立一个笔画意象空间的基准模型; 第二, “一”的意象空间尽管无法涵盖所有笔画的意象空间, 但大量经验论述都谈到了简单笔画的重要性, 例如《永字八法》也将“一”作为一种代表性的笔画, 孙过庭《书谱》云“一点成一字之规, 一字成通篇之准”, 说明简单的一笔对整个字和整幅作品的引领作用, 能够很大程度地体现整体的风格, 可见“一”的意象与传统的经验理论有很大关联性, 建立其空间模型具有衔接传统理论的意义; 第三, 吴冠中在《笔墨等于零》^[7]一文中设定的条件是“脱离具体物象的孤立的笔墨”, 而单独的“一”字恰好符合该条件, 正好可以作为检验其论点的良好素材; 第四, 任何一幅书法、绘画(线条为主)都可以看作简单笔画的组合, 因此, 整幅作品的表现力必然来源于单独笔画的表现力。综合上述 4 方面考量可见, 有限数量的十五个“一”, 尽管不能完全表现所有笔画代表的意象空间, 但它们以很小的样本数量体现较大范围的意象表现, 可以看作是表达了笔画意象空间的具有重要意义子空间。

此外, 在意象评测实验之前, 还对选定的笔画进行了一定的预处理, 其目的是让评测结果最大程度反映线条形态与观感之间的关联, 而非源于“笔法”以外的干扰因素。图 4 中展示的“一”已经过一定的预处理, 其处理方法主要采取心理实验中的“均衡化”技术^[48], 即尽可能将线条形态以外的影响观感的因素变成均等的, 具体措施为: 全部处理为白底黑字的形态, 色相和黑白对比调整到一致, 居中且宽度调整到图相框宽度的 85%~90%。事实上不可能将每个“一”调整到绝对“公平”的展示形式, 因

图 4 选定 15 个“一”作为测试样品, A~O 对应的书法家依次为: A. 蔡襄; B. 褚遂良; C. 黄庭坚; D. 柳公权; E. 米芾; F. 姚孟起/欧阳询 (由于欧阳询的楷书碑文都已经模糊不清, 于是选取了姚孟起临写的《九成宫》中的“一”); G. 赵佶; H. 苏轼; I. 王羲之; J. 颜真卿; K. 赵孟頫; L. 钟繇; M. 柳公权; N 和 O. 律睿

Figure 4 Fifteen ‘Yi’s are selected as the stimuli, and their corresponding calligraphers are A. Cai Xiang; B. Chu Suiliang; C. Huang Tingjian; D. Liu Gongquan; E. MiFu; F. Yao Mengqi/Ouyang Xun (since the regular script inscription of Ouyang Xun was blurred, the ‘Yi’ is chosen from “Jiu Cheng Gong” written by Yao Mengqi); G. Zhao Ji; H. Su Shi; I. Wang Xizhi; J. Yan Zhenqing; K. Zhao Mengfu; L. Zhong Yao; M. Liu Gongquan; N & O. Lyu Ruimin

为没有一种客观标准来判定公平性. 但这种预处理达成了我们需要的相对“公平”, 即将线条形态以外的因素尽可能均衡化了. 于是, 观感的差异性基本上都源于线条本身的差异, 而非源于其他因素, 如颜色、背景肌理、印章、其他笔画或墨迹等. 图像处理本身也会影响线条的观感, 但其影响限于线条形态的变化, 而非引入了其他要素.

4.3 步骤 2 感知维度筛选

本步骤的目的是选取足够数量的感知维度, 它们能够充分地度量书法笔画的意象感受. 本文采取的方式是对比书法论著中关于笔画意象的描述以及近年来关于材质感知方面的实验, 从中筛选出合适的感知维度.

从文字记载可见, 古代的书画理论大量运用比喻、联想, 特别善于传达审美体验, 因为审美感受本质上就是需要调动所有观感和联想的整体性感受. 例如, 《笔阵图》中将“一”的意象描述为“千里阵云”, 融合了事物、情景、完整的运动过程, 物质、声音、形态、运动感受俱全, 仅 4 个字就给人带来一种故事般的完整体验. 这也印证了熊秉明^[49]的观点: “古代书法理论大都采用‘综合’的思维方式”. 但是他也批评: “(古代的书论) … 不善于‘分析’, 往往缺乏逻辑推理、缺乏严密的系统”^[49]. 此外, 整体性的思维也不利于运用科学研究的方法, 因为科学研究总是从复杂的事物中抽象出一系列单纯的、可量化的属性, 例如, 若要科学地描述“千里阵云”这一现象, 则需要描述其中事物和运动的属性——

表 2 传统书论中对笔法运动的描述
Table 2 Description of motion in traditional calligraphy theory

Description	Power	Speed	Resistance
“锥画沙”、“印印泥”、“折钗股”	*	*	*
力透纸背	*	—	—
“每书欲十迟五急, 十曲五直, 十藏五出, 十起五伏, 方可谓书。”—— 东晋 王羲之《书论》	*	*	
“…… 专溺于迟, 终爽绝伦之妙。能速不速, 所谓淹留; 因迟就迟, 诂名赏会! ……”—— 唐 孙过庭《书谱》	—	*	—
“迟涩飞动: 谓勒锋磔笔, 字须飞动, 无凝滞之势, 是得法。”—— 唐 张怀瓘《论用笔十法》	—	*	*
“用笔者皆习润涩笔之说, 然每不知如何得涩。惟笔方欲行, 如有物以拒之, 竭力而与之争, 斯不期涩而自涩矣”—— 清 刘熙载《书概》	*	—	*
“…… 通过结构的疏密、点画的轻重、行笔的缓急, 表现作者对形象的情感, ……”—— 现代 宗白华《中国书法里的美学思想》	*	*	—

物质的类型、构成元素、形状、质量、密度、高度、速度、转动惯量, 并量化地表达出这些属性在运动过程中的变化情况、因果关系, 这正如 H. Poincaré 所说: “凡是不能测量的东西都不能算是自然科学”。因此, 为了引入科学实证的方法, 我们必须从“整体”的思维转换到“分析”、“量化”、“测量”的思维, 从古代积累的大量经验描述中分解出可测量的属性。于是, 我们采取分析的思路去审视古代的书画理论, 对表 1 中论点 1~11 进行分析, 发现它们涉及 4 类感受, 如表 2 第 1 和 3 列所示。下面简介它们的筛选过程。

首先, 传统书法理论和当代的书法美学研究中, 对于书法笔画的运动感受尤为注重。对古代的书论进行总结, 发现有 3 种典型的形容运动的感受: 力量^[50]、速度^[50]、阻力^[51, 52]。表 2 选取了一些古代及近代的书论, 并注明其描述的运动感受, 它们既是在描述书法的技法, 也是在描述书法的观感。于是, 选定三者作为表现“动感”的 3 个感知维度。

然后, 对近年来有关物质感知方面的实验心理学研究^[27~34]进行总结, 并对比表 1 中列举的各种意象描述, 提炼出一系列感知维度, 包括粗糙度^[29~32], 音高^[30, 31], 音量^[31, 32], 音质纯净度^[30], 冷热^[29, 32], 软硬^[29, 32, 34], 重量^[29, 32], 湿润度^[28], 密度^[29], 弹性^[32], 味感: 酸、甜、苦、辣、香^[28, 32]。于是共计选用了 21 个感知维度, 如表 3 第 4 列所示。

对于美学感知实验而言, 选取的感知维度之间最好是独立无关的。为了验证选定的感知维度之间的独立性, 通过百度智能云, 计算了各个维度之间的词义相似性, 统计如表 4, 可以看出各个维度之间词义的相似性普遍较低, 说明选择的这些感知维度具有良好的意义区分度。

4.4 步骤 3 拟物化意象评测实验

本步骤借助理学中的语义差异法^[11], 根据选定的 21 个感知维度, 设计评测量表, 并招募测试者对 15 个“一”进行评测。在正式的实验之前, 由 132 位本科大三学生进行了多种方式的预测试, 基于预实验积累的经验, 并结合寻找到的实验设计的文献, 我们确定了正式实验的方案。

在量表的呈现方面, 采用 VAS (视觉模拟量表) 的形态。测试者在网页上完成评测, 其方式是在一个滑动条上调整滑块的位置, 滑动条左右分别显示对应感受的负面和正面极值。每次评价可得到一个 0~100 之间的评分。这里没有采用 Likert 量表, 原因在于: (1) 已有的研究表明 VAS 与 Likert 的

表 3 意象感知维度整理
Table 3 Sorting out perceptual dimensions of subjective image

Categories of perception	Description	Corresponding arguments in Table 1	Perceptual dimensions	Example of VAS scale description
动感	体现运动的各种感受	1~6, 8~11	力量 (power)、阻力 (resistance)、速度 (fast)	观察下列图片 (从图 4 中随机抽样), 将每个 “一” 想象为一段运动, 感受运动体现的力量, 请将最强的设为 100, 最弱的设为 0, 其余在 0~100 之间
质感, 触感	体现出不同 “物质”	1~6, 8~11 的直观体验	粗糙度 (rough)、湿润度 (humidity)、密度 (density)、硬度 (hardness)、冷热 (hot)、重量 (heavy)、弹力 (elasticity)、锐利度 (sharpness)、韧性 (toughness)、粘稠度 (sticky)	观察下列图片 (从图 4 中随机抽样), 将每个 “一” 想象为一个实体, 感受他体现的粗糙度, 请将最粗糙的设为 100, 最光滑的设为 0, 其余在 0~100 之间
音感	体现发音的特征	1, 4, 6, 7	浑厚度 (vigorous)、音高 (pitch)、清脆度 (clear)	观察下列图片 (从图 4 中随机抽样), 将每个 “一” 想象为它能发音, 感受它的浑厚度, 请将最浑厚的设为 100, 最单薄的设为 0, 其余在 0~100 之间
味感	味觉、嗅觉感受	7	辣 (spicy)、苦 (bitter)、酸 (sour)、甜 (sweet)、香 (fragrant)	观察下列图片 (从图 4 中随机抽样), 想象每个 “一” 都可以吃, 感受它体现的辣味程度, 请将最高的设为 100, 最低的设为 0, 其余在 0~100 之间

效力无显著差异; (2) VAS 量表允许测试者更细致地区分不同对象之间的差异性; (3) 尽管 VAS 量表比 Likert 量表的测试负荷更大, 但我们的实验环境给予测试者充分的时间; (4) 一些研究指出, 涉及语义的测试, VAS 量表比 Likert 量表更有优势^[53], 这也符合相关研究给出的建议^[54]; (5) 在我们的预实验中发现, 对于笔画 “一” 的意象感受而言, VAS 量表的测量结果具有更高的信度. 在量表的呈现方面, 为了避免排列顺序带来的潜在干扰, 运用了随机化的策略; 包括 (1) 感受出现顺序随机化; (2) 15 个 “一” 的排列顺序完全随机化. 为了控制测试负荷, 要求每位测试者只需要评价 7 种感受. 图 5 示意了问卷的流程, 其步骤如下.

- (1) 填写年龄、性别等基本信息.
- (2) 完成一道练习题, 以熟悉测试方式, 该题目中展示 5 件硬度不同的日常物品, 要求以 VAS 量表形式评判其中硬度居中的物品 (塑料桶) 的硬度. 对于该题目的回答情况, 也可作为评判测试者是否明白答题方式的依据.
- (3) 完成 7 轮量表评分 (从 21 种感受中随机抽取 7 种且顺序随机化). 每一轮中, 要求根据引导语分别给 15 个 “一” 评分 (顺序随机化), 表 3 第 4 列示例了量表中的引导语.

表 4 词义相似性 (单位: %)
Table 4 Lexical similarity of the chosen perceptual dimensions (%)

	Fast	Power	Resistance	Rough	Elasticity	Density	Toughness	Sharpness	Hardness	Heavy	Sticky	Hot	Humidity	Vigorous	Clear	Pitch	Bitter	Spicy	Sour	Sweet	Fragrant
Fast	100	9	12	1	10	15	7	-6	13	14	14	19	3	2	6	9	6	-3	-3	7	6
Power	-	100	14	0	7	4	12	1	6	1	4	4	4	4	4	13	8	-3	-5	6	5
Resistance	-	-	100	7	8	14	12	-1	10	13	4	13	5	0	3	11	9	-1	0	5	5
Rough	-	-	-	100	0	9	9	10	4	5	19	5	16	15	8	7	6	5	4	5	2
Elasticity	-	-	-	-	100	8	15	0	12	3	3	9	4	1	2	14	4	2	4	8	9
Density	-	-	-	-	-	100	15	-1	31	16	5	18	3	2	3	10	2	1	2	8	4
Toughness	-	-	-	-	-	-	100	8	37	12	12	12	8	0	7	12	13	-5	4	10	19
Sharpness	-	-	-	-	-	-	-	100	1	0	11	0	8	7	16	4	7	8	1	0	1
Hardness	-	-	-	-	-	-	-	-	100	19	7	20	2	0	3	13	7	-3	2	4	6
Heavy	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100	4	17	2	1	2	11	2	0	-1	3	9
Sticky	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100	3	7	6	10	6	18	2	6	12	6
Hot	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100	3	3	1	18	9	1	2	9	9
Humidity	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100	12	10	4	8	8	11	12	4
Vigorous	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100	15	9	1	2	2	3	6
Clear	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100	13	7	10	7	5	10
Pitch	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100	15	2	1	13	10
Bitter	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100	0	9	43	18
Spicy	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100	11	13	0
Sour	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100	10	5
Sweet	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100	17
Fragrant	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100

(4) 对评测的内容进行回忆. 它包含两道题, 第一题要求从 21 种感受中选出前面 7 页评价过的感受, 第二题是一个 6 选项的多选题, 其中有 3 项为非“一”的书法笔画, 测试者被要求选出之前未出现过的图, 且事先不知道需要进行该测试. 于是, 可以依据测试者能多大程度判断未出现过的内容, 对答卷质量进行人工评判. 由于我们采取在线问卷的形式, 无法直接控制答题环境, 因此需要运用这种质量控制措施, 通过人工审查的方式筛除低质量的答卷, 有效提升数据质量.

4.5 实验数据获取及信度评估

一共招募了 252 位普通群众参与, 经过筛选, 有效问卷为 120 份, 测试者年龄分布于 18~60 岁 ($M = 32.72$, $SD = 7.53$), 性别比例为 Male = 52, Female = 68, 平均而言, 每位测试者需花费 930.67 s 完成测试 ($SD = 535.22$). 对于每个“一”的每一感知维度均获得不少于 40 份有效评分数据.

采取 Cronbach α 系数^[55] 和 KMO 系数^[56] 进行信效度评测. 衡量了两类信效度: (a) 21 种感知维度的评测信度, 即对于一种感知而言, 大家对于 15 个样品的感受排序的一致性和有效性如何? (b) 15 个样品的评测信度, 即对于单个的“一”而言, 大家对它的 21 维感受的分布有多大的一致性? 有效性如何? 对于这两种情况, 要计算 Cronbach α 和 KMO 系数, 需要确定测量的目标概念、题目

图 5 (网络版彩图) 问卷流程
Figure 5 (Color online) Procedures in the questionnaire

图 6 针对 Cronbach α 计算的数据组织方式. (a) 针对 15 个“一”的数据组织; (b) 针对 21 种感知维度的数据组织形式

Figure 6 Data organizations for calculating Cronbach α and (a) the reliability and validity test of 15 ‘Yi’s and (b) the reliability and validity test of 21 perceptions

(scale items) 和观测 (observation). 图 6 示意了二者的区别: 在 (a) 中, 以单个“一”作为目标概念, 将 21 种感知维度作为题目, 一组包含 21 维分值的评测作为一个观测记录. 由于每个参与者实际上只随机评价了 7 个感知, 于是我们以随机重组的方式, 构造包含 21 个评测值的完整观测记录; 在 (b) 中, 以单个感知维度作为目标概念, 将 15 个“一”作为题目, 每组完整的观测包含 15 个评测值. 基于这两种数据组织形式, 得出两类 Cronbach α 和 KMO 系数, 如表 5 和 6 所示. 表中大于 0.6 的都以粗体标记, 这一阈值在通常的探索性实验中被认为具有较好的数据质量. 从结果可见, 实验数据具有良好的质量.

值得指出的是, 足够高的 KMO 指数仅表明实验数据是否具有显著的主因子结构特征, 即适合于主成分分析, 却并不能衡量选取的这些感知维度是否足够“全面”地表征了要测量的实际内容, 也不能说明其隐含的主因子是否匹配于经验理论, 即它不能体现测量的内容效度^[57,58]和结构效度^[59,60]. 这将在后续的 7.1 和 7.2 小节补充分析.

表 5 各个意象感知维度评测结果的 Cronbach α 系数和 KMO 系数
Table 5 Cronbach α and KMO of the experimental data of each perceptual dimension

Perception	Cronbach α	KMO	Perception	Cronbach α	KMO
Power	0.859	0.676	Toughness	0.771	0.583
Resistance	0.865	0.684	Sticky	0.897	0.773
Fast	0.807	0.579	Vigorous	0.881	0.734
Rough	0.889	0.773	Pitch	0.833	0.689
Humidity	0.863	0.669	Clear	0.884	0.780
Density	0.865	0.751	Spicy	0.905	0.778
Hardness	0.855	0.690	Bitter	0.870	0.757
Hot	0.884	0.737	Sour	0.878	0.756
Heavy	0.915	0.808	Sweet	0.934	0.787
Elasticity	0.850	0.724	Fragrant	0.935	0.776
Sharpness	0.768	0.697			

表 6 各个 “一” 评测结果的 Cronbach α 系数和 KMO 系数
Table 6 Cronbach α and KMO of the experimental data of each ‘Yi’

Yi	Cronbach α	KMO	Yi	Cronbach α	KMO
A	0.613	0.522	I	0.649	0.405
B	0.586	0.560	J	0.682	0.445
C	0.609	0.574	K	0.689	0.526
D	0.679	0.402	L	0.452	0.468
E	0.694	0.452	M	0.685	0.510
F	0.664	0.506	N	0.760	0.536
G	0.431	0.352	O	0.525	0.371
H	0.681	0.593			

4.6 21 种感知维度的区分效果检验

表 5 和 6 的信度指标只能衡量评测数据的可靠性, 而不能评价这 21 种感知维度是否能作为有效的测量, 即用它们是否能在 15 个样品上测得显著不同的数值. 于是, 本小节的目标是对选取的 21 维意象感知的区分效果进行检验. 基本思路是, 对 15 个样品在各个感知维度上的感受区分程度进行单因素方差分析, 其结果若是显著的, 则说明 15 个样品在该意象上有显著差异, 于是, 该意象维度是一种 “有效” 的测量. 为此对 21 维感知分别进行单因素方差分析, 结果如表 7 所示. 结果显示, 只有辣、酸、香 3 个维度的显著性不足, 其余 18 个感知维度上 15 个测试样品能产生显著的差异性. 用通俗的语言描述, 即 15 个 “一” 具有显著不同的动态、质感、音感, 而在味感方面差异性略低, 这恰印证了传统书画论著中对于这几类意象的表述频度 (表 3).

5 实验 2—— 笔画的主观差异度评测

5.1 实验设计

本实验对实验 1 中的 15 个样品测量其主观感受, 但不同的是, 其目的是测量这些样品两两之间的主观差异度, 而非它们在特定意象维度上的感受强度. 为此专门开发了一个评测程序, 其评测界面如图 7 所示. 对于每一位测试者, 任务是对随机抽选的样品评价两两之间的主观相似度. 评测界面呈现

表 7 对 21 维感受的单因素方差分析
Table 7 The one-way ANOVA for the 21 perceptual dimensions

Perceptual dimension	SS	df	MS	<i>F</i>	<i>p</i>
Power	130.598	14	9.328	11.651	0.000
Resistance	137.805	14	9.843	12.486	0.000
Fast	143.631	14	10.259	13.180	0.000
Rough	157.740	14	11.267	14.937	0.000
Humidity	57.543	14	4.110	4.441	0.000
Density	38.376	14	2.741	2.860	0.000
Hardness	74.530	14	5.324	5.938	0.000
Hot	68.783	14	4.913	5.421	0.000
Heavy	273.623	14	19.545	35.139	0.000
Elasticity	25.160	14	1.797	1.832	0.031
Sharpness	111.232	14	7.945	9.529	0.000
Toughness	32.734	14	2.338	2.415	0.003
Sticky	61.728	14	4.409	4.801	0.000
Vigorous	206.410	14	14.744	21.969	0.000
Pitch	32.804	14	2.343	2.421	0.003
Clear	43.570	14	3.112	3.278	0.000
Spicy	21.263	14	1.519	1.538	0.093
Bitter	87.059	14	6.219	7.106	0.000
Sour	8.995	14	0.643	0.637	0.835
Sweet	31.688	14	2.263	2.334	0.004
Fragrant	22.148	14	1.582	1.604	0.073

为一个矩阵形式, 左边和下面将展示 9 个随机选出的样品, 但顺序分别做独立的随机化处理. 在实际的测试中, 评价的是“差异度”, 它与“相似度”可看作逆向的关系, 这是考虑到用数值 0 来表示“完全一样”, 比用数值 100 显得更符合一般直觉. 测试者要对每个格子评出 0~100 的分值, 表达主观差异度. 当光标位于矩阵中的一个格子内时, 该格子对应的一对“一”即成为当前评测的对象, 界面右边将放大展示这一对样品, 测试者可通过鼠标点击格子内的“+/-”, 或用键盘快捷键调整评测值. 每位测试者需要完成 81 个评分值, 还未评价的分值显示为 -1, 完成所有评价后, 会在右下方出现“完成”按钮, 测试者可继续点击并完成测试, 或继续调整评价值.

5.2 实验数据获取及信度评估

共 122 位测试者参与了本实验, 均为数字媒体技术专业大三的学生, 其年龄分布于 20~22 岁, 男性人数 56, 女性人数 66. 实验中, 15 个样品两两有序配对一共有 210 种情况 (即 15 选 2 排序), 每一配对可看作一个测试样品. 每位测试者的评测结果应该是一个近似的对称矩阵, 若该矩阵上下两半的相关性低于 0.6, 作为不合格答卷. 经实验, 筛除 6 份不合格答卷, 由此平均每一配对获得 44.7 份有效的相似度评分值 ($SD = 9.43$, $Min = 31$, $Max = 82$).

对于实验数据的信度评估, 我们采用半信度. 由于每人评价了 9 个“一”的所有两两有序配对的相似度, 即对于每一对样品都存在两种顺序的配对方式, 对应于两个相似度评分值. 因此, 可以将对

图 7 (网络版彩图) 两两相似度评测程序
Figure 7 (Color online) Pairwise similarity evaluation program

于同一对“一”两种顺序配对的评价值看作同一问题的两次回答,由此可将结果拆分为两部分,并衡量二者的一致性,作为半分信度。经计算,实验数据的半分信度为 0.676。该结果大于 0.6,说明测试结果的可靠性良好。同时,该结果并不算高 (< 0.8),说明对于“一”相似度的主观评价有较大不确定性,需要相对较多的观测结果,才能保证对总体统计特征估计的准确性。本实验每一配对获得的观测值平均 44.7 份,可以确保良好的估计精度。

6 “千里阵云”的意象空间分析 —— 针对核心问题的统计分析

6.1 问题 1. 书法笔画“一”的意象空间有几维?

对于该问题,采取的统计分析思路是对实验 1 和 2 的数据进行对照分析。一方面,对实验 1 的数据 (矩阵 C) 进行经典的基于 SVD 分解的主成分分析 (principle component analysis, PCA),由此可获知占主导地位的前几个维度;另一方面,对于实验 2 的数据 (矩阵 E),进行经典的基于 QR 分解的多维缩放 (multidimensional scaling, MDS),由此可获知占主导地位的前几维;然后,对比 PCA 和 MDS 的结果,相互印证,解答意象维度的数量问题。

6.1.1 意象评测数据 (实验 1) 的主成分分析

首先对数据进行常规的统计分析。先将原始数据转化到标准分,然后再计算基本统计特征 —— 均值、标准差、4 分位距、极差,筛出异常值,其均值和方差如表 8 所示,然后作出直方图和箱体图 (图 8,即图 2 中的矩阵 C)。从图中可观察到几个大致特征: (1) 15 个“一”在不同感受上都制造出不同的分布,说明它们确实具有各不相同的意象感受; (2) 部分感受的分布差异性明显,例如力量、阻力、速度、粗糙度、重量、锐利度、浑厚度、苦,说明 15 个“一”在这些感受上制造出了显著的多样性和强

表 8 15 个“一”在 21 维感受上的 z 分数均值和标准差Table 8 The mean and standard deviation of the z scores of the 15 ‘Yi’s on the chosen 21 subjective dimensions

		Power	Resistance	Fast	Rough	Elasticity	Density	Toughness	Sharpness	Hardness	Heavy	Sticky	Hot	Humidity	Vigorous	Clear	Pitch	Bitter	Spicy	Sour	Sweet	Fragrant
A	E	0.02	0.02	-0.21	0.33	-0.09	0.04	-0.39	0.23	0.02	0.40	-0.38	0.68	-0.10	0.27	-0.38	-0.14	0.02	-0.24	-0.04	0.04	-0.06
	SD	0.75	0.75	0.74	0.70	0.90	0.80	0.73	0.99	0.84	0.95	0.77	0.87	0.86	0.88	0.81	0.96	0.89	0.89	0.90	0.89	0.92
B	E	-0.25	-0.32	0.19	-0.26	-0.05	-0.24	0.08	0.11	0.11	-0.52	0.15	0.26	0.17	-0.26	0.00	0.07	-0.13	0.16	-0.17	-0.04	0.03
	SD	0.75	0.78	0.77	0.93	0.95	0.77	0.86	0.76	1.04	0.79	0.80	0.93	0.74	1.01	0.88	0.92	0.80	0.93	0.94	0.89	0.89
C	E	-0.37	-0.49	0.03	-0.09	-0.31	-0.33	-0.09	-0.27	0.25	-0.25	-0.33	-0.07	-0.02	-0.38	-0.16	-0.28	-0.15	-0.06	-0.18	-0.17	-0.04
	SD	0.79	0.81	0.75	0.88	0.87	0.70	0.89	0.80	0.90	0.97	0.81	0.86	0.92	0.85	0.84	0.88	0.71	0.85	0.84	0.89	0.91
D	E	-0.54	0.53	-0.81	0.12	-0.18	0.49	-0.51	-0.30	-0.51	1.03	-0.68	-0.32	-0.45	0.45	-0.05	-0.26	0.36	-0.14	0.03	-0.10	-0.11
	SD	0.82	1.06	0.95	1.07	1.08	0.85	1.19	1.18	1.01	0.86	0.93	1.06	1.08	0.98	1.03	1.07	0.90	0.92	1.13	1.08	1.11
E	E	0.50	0.54	-0.40	0.40	0.17	0.93	0.09	0.19	-0.20	0.83	0.25	-0.10	-0.05	0.47	0.05	0.09	0.89	0.30	0.28	0.12	0.11
	SD	1.07	1.05	0.99	1.11	1.11	0.69	0.98	1.10	0.98	0.72	1.10	1.10	1.12	0.94	1.09	1.18	0.70	0.95	0.93	1.08	1.05
F	E	0.51	0.02	-0.38	0.24	-0.24	0.35	-0.07	0.18	-0.04	0.01	-0.48	-0.22	-0.10	0.22	0.04	-0.04	0.19	0.29	0.00	0.25	0.05
	SD	1.07	0.81	0.76	0.78	0.93	0.68	0.81	0.87	0.82	0.80	0.69	0.97	0.90	0.88	1.09	0.94	0.75	0.82	0.91	0.85	0.84
G	E	-0.02	-0.66	0.87	-0.60	0.18	-1.04	-0.04	-0.61	0.43	-0.68	0.78	-0.03	0.46	-0.52	-0.12	-0.14	-0.85	-0.55	-0.31	-0.31	-0.40
	SD	0.82	0.92	0.82	0.89	1.18	0.68	1.06	1.09	1.11	0.93	1.04	1.13	1.11	0.96	1.11	1.19	0.93	1.19	1.02	1.06	1.10
H	E	-0.71	0.06	0.10	0.27	-0.01	-1.09	0.19	0.41	0.02	-0.14	-0.07	0.34	-0.12	0.03	-0.18	0.31	-0.99	0.25	-0.44	0.16	0.11
	SD	0.93	0.78	0.74	0.82	0.85	0.76	0.89	0.91	0.81	0.81	0.81	0.71	1.04	0.99	0.99	0.82	0.80	0.79	0.92	0.91	0.92
I	E	0.02	-0.04	0.26	-0.05	0.17	0.38	0.00	-0.01	0.10	-0.03	0.06	0.48	0.36	0.07	0.21	0.43	0.38	-0.03	0.51	0.29	0.26
	SD	0.79	0.95	0.92	0.94	0.86	0.60	0.90	0.84	0.89	0.88	0.88	0.91	0.79	0.73	0.94	0.76	0.88	0.89	0.82	0.99	0.96
J	E	-0.08	0.97	-0.76	0.31	0.12	0.01	-0.24	-0.06	-0.39	0.84	-0.23	-0.04	-0.16	0.63	0.10	0.05	0.10	0.12	0.21	-0.02	-0.07
	SD	0.97	0.92	1.00	1.17	1.12	0.80	1.27	1.22	1.13	0.88	1.04	1.11	1.21	0.97	1.08	1.13	0.75	1.11	0.84	1.06	1.12
K	E	0.95	0.41	-0.32	0.24	-0.12	0.87	0.11	0.19	-0.22	0.05	-0.47	0.07	-0.16	0.24	-0.07	0.35	0.56	0.08	0.20	0.19	0.26
	SD	0.93	0.80	0.80	0.82	0.95	0.89	0.85	0.81	0.86	0.89	0.71	0.93	0.89	0.91	1.01	0.76	0.90	0.92	1.07	0.94	0.87
L	E	0.37	-0.72	0.26	-0.45	-0.15	-0.91	-0.26	-0.36	0.26	-0.45	0.36	-0.07	0.09	-0.42	-0.07	-0.43	-0.80	-0.54	-0.50	-0.20	-0.25
	SD	0.82	0.75	0.93	0.85	0.97	0.67	1.10	0.98	0.99	0.88	1.07	0.93	0.96	0.96	0.89	1.04	0.85	1.10	0.95	1.01	1.01
M	E	-0.77	0.39	-0.29	0.55	-0.15	0.94	0.26	0.46	-0.15	0.33	-0.38	-0.11	-0.26	0.35	0.22	0.02	0.82	0.50	0.47	0.11	0.23
	SD	0.76	0.87	0.95	0.96	0.96	0.71	0.86	0.85	0.92	0.89	0.87	1.14	1.04	0.94	1.10	0.99	0.69	0.73	0.95	1.06	0.99
N	E	0.35	0.04	0.01	-0.03	0.12	0.46	0.53	0.39	0.14	-0.28	-0.14	0.03	0.09	0.08	0.06	0.03	0.48	0.40	0.31	0.12	0.38
	SD	0.89	0.97	0.96	0.99	0.98	0.69	0.84	0.99	1.03	0.95	0.79	1.08	0.83	0.90	0.90	0.87	0.77	0.90	1.04	0.90	0.96
O	E	0.01	-0.51	0.92	-0.56	0.41	-0.43	-0.30	-0.36	-0.20	-0.37	0.51	-0.13	-0.10	-0.57	0.11	-0.21	-0.63	-0.75	-0.45	-0.35	-0.40
	SD	0.99	0.85	0.97	0.91	1.02	0.77	0.87	0.85	0.92	0.77	0.98	0.83	0.91	0.97	0.91	1.00	0.76	0.92	0.89	1.01	0.91
Expert evaluation		3.86	4.00	4.29	4.00	4.14	4.14	3.00	4.00	3.68	3.14	3.57	3.27	3.41	4.00	4.00	3.29	3.57	3.29	3.71	3.27	3.14

烈的差异性体验; (3) 部分感受的分布差异性模糊, 例如弹力、韧性、粘稠度、辣、酸、甜、香等, 说明 15 个“一”在这些感受方面多样性较低, 差异性体验偏弱; (4) 部分感受的分布具有相似性, 例如速度和音高、力量和浑厚度、阻力和重量等, 说明这些感受之间并非如其语义差异那样符合“正交”关系, 而是具有“通感”的. 图 8 中, 对于每个“一”的每种感知, 即矩阵 C 的每个元素, 还同时展示了评测值的分布直方图. 这些分布大致上符合正态分布, 暗示了实验数据有良好的质量, 且适合采取常规的统计分析方法.

为了验证这些测量值具有良好的效度, 我们邀请了 7 位有长期书法训练的专家来评价测量结果. 每位评测人要在 21 种感受上评价测量结果符合其自身感受的程度, 评分用 5 级制 (1- 很不一致, 5- 高度一致), 评价结果展示在表 8 的最后一行. 由此可见, 评测结果总体上与几位专家的感受是符合的, 但不同的感受维度有不同的表现, 具体而言, 在阻力、速度、锐利度、粗糙度、密度、浑厚度、清脆度几个维度上评测结果与专家感受一致度最高, 在重量、温度、音高、香味、甜味、辣味几个维度上一致度偏低.

为了达到上述目标, 对整理后的实验数据 (即式 (1) 中的矩阵 C) 进行 PCA (主成分分析)^[61], 发现各个维度的贡献率如表 9 所示. 发现大致上可以用 2 种隐含的感知维度概括 21 种感受, 对数据分布的解释程度分别占 65.34% 和 14.27% (二者总共 79.61%), 此外, 第 3 和 4 维也不可忽视, 对数据分

图 8 (网络版彩图) 21 种感受的描述性统计
Figure 8 (Color online) Descriptive statistics of the 21 perceptual dimensions

表 9 PCA 后各个维度的贡献率

Table 9 The contribution of each principle component after PCA

	Total	Contribution rate (%)	Cumulative contribution (%)
1	3.165	65.337	65.337
2	0.691	14.272	79.609
3	0.389	8.032	87.641
4	0.258	5.325	92.967
5	0.112	2.320	95.286
6	0.092	1.896	97.182
7	0.037	0.758	97.940
8	0.028	0.572	98.512
9	0.023	0.480	98.992
10	0.018	0.365	99.356
11	0.014	0.294	99.650
12	0.008	0.167	99.817
13	0.006	0.126	99.943
14	0.003	0.057	100.000

布的解释分别占 8.03% 和 5.33%, 前四维总共占 92.97%.

6.1.2 15 个样品的两两主观差异度评测 (实验 2) 的多维尺度分析

将实验数据做直方图, 如图 9 所示. 图中展示了 15 个样品两两之间的相似度评分的分布, 其中数值越小, 则相似度越大, 数值 0 对应于 “完全一样” 的含义, 数值 100 对应于 “差异极大” 的含义. 其每个格子内的样本均值, 可作为总体均值的最大似然估计.

从图 9 可见, 评测数据接近于对称矩阵, 若取其均值作为矩阵 E (图 3), 计算矩阵的上半部分与

图 9 (网络版彩图) 两两相似度评测数据的描述性统计 (数值越小, 差异度越小)
Figure 9 (Color online) The descriptive statistics of the pairwise similarity evaluation data

表 10 MDS 后各个维度的贡献率
Table 10 The contribution of each dimension after MDS

	Total	Variance of contribution (%)	Cumulative contribution (%)
1	12898.916	39.755	39.755
2	0.691	14.631	54.386
3	0.389	11.915	66.302
4	0.258	11.382	77.684
5	0.112	7.141	84.825
6	0.092	5.661	90.485
7	0.037	4.144	94.629
8	0.028	2.068	96.697
9	0.023	1.367	98.064
10	0.018	1.135	99.199
11	0.014	0.801	100.000

下半部分的相关性, 可得出其皮尔逊 (Pearson) 相关系数为 0.937, 且对角线元素的值基本相等并趋于最小值, 可见该测量结果符合多维缩放对于“相似性度量”数据的基本要求. 采用经典的基于 QR 分解的 MDS 算法^[62] 处理, 可以获得每个样品的一组坐标值, 它们之间两两距离逼近于实验测量的两两相似度度量值. 然后, 对每一维计算其对于总体变异度的贡献率和累计贡献率, 得到表 10 所示结果. 对比表 9 的 PCA 结果可见, 二者有较高的匹配度, 但也有一定差异, 主要在于两方面: 一方面, PCA 和 MDS 结果的前两维均体现了较强的主导性; 另一方面, MDS 结果的次要维度 (第 3~11 维占比接近 46%) 的积累贡献率高于 PCA 结果的次要维度的贡献率 (第 3~14 维占比略低于 21%, 说明实验 2 能够更好地探测出 15 个样品张成意象空间, 但缺点是无法像实验 1 那样探测出具体的可解释的感知维度.

Figure 10 The visualization of the major two-dimensional plane of the results of PCA of experiment 1 and MDS of experiment 2

对于选取的 15 个样品来说, 它们相互之间有不同的相似程度. 而对于选取的 21 种感知维度而言, 虽然表 4 显示各个维度的词义差异较大, 但从一般经验而言, 不同感受词之间有着或多或少的“通感”, 例如, 沉重与缓慢比较一致, 与清脆近乎于相反, 与硬度几乎没有关联; 有韧性的往往具有很高的弹性; 锐利的往往也很硬. 从描述性统计结果 (图 8) 可初略看出不同感受之间的相关性大小, 例如力量与阻力的分布情况高度一致, 与速度近乎相反, 与密度没有明确关联性. 于是, 我们自然希望实验结果能展示样品、感知维度之间的关联性. 本组的几个问题即表述了这些疑问. 要解答它们, 其实就是将量化分析结果与审美经验关联起来, 并对照经典的书法笔画意象理论来讨论, 这实际上与传统基于经验的书法美学研究方法很类似.

从前文的分析可见, PCA 后前两维能够解释接近 80% 的总变异, 因此, 我们尝试将所有样品及意象感知维度在前两维空间中的分布情况可视化地展示出来. 根据坐标值标出 15 个“一”在主成分空间中前两维平面上的不同位置 (A1~O1). 对于 21 维意象感知, 根据主成分载荷确定它们在前两维空间中的方向, 并将其显示长度缩放到适合于展示的程度, 因为其绝对长度无直接意义, 但其两两之间的

长度差表示了它们在前二维主平面上的载荷强度的差异性。

鉴于 MDS 算法输出的结果,其坐标的数值并不具有明确的含义,而两两间的距离才有意义。因此,在可视化时,为了与 PCA 的可视化结果进行更好的比对,我们基于 Procruste Analysis^[63],对 MDS 结果进行了旋转和缩放以匹配 PCA 坐标,它在不改变样本两两之间相对距离的情况下,将样品坐标与 PCA 结果的偏差平方和最小化。由此得到一个新的多维样点集 Z (对应于 15 个“一”),并将其与 PCA 后的主成分空间重叠在同一参考系下,计算每个“一”在两个空间中坐标的距离(高维距离,而非限于二维平面)。为了直观对比 PCA 与 MDS 结果,我们将 Z 前两维坐标投入 PCA 后的主成分空间,即图 10 中的 A2~O2,每个“一”在两个空间中的坐标用一个灰色箭头连接起来,箭头上的数值,表示二者的距离。距离越小,表明该样品在两个空间中匹配得越好,但若距离偏大,则匹配不佳,说明对该样品的意象测量的效力偏低。

基于 PCA 和 MDS 的量化结果及其可视化(图 10),可以对这组问题进行解答。首先,尝试解释主维度的意义。

- 维度 1—质妍。大体上代表了书法理论中探讨最多的风格倾向问题,即孙过庭《书谱》所谓“古质而今妍”中的“质”与“妍”,以及傅山所说的“宁拙毋巧”中“拙”与“巧”;沿该轴向右代表雄浑、率性、朴拙的趋向,其代表的笔画为 E (米芾)、J (颜真卿) 和 M (柳公权);而向左代表妍美、工巧、秀逸的趋向,代表的笔画有 G (宋徽宗) 和 L (钟繇);

- 维度 2—真草(纵轴)。大致上代表书法理论中探讨得较多的书体问题,即孙过庭《书谱》中开篇即谈到的“真”与“草”的区别,换言之即篆、隶、楷、行、草的区别;从直观而言,沿该轴向下则具有规范、沉稳、安静的倾向,代表的笔画有 D (柳公权)、J (颜真卿),这 2 个样品选自经典楷书作品,即《玄秘塔碑》和《多宝塔碑》;沿该轴向上,则具有变通、活泼、动态的倾向,代表的笔画包括 B (褚遂良)、H (苏轼)、I (王羲之) 等,它们选自行书或行楷作品,即《雁塔圣教序》《赤壁赋》《兰亭序》;

上述探讨说明 PCA 得出的两个主维度能够良好地匹配传统书法理论中有关风格的两个命题,即书风与书体,体现测量结果具有良好的结构效度^[59,60]。

此外,还有几个值得探究的现象。维度 1 的贡献远高于维度 2 的贡献,这是否说明书法笔画中质与妍的风格区分是最重要的呢?就目前的实验而言,还不能如此简单地地下结论,主要是因为选用的 15 个“一”仅限于楷书和行书,还未从篆、隶、草等书体中选取测试样品,将来还需要选取更丰富的测试样品来扩展实验。在两个主维度之外,第 3 和第 4 维度的贡献率也不容忽视,其总体贡献率分别为 8.03% 和 5.32%,且 MDS 的结果也提示还有部分未能探明的次要感知维度(表 10),直观而言,即图 10 中的每个笔画严格上还应该分布于不同的“纵深”上,例如, L 与 O 距离很近,即它们在前两个主维度上非常接近,但它们在第 3 和第 4 个维度上有较大差异,它们之间的感官差异有较大程度源于这两个次要的维度。这两个次要维度应该如何解释?是否能对应于传统书法理论中探讨的命题?这都值得进一步研究,需要扩展实验样本进行测试。

除了主维度的意义外,可视化结果直观展示了选用的 15 个测试样品及 21 种意象感知维度的空间关系。从图 10 中 PCA 和 MDS 结果对比可见:

- 不同“一”之间的直线距离,表现了二者之间的感受差异程度,例如, M1 与 G1 分别列于东西两端, I1, I2 与 D1, D2 皆位于上下两极,体现了它们之间有极大的感受差异, AB, FEM 的距离很近,体现了近似的感受;

- 在主成分空间中,沿着每个感受的方向,感受强度增大,例如, G1 体现了最大的速度, D1 有最大的粗糙度;

- 在主成分空间中,感受方向之间的夹角表示了感受的相关性,例如,速度与粗糙近乎于相反(方向

表 11 15 个 “一” 的前四维坐标
Table 11 The major 4 dimensional coordinates of the 15 ‘Yi’s in the principle component space

	F1	F2	F3	F4
A	-1.89	1.72	0.32	0.56
B	-0.96	1.71	-0.63	-0.02
C	-2.12	-0.74	-2.09	1.24
D	1.14	-5.38	-0.15	0.09
E	3.54	-0.51	1.63	0.10
F	1.83	-0.73	-1.31	0.54
G	-5.98	0.98	0.78	0.50
H	0.21	1.75	-1.94	-3.20
I	1.90	3.29	1.89	0.16
J	2.62	-2.48	1.01	-1.04
K	3.12	0.26	-0.61	-0.33
L	-4.62	-0.85	-1.13	0.53
M	4.23	0.15	-0.02	1.17
N	2.10	2.39	-0.08	0.71
O	-5.11	-1.56	2.33	-1.03
Var	10.85	4.72	1.81	1.22
SD	3.18	2.10	1.30	1.07

相反), 力量与重量近似 (方向相近), 粗糙度与韧性近乎无关 (垂直); 但是, 需要注意的是, 这种感受之间的相关性, 不同于词义的相关性 (表 4), 更接近于 “通感” 的含义;

● PCA 和 MDS 结果相比, G, M, N, O 等几个样品的位置差异较大, 暗示着它们在前两个主维度之外的感受还未能充分的探明;

此外, 表 11 为 15 个 “一” 在主成分空间中的坐标; 表 12 为 21 种感受在主成分空间中的载荷. 这些数值即对样品和感受在主成分空间中方位关系的量化.

6.3 问题 3. 维度、距离、角度、面积等空间属性分别对应于书法笔画的何种意象感知特性?

前述讨论可见, 书法笔画的意象空间为欧氏空间, 那么衡量欧氏空间的一些属性, 如维度、距离、内积、角度、体积等, 对应于何种直观的特征呢? 下面分别进行讨论.

● 维度: 表明笔画的意象空间有几个独立的主要特征. 例如图 10 中的两个主轴, 即如前文探讨的两个表达笔画意象的主要维度 —— 质妍、真草;

● 距离: 两个笔画在意象空间内的距离, 表现了二者的意象感受的差异程度. 例如, 图 10 中可见笔画 M (柳公权) 与 G (赵佶) 距离最大, 说明二者在所有 15 个 “一” 中具有最大的意象差异; 而笔画 A (蔡襄) 与 B (褚遂良) 距离很近, 说明二者意象感受比较接近;

● 角度: 对于任意两个感知而言, 它们在意象空间中的角度代表了二者的相关程度. 例如, 图 10 中重量和阻力角度很小, 即说明二者是近似的意象感受; 而重量与硬度接近于垂直, 说明二者近乎于相互独立、无关的两种意象感受; 对于任意两个笔画样本而言, 它们在意象空间中的角度, 代表了二者风格倾向的差异程度, 例如, 图 10 中 F (欧阳询) 与 J (颜真卿) 虽然有一定距离 (即意象差异), 但相对于原点而言它们的角度差异很小, 说明二者具有近似的风格倾向, 皆为偏雄浑一路的; 而对于 B (褚遂

表 12 在前四维中 21 种感受的载荷
Table 12 Load of 21 perceptions in the major 4 dimensional coordinates

	F1	F2	F3	F4
1	0.28	-0.06	0.07	-0.18
2	0.26	-0.15	0.12	-0.2
3	-0.24	0.23	0.15	-0.03
4	0.26	-0.06	0.17	0.32
5	-0.21	0.18	0.33	-0.03
6	0.19	0.25	0.09	-0.35
7	-0.07	0.14	0.59	-0.34
8	0.21	-0.28	0.16	-0.09
9	0.11	0.37	-0.1	0.05
10	0.28	0	-0.14	-0.12
11	0.24	0.13	0.25	0.36
12	-0.04	0.37	0.16	0.21
13	0.2	0.1	0.38	0.17
14	0.28	-0.13	0.03	-0.14
15	0.23	0.2	-0.15	-0.14
16	0.25	0.16	-0.23	0.07
17	0.03	0.37	-0.05	-0.32
18	0.26	-0.03	0.17	0.39
19	-0.18	0.3	-0.16	0.24
20	0.23	0.24	-0.15	-0.04
21	0.23	0.24	-0.15	0.02
Var	0.03	0.03	0.04	0.05
SD	0.17	0.18	0.21	0.22

良) 与 H (苏轼), 它们的距离很小但角度差异却不算小, 说明二者意象感受接近, 但它们的风格倾向却有比较明显的差别;

- 面积/体积: 对于 N 个笔画样品, 在意象空间内可以张成一个凸多边形/多面体, 其面积/体积就代表了这 N 个笔画的意象多样化程度.

7 效度检验

7.1 结构效度

本小节的目的在于, 验证 21 维意象感知的评测结果具有良好的主成分特征, 且其主成分能够与经典理论较好地吻合. 为此, 从两个角度来验证. 其一是将 PCA 的结果与经典的理论进行匹配, 这已经在 6.2 小节中进行了讨论, 即 PCA 后的前两个主维度, 能够与传统书法理论中的“质妍”和“真草”两个维度较好地匹配起来. 其二是对比 PCA 与 MDS 的结果, 二者的主成分特征具有互为验证的特性: 一方面, 从主维度的贡献率占比而言 (表 9 和 10), 前两个维度均占主导, 另一方面, 从 15 个样品在前二维主成分空间中的分布结构 (图 10) 而言, 大体上比较近似, 只有少数样品 (G, M, N, O) 有较

图 11 (网络版彩图) PCA 及 MDS 后各个维度的贡献率和累计贡献率. (a) 各维度贡献率; (b) 累计贡献率

Figure 11 (Color online) The contribution and cumulative contribution of each dimensions produced by PCA and MDS. (a) Contribution per dimension; (b) cumulative contribution of dimensions

大偏差.

7.2 内容效度

本小节的目的在于, 检验实验中以 15 个样品在 21 维意象感知空间中展开的范围, 多大程度能够代表完整的“笔画意象空间”, 即是否达成“测得的数据代表了预期的测量目标——笔画意象空间”. 在以往的研究中, 内容效度通常以专家评定法、复本法、再测法、经验法等方式来评估. 而本文采取的双重实验的框架, 可以将两项实验的结果对比来进行判定.

采取的基本逻辑在于: 假定实验 2 对于“样品主观差异”的测量目标而言, 具有良好的内容效度, 因其直接按这一目标设问. 于是, 当实验 2 的数据具有足够信度, 且数据量充分时, 可以认为其测量的样品主观差异数据能够代表样品张开的意象空间. 因此, 可以将实验 1 数据与其进行对比, 衡量实验 1 数据对于“意象空间”检测的完整性. 在这一基本逻辑下, 采取如下三方面的分析.

第一, 对比实验 1 数据经 PCA 处理及实验 2 数据经 MDS 处理后主维度贡献率的匹配程度. 将表 9 和 10 中的各主维度贡献率及累计贡献率做折线图, 参见图 11. 从图中可观察到, 对于 PCA 的结果而言, 前两维的贡献率接近 80%, 几乎完全占据主导, 而 MDS 后的前两维贡献率占 54%, 虽占据主导但次要维度的贡献率不能忽略. 这也符合预期, 即说明实验 1 中选取的 21 维感知能够较好地代表“笔画意象空间”, 但仍然损失了次要维度的一些信息, 而这些信息在实验 2 中则捕捉到了. 只不过, 实验 2 不能解释这些次要维度的具体含义, 这需要后续实验进一步探索.

第二, 依据矩阵 D 与 E 的相似度, 定量评价实验 1 数据对于“笔画意象空间”检测的完备程度. 矩阵 D 为 15 个笔画在其 PCA 后的主成分空间中的相似性度量矩阵, 其计算方法为: 对实验 1 的 15 个样品评测数据, 转换到主成分空间后, 计算两两之间的距离, 即得到矩阵 D (表 13). 然后, 计算矩阵 D 与 E (两两差异度评测值, 如图 9) 的相似性度量值, 用以衡量实验 1 的数据在“笔画意象空间”中展开的完备程度. 对比表 13 与图 9, 可发现二者具有较高相似度. 采用皮尔逊相关系数计算, 可得出二者相关性为 0.682. 由此可见, 实验 1 中选取的 21 种感知维度, 较大程度地覆盖了 15 个样品的完整意象空间, 但仍有少量缺失.

表 13 在前两个主维度空间中度量 15 个 “一” 的两两距离 ^{a)}

Table 13 The subjective distances between the chosen 15 ‘Yi’s calculated in the 2 major dimensions

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
A	0	6	17	66	64	38	39	10	31	61	50	33	59	37	34
B	6	0	16	62	58	32	44	7	26	56	44	37	54	32	38
C	17	16	0	54	61	34	39	11	37	52	49	26	59	43	27
D	66	62	54	0	39	36	91	56	57	16	41	74	47	58	74
E	64	58	61	39	0	27	100	56	38	23	15	87	11	35	87
F	38	32	34	36	27	0	73	29	21	25	15	60	26	22	60
G	39	44	39	91	100	73	0	45	70	91	87	17	97	76	18
H	10	7	11	56	56	29	45	0	27	51	42	35	52	33	36
I	31	26	37	57	38	21	70	27	0	45	24	62	31	6	63
J	61	56	52	16	23	25	91	51	45	0	26	76	31	45	76
K	50	44	49	41	15	15	87	42	24	26	0	75	11	21	76
L	33	37	26	74	87	60	17	35	62	76	75	0	86	68	2
M	59	54	59	47	11	26	97	52	31	31	11	86	0	26	86
N	37	32	43	58	35	22	76	33	6	45	21	68	26	0	69
O	34	38	27	74	87	60	18	36	63	76	76	2	86	69	0

a) 表中数值已归一化到 [0, 100] 之间, 低于 20 (意象相似) 和高于 80 (差异显著) 的均以粗体标记.

第三, 对于表 13 的计算结果, 进行专家评价, 这是关于内容效度的常用评价方式. 为此, 邀请了 12 位测试者观看表 13, 评价该计算结果与主观感受的一致度, 按 7 级量表进行打分 (1- 非常不符合, 2- 不符合, 3- 有点不符, 4- 不确定, 5- 有点符合, 6- 比较符合, 7- 非常符合), 评级结果为 5.51 (SD = 0.44, $n = 12$), 即前二维体现出的两两之间的意象差异比较符合实际感受, 说明实验 2 有较好的内容效度 [57,58].

此外, 若观察表 13 与图 10, 对每个样品两两间的距离进行对比, 可以获得如下一些直观感受.

- G 与 D/E/J/K/M 间具有显著的差异性, 这恰符合瘦金体 (G) 给我们的 “风格独特” 的直观感受;
- F/K/M 之间差异度较小, 暗示赵孟頫、柳公权、欧阳询在总体上是偏于相似的, 而且这 3 个实验样品也都来自于经典的楷书碑帖, 它们通常都被选作经典的临写的范本;
- A/B/C/H 之间相似度较高, 暗示了蔡襄、褚遂良、黄庭坚、苏轼有近似的取向, 这 4 个样本除了 B 都选自行书, 而 B 也具有较高的行书意味, 可见它们都带有一定的 “尚意” 取向;
- L 与 O, I 与 N 的意象差异很小, 但它们之间的形态差异其实并不小, 这说明其差异在意象空间的前二维上并不能很好地体现出来.

这些直观经验, 与专家评价的分值也比较一致, 再次印证实验数据具有良好的内容效度.

8 相关理论命题的探讨

8.1 笔墨等于零吗?

从本文的数据统计及可视化的结果来看 (图 10), “笔法” 的表现力相当丰富, 其对应的就是张仃 [8] 强调的 “笔性”. 然而, 吴冠中 [7] 的原文是说 “笔墨的 ‘价值’ 等于零”. 什么是 “价值” 呢? 从他在

后续的论述中,可以看出他强调两方面:个性表达及创新.若站在这种价值立场,本文的数据也无法否定吴冠中的主张,甚至在一定程度上支持其主张,例如,F是姚孟起临摹的《九成宫》中的“一”,它有多大程度能体现姚孟起的个性或创新呢?这应该就是吴冠中所说的“价值为零”.由此可见,本文采取的实证方法,并非对“笔墨等于零”达成终极判决,因为它本质上是立场之争,而非正误之争.但本文却也首次以数据证实了张仃谈到的“笔性”问题,即“笔墨”具有丰富表现力.

8.2 引入科学测量,丰富书画理论研究方法

本文的实验提供了一种不同于古代书画理论的视角——测量.通过测量,原本只能模糊表示、因人而异、因时而异的感受,变成了一种可度量的内容.在实测数据的基础上,借助统计学,解决了传统经验式研究的一些局限,如下所述.

- 突破专家的个人经验,体现普通群体的感受;
- 可以借助统计学、机器学习、人工智能等技术(例如本文采用的PCA和MDS),从大量传统经验中发掘潜在的信息,抽象出更精炼的描述方式,例如图10展示的两种潜在的主维度,是凭个人经验难以发现的内容;
- 将审美评价变成了可验证、可证伪的命题,而非因人而异的个人判断.

8.3 实验美学的介入,有助于衔接数字书法与书法理论研究

数字书法将书法的创作工具、视觉艺术效果、书写技巧和创作等用数字化的方式再现^[64].尽管这一领域已经发展了几十年,但其研究成果却很少对当代书法理论及创作产生推动作用.其原因可能是多样的,但不可忽略的是,二者目前关注的主体有所不同:数字书法关注的主体是“计算机”,让计算机实现书法的创作,而书法理论界关注的主体却始终是“人”——通过人的创作,体现人的情性、哀乐.

本文将实验美学的方法引入书法审美领域,有助于衔接数字书法与书法理论.正如文献[64]所述,审美评价始终是数字书法的一个难点,相关研究也非常匮乏,本文提出的测量方法恰有益于开拓这一方向.同时,当具备恰当的审美评价机制后,数字书法涉及的水墨媒介建模、深度学习、图形分析等技术,才可能真正帮助“人”对于书法的认知,而不是用计算机去代替“人”的创作与审美.

8.4 有助于将书法、心理学、数学等学科的教学内容关联起来

本文的研究,可作为线性代数教学中的素材.本文提出的数理模型,将书法笔画的意象感受,与矩阵乘法运算关联起来,首次从书法审美的过程引出矩阵乘法的定义,以一种审美体验活动引出抽象的数学概念,弥补了目前线性代数教材缺乏直观实例引入的问题.在探讨矩阵有关的一些概念时,以本文实验作为案例,使得秩、维度、奇异值、特征值和特征向量、内积等抽象的数学概念,与书法欣赏活动中的直观体验联系起来,既是对现有数学教材缺乏审美体验方面的改进,同时也为书法这门中国独有的技艺增加了其在理工科教育中的用途.本文的实验,属实验心理学范畴,其涉及的心理原理、实验设计方法、统计分析方法等内容,也成为了教学中的直接可用的素材.

9 结论与展望

本文对书法家写的15个“一”进行了意象感知的评测,提炼出关于笔画“一”的意象空间模型,它具有“质妍”与“真草”两个主要的感知维度,不仅验证了书法理论中有关书风和书体的观点,还为科学地研究书法提供了理论基础.诚然,实验存在明显的局限,例如,选取的意象感知维度还未涉及情感和个性,即《书谱》所谓“达其情性、形其哀乐”;选用的15个“一”数量有限,且主要来自楷书及

行书,那么,这极为有限的15个笔画样品张成的意象空间,可以多大程度代表完整的书法笔画的意象空间呢?另外,实验实测的结果(如图8和9所示)中,矩阵的每个元素呈现为近似的正态分布,因此直接对其均值进行处理会遗漏很多信息,而随机矩阵理论^[65]可能挖掘出更丰富的内容,并且有助于确定以有限数量笔画样本估计完整笔画的意象空间的置信度.尽管如此,现有方法得到的意象空间模型,仍然具有良好的代表性,可作为后续研究的基准.更重要的意义在于,本文在书法理论研究中引入了一种新的思想——测量,并设计了一种易于拓展的双实验框架(图2).基于这种思想和实验框架,许多书法理论命题都可以采取实证的方式加以研究,例如,观者能够多大程度地从笔画还原其书写的动作?“间架结构”如何影响意象表现力?笔法和结构孰轻孰重?笔画形态的细节变化如何影响它的意象表现?可以预想,这些问题都可以基于图2的实验框架,通过恰当选取实验样品和感知维度进行量化研究.

书法通常被看作一门艺术,但其实并非必然,它被冠以“艺术”的标签,也就最近百来年的历史.熊秉明^[66]旗帜鲜明地提出:“书法是中国文化核心的核心”,钟家鼎^[67]对书法被归属于“艺术”提出异议,主张“中国书法的本质不是艺术而包容‘艺术’”,即“……通过对中国书法的学习,首先使人领略的是中国传统文化的精神,并事半功倍地旁通诸多艺术门类”.总体而言,这类观点认为书法在古代具有崇高的地位,关键是它能够衔接中国文化的方方面面,其联结的精神文化领域其实是大于“艺术”范畴的.目前书法被归于艺术已成为一种常态,导致学界还未能认识到书法作为一类科学研究对象的重要价值,其科学意义被严重低估.笔者以为,将书法归属于“艺术”,尽管有利于发展其艺术性,但代价也很大:让书法成为以创作出艺术作品为唯一目的的活动,限制了书法与艺术以外学科的交融.再加之其实用性逐渐降低,便逐渐失去了作为精神文化枢纽的地位,愈发成为一门孤立的技艺.目前,极少有人将“书法”本身看作一门交叉学科;在书法的专业刊物上,几乎找不到关于书法的科学研究;在基础学科的刊物上也鲜有以书法作为研究对象的.一个现实的实例是,在笔者进行本项实验研究的过程中,联络过一些艺术院校的书法专业师生参与实验或评估实验结果,其中有的对本项研究的目的和意义感到疑惑,有的甚至认为这是“不正确”的研究方法,虽然这些孤例还未能反映书法专业整体的情况,但也一定程度地警示出当下书法专业或许愈发地走向孤立于其他学科的境地,它与书法在古代被看作体现文人综合素养的交叉学科地位是完全不符的,这是值得警惕和研究的现象.本文的研究将书法审美与心理学、数学关联起来,旨在说明书法本应作为衔接不同学科的一项活动,而非以创作艺术作品为单一目的.重新重视书法的精神文化枢纽功能,将科学思想融入到文化脉络中来,恢复其古之即有的“综合学科”、“交叉学科”的定位,应成为书法的一个重要发展方向.

参考文献

- 1 黄简. 历代书法论文选. 上海: 上海书画出版社, 1979
- 2 郑午昌. 中国画学全史. 江苏: 江苏文艺出版社, 2008
- 3 叶子. 黄宾虹山水画论稿. 上海: 上海人民美术出版社, 2015
- 4 陈振濂. 书法美学. 上海: 上海书画出版社, 2017
- 5 邱振中. 书法的形态与阐释. 北京: 中国人民大学出版社, 2011
- 6 林木. 中国现代绘画的先驱——论刘国松艺术对传统的开拓与创造. 贵州大学学报(艺术版), 2004, 1: 1-12+0-94
- 7 吴冠中. 笔墨等于零. 美术, 2010, 9: 44-45
- 8 张仃. 守住中国画的底线. 艺术探索, 1999, 1: 11-13
- 9 屈菁, 屈健. 从“世纪之辩”看当代笔墨创新. 美术观察, 2016, 9: 120-121
- 10 Liu K. Analysis and research on the dispute between Zhang and Wu in the art circle at the end of 20th century. J Tsinghua Univ (Phil & Soc Sci), 2011, 26: 49-58+156 [刘凯. 二十世纪末美术界“张吴之争”分析与研究. 清华大学学报(哲学社会科学版), 2011, 26: 49-58+156]

- 11 Osgood C E. The Measurement of Meaning. Urbana: UI Press, 1957
- 12 DeCastellarnau A. A classification of response scale characteristics that affect data quality: a literature review. *Qual Quant*, 2018, 52: 1523–1559
- 13 Kang D, Shim H, Yoon K. A method for extracting emotion using colors comprise the painting image. *Multimed Tools Appl*, 2018, 77: 4985–5002
- 14 Amirshahi S A, Hayn-Leichsenring G U, Denzler J, et al. JenAesthetics subjective dataset: analyzing paintings by subjective scores. In: *Proceedings of the European Conference on Computer Vision*. Cham: Springer, 2014. 3–19
- 15 Li C C, Chen T. Aesthetic visual quality assessment of paintings. *IEEE J Sel Top Signal Process*, 2009, 3: 236–252
- 16 Mallon B, Redies C, Hayn-Leichsenring G U. Beauty in abstract paintings: perceptual contrast and statistical properties. *Front Hum Neurosci*, 2014, 8: 161
- 17 Zhang J J, Peng R, Wang J, et al. Computational aesthetic evaluation of Chinese wash paintings. *J Softw*, 2017, 27: 220–233 [张佳婧, 彭韧, 王健, 等. 水墨画计算审美评估. *软件学报*, 2017, 27: 220–233]
- 18 Fan Z B, Zhang K, Zheng X J S. Evaluation and analysis of white space in Wu Guanzhong's Chinese paintings. *Leonardo*, 2019, 52: 111–116
- 19 Wallraven C, Cunningham D W, Rigau J, et al. Aesthetic appraisal of art: from eye movements to computers. In: *Proceedings of Eurographics Workshop on Computational Aesthetics*, Victoria, 2009. 137–144
- 20 Park S A, Yun K, Jeong J. Reappraising abstract paintings after exposure to background information. *Plos One*, 2015, 10: e0124159
- 21 Zhen B F, Li Y N, Yu J, et al. Visual complexity of chinese ink paintings. In: *Proceedings of the ACM Symposium on Applied Perception*, 2017. 1–8
- 22 Guo X, Kurita T, Asano C M, et al. Visual complexity assessment of painting images. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing*, 2013. 388–392
- 23 Yanulevskaya V, Uijlings J, Bruni E, et al. In the eye of the beholder: employing statistical analysis and eye tracking for analyzing abstract paintings. In: *Proceedings of the 20th ACM International Conference on Multimedia*, 2012. 349–358
- 24 Schindler I, Hosoya G, Menninghaus W, et al. Measuring aesthetic emotions: a review of the literature and a new assessment tool. *Plos One*, 2017, 12: e0178899
- 25 Brachmann A, Redies C. Computational and experimental approaches to visual aesthetics. *Front Comput Neurosci*, 2017, 11: 102
- 26 Markovic S. Aesthetic experience and the emotional content of paintings. *Psihologija*, 2010, 43: 47–64
- 27 Fleming R W, Gegenfurtner K R, Nishida S. Visual perception of materials: the science of stuff. *Vision Res*, 2015, 109: 123–124
- 28 Fleming R W, Nishida S, Gegenfurtner K R. Perception of material properties. *Vision Res*, 2015, 115: 157–162
- 29 Martín R, Iseringhausen J, Weinmann M, et al. Multimodal perception of material properties. In: *Proceedings of the ACM SIGGRAPH Symposium on Applied Perception*, 2015. 33–40
- 30 Tiest W M B. Tactual perception of material properties. *Vision Res*, 2010, 50: 2775–2782
- 31 李璞. 感觉 – 视觉、听觉、触觉、嗅觉和味觉. *国外科技动态*, 1998, 9: 24–27
- 32 Yokosaka T, Kuroki S, Watanabe J, et al. Estimating tactile perception by observing explorative hand motion of others. *IEEE Trans Haptics*, 2018, 11: 192–203
- 33 Masuda T, Kimura A, Goto S I, et al. Hardness perception in visual motion: an experimental investigation in penetrating motion (Summaries of Awarded Presentation at the 28th Annual Meeting). *Japan Psychon Sci*, 2016, 29: 77–78
- 34 Masuda T, Matsubara K, Utsumi K, et al. Material perception of a kinetic illusory object with amplitude and frequency changes in oscillated inducer motion. *Vision Res*, 2015, 109: 201–208
- 35 Cox T F, Cox M. Multidimensional scaling. *J R Stat Soc*, 2001, 46: 1050–1057
- 36 Hout M C, Papesh M H, Goldinger S D. Multidimensional scaling. *Wiley Interdiscip Rev Cogn Sci*, 2013, 4: 93–103
- 37 Ekman G. Dimensions of color vision. *J Psychol*, 1954, 38: 467–474
- 38 Papesh M H, Goldinger S D. A multidimensional scaling analysis of own-and cross-race face spaces. *Cognition*, 2010, 116: 283–288
- 39 Godwin H J, Hout M C, Menneer T. Visual similarity is stronger than semantic similarity in guiding visual search for

- numbers. *Psychon Bull Rev*, 2014, 21: 689–695
- 40 Watson D, Clark L A, Tellegen A. Development and validation of brief measures of positive and negative affect: the PANAS scales. *J Pers Soc Psychol*, 1988, 54: 1063–1070
- 41 Huang L, Yang T Z, Ji Z M. Applicability of the positive and negative affect scale in Chinese. *Chin Ment Heal J*, 2003, 17: 54–56 [黄丽, 杨廷忠, 季忠民. 正性负性情绪量表的中国人群适用性研究. *中国心理卫生杂志*, 2003, 17: 54–56]
- 42 Mehrabian A. Framework for a comprehensive description and measurement of emotional states. *Genet Soc Gen Psychol Monogr*, 1995, 121: 339–361
- 43 Mehrabian A. Pleasure-arousal-dominance: a general framework for describing and measuring individual differences in temperament. *Curr Psychol*, 1996, 14: 261–292
- 44 Li X M, Fu X L, Deng G F. Preliminary application of the abbreviated PAD emotion scale to Chinese undergraduates. *Chin Ment Heal J*, 2008, 22: 327–329 [李晓明, 傅小兰, 邓国峰. 中文简化版 PAD 情绪量表在京大学生中的初步试用. *中国心理卫生杂志*, 2008, 22: 327–329]
- 45 Cattell R B. The description of personality: basic traits resolved into clusters. *J Abnormal Soc Psychol*, 1943, 38: 476–506
- 46 Tupes E C, Christal R E. Recurrent personality factors based on trait ratings. *J Personality*, 1992, 60: 225–251
- 47 Walton W E, Bornemeier R W. Color discrimination in rats. *J Comp Psychol*, 1939, 28: 417–436
- 48 Smith R A, Davis S F. *The Psychologist as Detective: An Introduction to Conducting Research in Psychology*. Guo X Y, et al., Trans. Beijing: China Light Industry, 2006 [Smith R A, Davis S F. 实验心理学教程: 勘破心理世界的侦探. 郭秀艳等, 译. 北京: 中国轻工业出版社, 2006]
- 49 Xiong B M. *Theoretical System of Chinese Calligraphy*. Beijing: People's Fine Arts Publishing House, 2017 [熊秉明. 中国书法理论体系. 北京: 人民美术出版社, 2017]
- 50 白砥. 笔法 笔力 线质. *中国书法*, 2008, 12: 84–87+112
- 51 张锴锋. “涩”的笔法原理及对书法线条形质“美”的塑造. *艺术研究*, 2019, 83: 150–151
- 52 崔树强. “用笔宜留更宜涩”——以林散之为例谈“涩”与“留”的笔法观. *书画艺术*, 2008, 5: 29–32
- 53 Funke F, Reips U D. Why semantic differentials in web-based research should be made from visual analogue scales and not from 5-point scales. *Field Methods*, 2012, 24: 310–327
- 54 Hasson D, Arnetz B B. Validation and findings comparing VAS vs. Likert scales for psychosocial measurements. *Int Electron J Health Educ*, 2005, 8: 178–192
- 55 Cortina J M. What is coefficient alpha? An examination of theory and applications. *J Appl Psychol*, 1993, 78: 98–104
- 56 Dziuban C D, Shirkey E C. When is a correlation matrix appropriate for factor analysis? Some decision rules. *Psychological Bull*, 1974, 81: 358–361
- 57 Lynn M R. Determination and quantification of content validity. *Nurs Res*, 1986, 35: 382–385
- 58 Shi J Z, Mo X K. Content validity index in scale development. *J Cent South Univ M*, 2012, 37: 152–155 [史静琤, 莫显昆. 量表编制中内容效度指数的应用. *中南大学学报 (医学版)*, 2012, 37: 152–155]
- 59 Allen N J, Meyer J P. Affective, continuance, and normative commitment to the organization: an examination of construct validity. *J Vocational Behav*, 1996, 49: 252–276
- 60 李灿, 辛玲. 调查问卷的信度与效度的评价方法研究. *中国卫生统计*, 2008, 5: 541–544
- 61 Gilber S. *Introduction to Linear Algebra*. 5th ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2019 [Gilber S. 线性代数. 第 5 版. 北京: 清华大学出版社, 2019]
- 62 Seber G A F. *Multivariate Observations*. Hoboken: John Wiley & Sons, 2009
- 63 Gower J C. Generalized procrustes analysis. *Psychometrika*, 1975, 40: 33–51
- 64 Zhang J S. A survey of ditgital calligraphy. *Sci Sin Inform*, 2019, 49: 143–158 [张俊松. 数字书法研究综述. *中国科学: 信息科学*, 2019, 49: 143–158]
- 65 Livan G, Novaes M, Vivo P. *Introduction to Random Matrices: Theory and Practice*. Berlin: Springer, 2018
- 66 熊秉明. 从书法看中国文化精神. *江苏教育*, 2017, 5: 22–23
- 67 Zhong J D. *Stay with Calligraphy*. Haikou: Hainan Publishing House, 2011 [钟家鼎. 守望中国书法. 海口: 海南出版社, 2011]

Experimental framework to study the subjective materialized image space of horizontal calligraphy strokes

Ruimin LYU^{1*}, Taojie ZHANG¹ & Lilin MEI^{1,2}

1. *School of Artificial Intelligence and Computer Science, Jiangnan University, Wuxi 214000, China;*

2. *Changzhou Zhonglou Foreign Language School, Changzhou 213000, China*

* Corresponding author. E-mail: ruiminlyu@jiangnan.edu.cn

Abstract Calligraphy strokes can create rich, subjective, materialized images. This phenomenon has rarely been studied scientifically. This research proposes a dual experiment framework to investigate this phenomenon and thus construct a mathematical model of its subjective space. In experiment 1, 15 horizontal calligraphic strokes written by famous calligraphers were chosen as stimuli. A total of 21 subjective materialized perceptual dimensions were chosen, a visual analog scale was created, and 252 ordinary people were recruited to evaluate them using the scale. Principal component analysis on the data reveals the following characteristics of the subjective materialized space of the selected strokes. First, it has two dominant dimensions: the main axis corresponds to the style tendency of “vigorous vs. beautiful,” which has been frequently discussed in traditional calligraphy literature, and the sub-main axis corresponds to the style tendency of “regular vs. cursive.” Second, its third and fourth dimensions’ contribution cannot be ignored, and its specific perceptual meaning needs to be further explained. Third, different forms of strokes are distributed in different positions of the space, and different perceptual dimensions correspond to different directions starting from the spatial origin. In experiment 2, each tester was tasked with assessing the subjective differences between the 15 selected strokes utilized in experiment 1. Multidimensional scaling on the data shows a spatial pattern resembling that created by PCA in experiment 1. In addition to confirming the ideas in traditional calligraphy theory, they also offer an expandable mathematical model and experimental framework for empirically studying the aesthetic perception of calligraphic strokes.

Keywords calligraphy, brushstrokes, calligraphic stroke, synesthesia, empirical aesthetics, principle component analysis, multidimensional scaling, data visualization