

识印鉴章：中国书画印章分析系统

贾爱玲¹⁾, 张玮¹⁾, 张建伟¹⁾, 陈为^{1,2)*}

¹⁾ (浙江大学 CAD&CG 国家重点实验室 杭州 310058)

²⁾ (浙江大学艺术与考古图像数据实验室 杭州 310028)
(chenvis@zju.edu.cn)

摘要：印章在中国书画中蕴藏着深厚的文化背景和历史意义，考究印章信息可以了解书画的流传历史，分析印章形态可以辅助专家鉴定印章真伪。为了改进传统书画印章繁琐复杂的研究过程，设计中国书画印章分析系统。首先，针对印章识别准确率，基于台北故宫博物院、人物印鉴数据库等开源数据，通过 YOLOX 检测印章，MoCov3 进行印章匹配，并针对书画场景存在的问题对算法进行改进，最终整体印章匹配准确率相对于原始算法提升 14.87 个百分点。其次，引入 SwinIR 模型对印章进行超分辨率重建，提升印章图像清晰度；最后设计可视分析系统。系统支持书画印章的总体统计数据概览，进行印章匹配结果分析；同时支持单个印章的形态分析及多个印章的横向对比。从整体概览到局部细节进行逐步挖掘，实现对中国书画作品的印章可视分析。此外，邀请四位专家进行系统实际操作并深入访谈，对系统进行效果评估及满意度评分。结果显示总体满意度优于传统分析方法，且通过专家实例研究发现两例实际的疑似印章案例，证明了该系统的有效性和实用性。

关键词：书画印章；图像匹配；目标检测；超分辨率重建；可视分析
中图法分类号：TP391.41 **DOI:** 10.3724/SP.J.1089.2023.2023-00666

Identifying and Authenticating Seals: Chinese Calligraphy and Painting Seal Analysis System

Jia Ailing¹⁾, Zhang Wei¹⁾, Zhang Jianwei¹⁾, and Chen Wei^{1,2)*}

¹⁾ (State Key Lab of CAD&CG, Zhejiang University, Hangzhou 310058)

²⁾ (Laboratory of Art and Archaeology Image, Zhejiang University, Hangzhou 310028)

Abstract: In Chinese calligraphy and painting, seals embody profound cultural and historical significance. Scrutinizing seal information allows for an understanding of the historical transmission of calligraphy and painting, while analyzing seal forms can assist experts in identifying their authenticity. To streamline the intricate and complex traditional research process on seals, a Chinese Calligraphy and Painting Seal Analysis System was developed. Firstly, to enhance the accuracy of seal recognition, utilizing open-source data from the Taipei Palace Museum and the Personal Seal Database, this involved employing YOLOX for seal detection, MoCov3 for seal matching, and refining algorithms to address issues specific to calligraphic and pictorial contexts. Consequently, the overall seal matching accuracy improved by 14.87 percentage points compared to the original algorithm. Subsequently, the SwinIR model was introduced to perform super-resolution reconstruction of the seals, enhancing the clarity of the seal images. Finally, a visual analysis system was designed. This system provides an overview of statistical data for calligraphic and painting seals, conducts analyses of seal matching results, supports the

morphological analysis of individual seals, and facilitates horizontal comparisons of multiple seals. It enables a gradual exploration from the comprehensive overview to specific details, thus enabling visual analysis of seals in Chinese calligraphy and painting. Additionally, four experts were invited to operate the system and engage in in-depth interviews to evaluate the system's effectiveness and satisfaction. The results indicated that overall satisfaction surpassed that of traditional analytical methods. Furthermore, through expert case studies, two instances of suspected counterfeit seals were identified, validating the effectiveness and practicality of the system.

Key words: Chinese seals; image matching; object detection; super-resolution reconstruction; visual analytic

印章是中国书画作品中必不可少的组成部分,蕴藏着深厚的文化背景和文化底蕴。书画作品中的印章包括作者本人的印章、收藏鉴赏人的印章以及题跋人的印章^[1]。考究书画印章的所属人和内容,可以了解到书画的流传递藏历史,更深层次地认识书画背后的故事,如 ScrollTimes^[2]从书画中蕴含的印章等信息生成书画故事传记。现阶段,书画收藏市场中存在大量高仿赝品,为此,基于印章鉴定藏品的真伪成为业内十分重要的方法^[3]。因此,识别书画印章,分析印章形态,不仅可以辅助专家鉴定印章的真伪,且为书画印章工作提供有力支持。

目前,对于书画中印章的识别匹配以及形态分析仍然存在着一些难点和问题:

(1) 印章识别和匹配。识别和匹配印章的难度较高,在海量的资料中通过印章形态匹配印章作者及内容是一个挑战;同时,印章在书画作品中存在背景复杂、缺损、褪色、变色、模糊等问题,增加了专家匹配印章的难度。

(2) 书画递藏。印章在书画中并非按照时间顺序排列,专家希望通过印章鉴藏人看到清晰直观的流传递藏路径。

(3) 印章细节。虽然印章在书画作品中所占的画面较小,但是专家在进行分析和研究时,对印章的清晰度和画面细节有着较高的要求,希望能看到尽可能大且尽可能清晰的印章图片。

(4) 印章对比。印章鉴伪需要进行印章的横向比较,尤其是需要和已知的、确为真迹上的印章进行细节比较。而相同印章出现在哪幅真迹书画中需要专家手工寻找,依赖大量的资料和经验。

面向书画专家,本文提出一个书画印章分析系统。该系统构建了一套有效的印章处理模型,实现对书画印章自动提取并匹配,分析出印章的所属人、印章内容等信息;将提取出来的印章按照时代进行展示,直观展示作品的流传递藏历史;支持对单个印章进行详细分析,查看其超分辨率重建图片;支持对同一印章在多个作品中的图片进行横向比较,

进行印章细节对比。通过从整体到局部的逐步挖掘,专家可以更加全面地了解作品中印章的构成和特征,有助于更好地进行书画印章的分析和鉴定。

1 相关工作

本文从印章目标检测、印章匹配、图像超分辨率重建 3 个方面回顾该领域的工作。

1.1 印章目标检测相关工作

目标检测算法旨在从给定图片中找到特定目标,并标记出目标的类别和位置。基于深度学习的目标检测算法中,两阶段目标检测(如 R-CNN 等)^[4-6]首先获得了较好的检测效果;然后,一阶段目标检测迅速发展,YOLO 系列^[7-11]采用端到端的训练方式,具有更快的速度和更高的实时性能。随着 Transformer^[12]在自然语言处理领域的成功应用,越来越多研究者开始探索将 Transformer 应用于目标检测任务,代表性方法有 DETR^[13], DINO^[14]等。

目前,专门针对书画印章目标检测的算法较少,在书画场景中进行印章目标检测时存在 2 个问题:一是缺乏相关的印章数据集;二是印章场景中邻近印章容易出现误检等。本文收集了书画印章数据集,并针对书画场景,在 YOLOX 目标检测算法的基础上实现书画印章检测。

1.2 印章匹配相关工作

印章匹配需要将书画中的印章与标准印章数据库中的印章进行匹配。Sun 等^[15]以图模型构建为基础,通过提取印章文字骨架作为图模型来匹配对应的印章;SIFT 特征^[16]也被用于提取印章关键特征点^[17],进行印章精准匹配;Wang 等^[18]提出具有多任务学习的孪生神经网络,通过网络学习印章特征进行印章相似性度量。

目前,印章匹配任务存在印章出现背景复杂、缺损等问题。而现存的印章匹配方法要求印章图片有着较高的清晰度和完整性,大部分实际场景中的书画印章难以满足该要求。与现存的方法不同,本

文方法在保证印章匹配效果的基础上, 提升算法在背景复杂、缺损、褪色、变色、模糊等情况下的鲁棒性, 帮助专家匹配难以手工识别的印章。

1.3 图像超分辨率重建相关工作

图像超分辨率重建算法是将低分辨率图片重建为高质量高分辨率图像的算法。近年来, 图像超分辨率重建技术取得了丰富的研究成果, 从早期基于卷积神经网络(convolutional neural networks, CNN)的方法, 如 SRCNN^[19], ESPCN^[20], MDSR^[21]等, 到基于生成对抗网络(generative adversarial networks, GAN)的方法, 如 SRGAN^[22]等, 再到基于注意力机制的 Transformer 的图像超分辨率重建方法, 如 ESRT^[23], SwinIR^[24]等, 重建效果实现了较大提升。

书画印章场景下不仅需要高分辨率的印章图片, 而且要保留印章的细节信息, 避免重建出现不正确的纹理。因此, 本文选择 SwinIR 图像超分辨率重建算法进行印章超分辨率重建, 恢复印章高频细节并减轻模糊瑕疵, 获得更清晰的边缘和更自然的纹理。

2 数据与任务

2.1 数据分析

本文数据从多个数据源中获得: 书画数据来自于台北故宫博物院^①, 包括绘画及书法作品, 共计 13 077 幅, 对这些书画数据中的印章进行分析; 印章标准数据库为浙江省图书馆提供的中国历代人物印鉴数据库^②, 包含人物 2 174 位, 印章数据 35 453 条, 每条印章数据分别包括印章的图片、印章的作者、作者的字号、籍贯、朝代、生卒年、简介以及印章上文字内容等信息。

2.2 任务分析

邀请 4 名书画专家(2 名书画历史学 E_1, E_2 , 2 名书画鉴定专家 E_3, E_4)进行合作。通过对专家进行需求调研, 了解其研究过程中的难点(见引言部分)。本文针对这些问题, 确定可视化系统的设计任务。

T1. 书画印章概览。提取全部印章的统计信息并进行展示, 帮助专家快速了解作品的主题、鉴藏人和对应的印章数量, 做出初步的判断。

T2. 书画印章匹配。按照时间线和作者聚类呈现书画印章的全部匹配结果, 将从作品创作以后、流传到现在的全部印章进行匹配, 并且标注出印章的作者、内容等详细信息。通过匹配结果可以查看书画作品在历史上的流传递藏路径。

T3. 书画印章细节分析。支持对印章进行细节放大查看, 将原始低清晰度印章重建为高分辨率高清晰度印章, 供专家进行细节处研究。支持多个印章细节横向对比查看。

T4. 书画印章对比。查询出该印章在其他书画作品中的图片并进行展示。专家可将原始印章与其他确为真迹的印章进行详细细节比对, 辅助进行印章鉴定工作。

3 数据整合与模型

本文系统数据处理流程如图 1 所示。从数据源中获取绘画及书法作品数据, 进行相应的印章处理。设计可视化视图, 支持对书画印章可视分析。

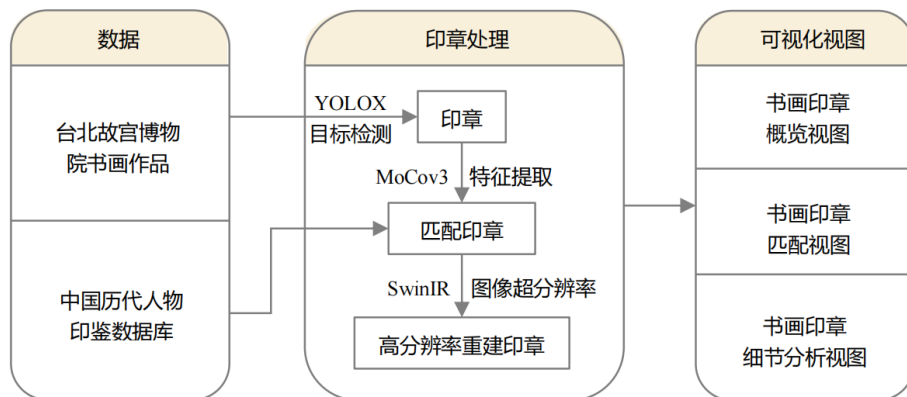


图 1 本文系统数据处理流程图

① <https://digitalarchive.npm.gov.tw/>

② https://www.zjlib.cn/zyszzy/index.htm#searchs_1_div

3.1 印章目标检测

印章目标检测采用 YOLOX 模型, 该模型集成了 YOLO 系列网络的优点, 拥有高效的检测速度和卓越的检测性能.

YOLOX 模型的主干特征提取网络采用 Darknet-53, 并结合 Focus 结构和大量的残差结构提取特征. 加强特征提取网络使用特征金字塔网络, 将高层高语义的特征与低层图片高分辨率的特征进行融合. 检测头使用 3 个解耦头, 通过解耦头将特征平行分成 2 路, 分别进行分类和回归任务. 最后采用 SimOTA 方法求解最优解, 实现准确的印章目标检测.

在书画中, 多个印章通常会聚集性地出现在书画作品中的某一部分(如书画留白部分等). 假设印章 i 的预测框为 $B_i = (x_i, y_i, w_i, h_i)$, 其中, x, y 表示预测框中心点的坐标; w, h 分别表示预测框的宽和高. YOLOX 中的非极大值抑制(non-maximum suppression, NMS)以预测框之间交集和并集的面积比值, 即交并比(intersection over union, IoU)作为抑制条件. 当 2 个相近印章的 IoU 值较大时, NMS 往往会将 2 个印章中的一个预测框抑制, 只留下另一个预测框, 导致相近印章的漏检情况. 针对这种情况, 本文引入距离交并比(distance intersection over union, DIoU)^[25], 在 IoU 考虑预测框面积的基础上, 增加预测框中心点之间的距离进行综合判断, 来减少相近印章的漏检问题. 则惩罚项 R_{DIoU} 的计算过程如图 2 所示, 计算公式为

$$R_{\text{DIoU}} = \frac{\rho^2(b_i, b_j)}{c^2}.$$

其中, $\rho(\cdot)$ 表示欧几里得距离; b_i, b_j 分别表示印章 i 和印章 j 的预测框 B_i 和 B_j 中心点坐标 (x_i, y_i) 和 (x_j, y_j) ; c 表示预测框 B_i 的最小闭包矩形的对角线长度. 则相应的 DIoU-NMS 为

$$s_i = \begin{cases} s_i, & \text{if } \text{IoU} - R_{\text{DIoU}}(M, B_i) < \varepsilon \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}.$$

其中, s_i 表示分类分数; M 表示当前最高分数的预测框; ε 表示 NMS 的阈值. 当 2 个预测框之间的 DIoU 值大于等于阈值时, 说明当前框 B_i 与预测框 M 预测的是同一目标, B_i 被抑制; 否则, 保留当前框 B_i .

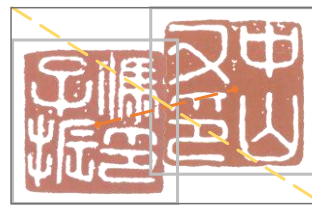


图 2 DIoU 惩罚项计算示意图

印章目标检测数据集共收集书画图片 4 000 张, 标注印章 13 002 个, 将该数据集按照 8:1:1 的比例划分为训练集、验证集和测试集. 由于印章目标检测算法为单类别目标检测, 因此以准确率作为模型效果的评价指标, 原始 YOLOX 算法的准确率为 95.8%, 改进后的准确率为 96.9%. 本节使用书画印章数据集改进相近印章漏检问题, 构建 YOLOX 算法对书画中的印章进行目标检测.

3.2 印章匹配

将从书画作品上检测到的印章作为印章匹配的查询数据集 $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$, 自主收集的标准印章数据集作为印章匹配的待匹配图像库 $G = \{g_1, g_2, \dots, g_m\}$, 通过印章匹配, 从待匹配图像库中找到与书画印章相似度最高的匹配印章. 针对书画场景下印章存在的背景复杂、缺损、褪色、变色、模糊等问题, 结合自监督 MoCov3 算法^[26]的思路, 提取印章的特征向量来寻找相似度最高的匹配印章.

MoCov3 算法由编码器 f_q 和 f_k 这 2 部分组成, 其流程如图 3 所示. 其中, f_q 由主干特征提取网络、投影头和一个额外的预测头组成; f_k 由主干特征提取网络和投影头组成. 假设输入印章数据集中一个 Batch 的图像为 x , 将 x 分别经过 2 种不同的预处理进行数据增强, 得到 x_1 和 x_2 . 训练网络的目标就是使得同一个图片 x 通过 2 种数据增强方式之后, 两者之间的相似性更近. x_1 分别通过 f_q 和 f_k 得到特征 q_1 和 k_1 , x_2 分别通过 f_q 和 f_k 得到特征 q_2 和 k_2 . 通过一个对比损失优化 q_1 和 k_2 , 通过另一个对比损失优化 q_2 和 k_1 . f_q 的参数通过反向传播更新, f_k 由 f_q 的移动平均更新.



图 3 MoCov3 算法流程

在自监督方法中, 图像增强技术对于算法的效

果影响较大. 由于书画印章场景下存在印章背景复杂、缺损、模糊等问题, 本文对 MoCov3 中的图像增强策略进行针对性设计.

书画背景复杂多样, 且会穿插融合在印章之中成为印章的一部分, 加大了印章特征提取和匹配的难度, 并且标准印章数据集 G 中每个印章只有一张图片, 同一样本的丰富度较低. 因此, 本文提出动态替换印章背景进行数据增强.

印章背景数据增强流程如图 4 所示. 使用 Otsu 最大类间方差法^[27]对图像进行二值化处理, 提取原始印章 I_0 的二值化前景部分, 记为 I_c . 从书画数据集中按照印章实际所占的比例进行随机裁剪, 共生成 500 张图片组成印章背景数据集 I_b , 将印章前景图片与背景图片融合, 公式为

$$I_{\text{seal}} = I_c \cdot I_b + I_0 \cdot \bar{I}_c.$$

最终实现动态随机替换印章背景及增加同一印章样本的效果, 实现印章背景的数据增强.

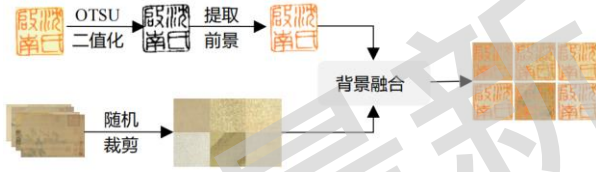


图 4 印章背景数据增强流程

针对书画印章中出现的印章缺损形成残章等问题, 在数据增强时进行印章随机擦除. 假设印章图片 $I_0 \in \mathbb{R}^{W \times H \times C}$, 随机擦除的生成矩形框中心点坐标 (x, y) 采用随机值, 其宽度 $r_{w_0} = W\sqrt{1-\lambda}$, 高度 $r_{h_0} = H\sqrt{1-\lambda}$, 其中, λ 从均匀分布的 $(0,1)$ 中进行采样. 为了防止生成的矩形过大影响效果, 设置自适应缩放因子 β , 当随机擦除的面积比例 μ 过大时会对 β 影响较大, 需要进行调节, 公式为

$$\beta = 1 - \mu^2.$$

其中, $\mu = \frac{r_{w_0} \times r_{h_0}}{W \times H}$. 经过 β 调整之后, 矩形的宽度 $r_w = \beta r_{w_0}$, 高度 $r_h = \beta r_{h_0}$. 最终实现对输入印章进行随机擦除, 增强印章缺损情况下印章特征提取的鲁棒性.

针对书画印章中的褪色、变色问题, 增加颜色抖动, 对印章图片的曝光度、饱和度和色调 HSV 进行随机变换. 针对印章模糊问题, 随机增加高斯滤波. 针对书画印章场景设计数据增强方法, 可以较好地提升印章特征提取的效果.

通过 MoCov3 自监督方法训练得到印章特征提取器 f_θ , 将印章查询图像 s_i 和待查询标准图像 g_i 分别映射为特征向量 $f_\theta(s_i)$ 和 $f_\theta(g_i)$. 计算向量之间的余弦距离比较特征向量的相似性, 通过局部敏感哈希算法^[28]进行快速向量最近邻搜索, 在待查询标准图像库的特征向量中寻找与输入查询图像的特征向量最相似的向量.

将印章图像匹配算法在测试集《鹊华秋色图》上进行实验, 在印章库存在对应匹配印章的情况下, 原始匹配算法的准确率为 71.62%, 本文方法准确率达到 86.49%, 最终整体印章匹配准确率相对于原始算法提升 14.87 个百分点, 提升了书画场景下印章匹配的效果. 进一步, 通过一系列消融实验, 探究本节增加的 4 种数据增强方法(动态背景、随机擦除、颜色抖动、高斯滤波)在印章匹配任务中的有效性. 在本文方法的基础上分别对这 4 种数据增强方法进行去除, 对比其准确率, 实验结果如表 1 所示. 可以看到, 去除数据增强方法会降低本文方法的准确率, 说明 4 种数据增强方法都对模型有提升效果. 针对书画印章场景下印章匹配存在的问题, 结合 MoCov3 无监督方法训练得到一个印章特征提取器, 并搜索相似向量, 最终可以在背景复杂、印章缺损模糊等情况下达到良好的印章匹配效果.

表 1 印章匹配实验结果

方法	准确率/%
原始 MoCov3	71.62
本文方法	86.49
—动态背景	80.40
—随机擦除	82.43
—颜色抖动	81.08
—高斯滤波	83.11

注. “—”表示在本文方法的基础上去除该方法.

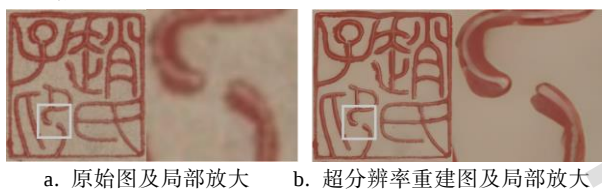
3.3 印章超分辨率重建

在书画印章的研究与应用场景中, 不仅需要高分辨率的图像, 以便精确地捕捉印章的特征, 同时也需要保存印章的微观细节信息, 防止在重建过程中出现不准确的纹理. 因此本文选择 SwinIR 算法进行印章超分辨率重建. SwinIR 算法基于 Swin Transformer^[29], 分为浅层特征提取模块、深度特征提取模块和高分辨率图像重建模块 3 部分, 能够有效地进行印章超分辨率重建.

给定一个低质量印章图像 I_0 , 使用一个 3×3 卷积 H_1 提取浅层特征, 则浅层特征 $F_0 = H_1(I_0)$. 将提取到的浅层特征 F_0 进行深层特征提取; 深层特征提取模块 H_2 由残差 Swin Transformer 模块和一个

3×3 卷积构成,特征图划分为局部窗口,每个 Transformer 块利用多个 Swin Transformer 实现局部注意力机制,则深层特征 $F_1 = H_2(F_0)$;将浅层特征 F_0 和深层特征 F_1 融合,重建高分辨率图片 I_1 ,则 $I_1 = H_3(F_0 + F_1)$,其中, H_3 表示高分辨率图像重建模块。

以“赵氏子昂”印为例,超分辨率重建结果如图 5 所示。原始图片清晰度低、局部放大模糊,而超分辨率重建图片增强了图像的细节表现,改善图像质量。可以看出, SwinIR 算法可以恢复印章高频细节减轻模糊,并产生自然的边缘。本节通过 SwinIR 算法重建出印章的高分辨率图像,便于专家对印章的细节信息进行研究。



a. 原始图及局部放大 b. 超分辨率重建图及局部放大

图 5 印章超分辨率重建效果图

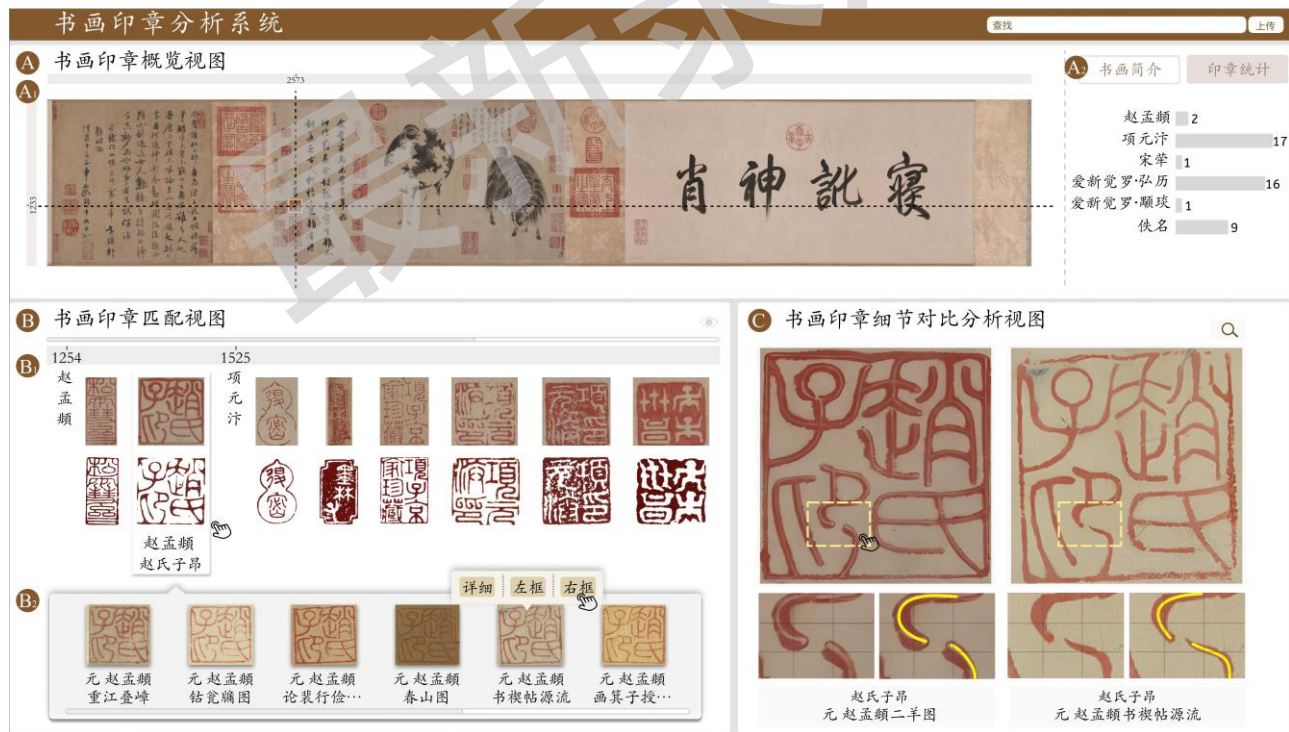


图 6 本文系统界面

A₁ 视图展示书画作品及其印章,并支持用户交互。当专家选中某一印章时,相应印章会被标黄高亮显示,其上方和左方的标尺会显示该印章中心点的坐标;同时, B₁ 视图会联动并跳转到相应的匹配印章,以协助专家进行进一步分析。

A₂ 视图展示印章统计信息。其中,书画简介视图提供作品的相关信息,如作者、类型、尺寸、材

4 书画印章分析系统

基于可视化分析的目标,本文提出一个书画印章分析系统,由书画印章概览视图、书画印章匹配视图和书画印章细节对比分析视图 3 个视图构成。专家首先对书画印章进行概览,了解画作信息和整体印章的统计信息;然后查看时间线上的全部印章匹配结果,了解书画背后的流传递藏路径;再对感兴趣的印章进行形态分析,使用超分辨率重建技术对细节进行放大研究;最后对印章进行横向对比,对细节部分重建印齿骨架,判断是否存在形态差异。通过从整体概览到局部细节的逐步挖掘,完成书画印章的可视化分析。

4.1 书画印章概览视图

本文提出的书画印章分析系统(简称本文系统)界面如图 6 所示。A 视图为书画印章概览视图,旨在展示待分析的书画作品、书画简介信息和印章统计信息,为专家提供概要信息(T1)。

质、主要主题等,帮助专家了解书画背景;印章统计视图通过印章匹配算法计算获得数据,列举出收藏鉴赏过该作品的人物,并通过柱状图显示其留下的印章数量,帮助专家获得书画印章的总体印象。

4.2 书画印章匹配视图

图 6 中的 B 视图为书画印章匹配视图,专家可以在这里查看匹配印章的详细信息。

B₁ 视图将印章提取出来,并将其与匹配图片进

行一一对应展示. 采用时间轴可视化设计^[30-32], 按照印章作者的出生时间先后顺序和印章作者聚类进行展示(T2). B_1 中, 第 1 行图片为书画作品中实际提取出来的印章, 第 2 行对应位置的印章为标准数据库中的匹配印章. 专家可以选择隐藏印章图片, 以更简便直观的方式观察时间线上收藏鉴赏人在该作品上留下的印章及数量, 了解印章背后的流传递藏路径.

专家点击感兴趣的印章, A_1 视图中对应印章位置会高亮显示, 专家可在出现的印章操作栏中进行选择. 印章操作栏的样式如图 7 所示, 分为 5 个按钮: 点击第 1 个“详细”按钮, 可显示该章的详细信息, 如印章内容、作者、籍贯、生卒年等; 点击第 2 个“修改”按钮, 可以修改印章的匹配结果; 点击第 3 个“对比”按钮, 打开对应的印章对比视图, 如 B_2 视图; 点击第 4 个“左框”按钮, 可将印章添加到 C 视图的左侧对比框中; 点击第 5 个“右框”按钮, 将印章添加到 C 视图的右侧对比框中.

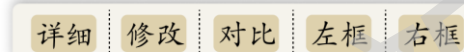


图 7 印章操作栏

通过印章操作栏可进入印章对比视图, 即 B_2 视图, 此视图提供该印章在其他书画作品中出现的印章图片, 并标注对应作品的品名(T4). B_2 视图支持印章操作栏中的“详细”“左框”“右框”3 个按钮, 即支持查看印章详细信息, 支持将印章添加到 C 视图的左、右对比框中.

4.3 书画印章细节对比分析视图

C 视图即为书画印章细节对比分析视图, 提供图像超分辨率重建和印齿骨架重建技术, 支持单印章细节缩放和多印章横向对比, 帮助专家进行细节形态分析(T3, T4). 通过印章操作栏, 可将需要放大或对比的印章添加到该视图中.

C 视图提供印章放大功能, 将鼠标指针悬停在印章图片上可进行基于超分辨率重建技术的局部缩放, 实现更高精度的细节查看. 该视图的 2 个印章即为超分辨率重建后的印章, 有助于专家更好地识别印章中的细节和特征, 从而进行更准确的研究和分析. C 视图支持多印章横向对比, 将待对比印章放入对比框, 专家可以判断两者之间在形态、结构、位置等方面是否存在显著差异. 对细节对比部分进行印齿骨架重建, 采用二值图像细化技术提取出印章图片中的骨架, 还原原始印章中的印齿形状, 使对比效果更加明显. 如 C 视图下方的 4 个矩形所示,

矩形内图像为选定的印章框内图像的放大图, 每个印章对应的左侧图像块为高分辨率放大图片块, 右侧图像块增加了系统重建的印齿骨架. 本文系统辅助专家进行细节对比, 帮助印章鉴伪.

5 实验与结果分析

本文邀请书画研究专家使用所提出的书画印章分析系统, 并通过 2 个系统案例分析展示该系统的实用性和有效性.

5.1 系统案例分析

5.1.1 案例 1: 《二羊图》印章

书画历史学家 E_1 使用本文系统, 自行选择一幅他感兴趣的书画作品《二羊图》进行印章分析, 探索过程如图 6 所示.

(1) 对《二羊图》的信息及其印章进行概览(T1), 通过图 6 中的 A_2 视图印章统计可以看到画作中的印章总体分析数据. 从其中可以发现, 项元汴和弘历留下的印章较多, 作者赵孟頫仅留下 2 个印章.

(2) 查看书画印章的详细匹配信息, 转向 B 视图(T2). B_1 视图在时间线上展示了所有匹配的印章. 专家首先隐藏印章图片, 查看这幅作品的流传递藏路径, 发现这幅作品在 13 世纪由赵孟頫创作出来, 距今已有 700 多年的历史, 被至少 5 人收藏鉴赏过. 该作品被著名收藏家、鉴赏家、在书画界有着较高重要性地位的项元汴所欣赏, 之后被宋荦所鉴赏, 最后收藏在皇室之中, 中国历史上著名的皇帝弘历和颙琰都对其进行了鉴赏, 隐藏图片后的流传递藏路径如图 8 所示.

1254	1525	1634	1711	1760
赵孟頫	项元汴	宋荦	爱新觉罗弘历	爱新觉罗颙琰
2	17	1	16	1

图 8 《二羊图》流传递藏路径

(3) 从作者赵孟頫入手进一步探索这幅作品. 点击赵孟頫的印章“赵氏子昂”, 该引章在视图 A 中高亮显示. 专家提到, 目前对《二羊图》的真伪存在争议, 而鉴定一幅作品的真伪可以通过印章的真伪进行辅助判断. 因此, 专家通过印章操作栏将该印章添加到视图 C 中, 进行深度形态分析(T3). 首先通过印章局部缩放功能进行细节处放大查看, 但由于画作清晰度受限, 放大后细节信息失真, 因此使

用基于印章超分辨率重建技术的缩放功能对印章的细节处进行更高精度的放大,如C视图中的左侧框所示.然后,对细节画面进行深入观察,专家认为“赵氏子昂”印的细节存在一定的问题,需要进一步的对比.点击B₁视图中的“赵氏子昂”印,通过印章操作栏查看其对比视图(T4),如B₂所示.对比视图提供了“赵氏子昂”印在其他作品中出现的图片.专家指出,《元赵孟頫书楔帖源流》、《元赵孟頫瓮牖图》、《元赵孟頫论裴行俭书法》等作品中的“赵氏子昂”印是目前公认的真迹,将《二羊图》中的印章与这些确为真迹的印章对比可以辅助判断印章的真伪.因此,专家选中B₂视图中《元赵孟頫书楔帖源流》中的“赵氏子昂”印放入右侧对比框中,通过超分辨率重建技术查看高清晰度大图(T3),如C视图所示.经对比后专家发现,在“昂”字上,缺口形状与其他

印章形态不符,通过系统重建出的印齿骨架也能发现存在位置差异;同时,其他印章中“氏”字有缺口,或缺口处有缺损,但《二羊图》对应位置过于流畅,有明显的印痕(T4).根据这些细节信息,专家认为《二羊图》中的“赵氏子昂”印极有可能是伪造的.

通过这个案例书画历史学家E₁表示,本文系统的功能完整,流程清晰,为研究作品的流传递藏,辅助印章鉴伪提供了助力,能够辅助完成书画印章研究工作.

5.1.2 案例2:《金武元直赤壁图》印章

书画鉴定专家E₃对赤壁图很感兴趣,因此选择《金武元直赤壁图》进行印章分析,探索流程如图9所示.

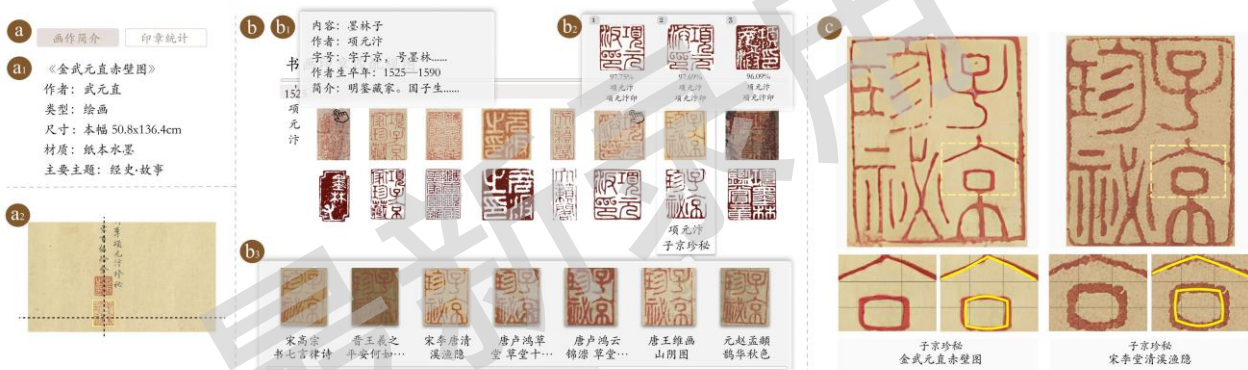


图9 《金武元直赤壁图》探索流程

(1) 查看这幅作品的画作简介(T1). 如a₁视图所展示,这幅画作的主要主题是“经史、故事”,描述了《赤壁赋》中的画面;然后拖动b视图的滚轮,对照匹配好的印章进行仔细研究.专家指出,这幅画存在一些残缺、模糊的印章,而这部分印章往往是手工匹配中最难匹配的部分.

(2) 查看中间模糊印章的匹配结果(T2). 如b₁视图所示,由于书画作品保存等问题导致印章模糊不清,人工难以辨认,本文系统可以将其结果正确匹配.首先点击该印章,通过印章操作栏查看详细信息,显示其为项元汴留下的印章,印章原本是刻着“墨林子”3个字,经过时代的流传,此时仅留下难以辨认的轮廓;然后查看其他的印章发现,项元汴留下的印章“项元汴印”的匹配结果与真实结果虽然非常相似,但仍有些许不同,如b₂视图所示;最后点击该印章,通过印章操作栏对该印章的匹配结果进行修改.本文系统提供与该章相似度最高的前3个印章,根据印章形态,专家手动修改“项元汴印”的匹配结果为相似度第2的印章.

(3) 对b视图进行详细的分析,仔细对比提取出

来的印章和对应的匹配印章(T3, T4),专家表示这幅作品中的大部分印章是项元汴的鉴藏章,应该是项元汴的旧藏书画,但拖尾处的载价题记下的“子京珍秘”印章有些问题.专家点击该印章,a₁视图处此印章高亮.首先通过印章操作栏进入对比视图b₃,并将《金武元直赤壁图》中的印章添加到c视图中的左侧对比框,将《宋李堂清溪渔隐》中的印章添加到右侧对比框(T4);然后对超分辨率重建得到的印章高质量大图进行对比发现(T3),2个印章在“京”字的上半部分有区别;再对该部分进行框选,在下方的矩形框中查看重建的印齿骨架发现,2个“京”字的“宝盖头”和“口”之间的距离、“口”的形状都有着明显的区别,因此该印章极有可能为伪章,通过同样的方式专家发现,“子京珍秘”章上方的“元汴之印”也极有可能为伪章.专家表示,通过系统辅助没有发现其他章存在问题,仅在拖尾处发现这2枚疑似伪章,且疑似伪章的上方有关于书画价值的题字,因此极有可能是后人为了贩卖书画添加的印章.

通过这个案例书画鉴定专家E₃表示,本文系统可以交互式了解印章信息、探索印章真伪,为书画

印章分析提供了较大助力。

5.2 专家反馈

通过对4位专家进行访谈并进行系统实际操作, 验证本文系统的有效性和实用性。对每位专家的访谈持续1h, 前20min用于介绍系统的动机和交互形式, 接下来的30min专家可以自由探索系统, 最后的10min用于对系统进行满意度评分, 评分采用5分制, 分数越高满意度越高。

使用本文系统后, 4名专家均认为, 本文系统对于书画作品工作有着较大的帮助和意义。 E_1 表示, 传统的书画作品的印章匹配需要查阅大量的数据平台和资料, 花费大量时间和精力去识别、整理、匹配和比对印章数据, 效率较低, 尤其是那些模糊、缺损的印章往往难以人工辨认, 而本文系统弥补了这方面的不足, 可以自动提取并匹配印章, 提升了印章研究的效率; E_2 表示, 本文系统可以更直观化地看到书画从诞生以来的收藏鉴赏路径, 为研究作品经手流传提供了考证论据; E_3 表示, 当下印章鉴定需要认真辨别其中细节, 非常需要尽可能大和清晰的图片, 本文系统关注到了这一需求, 对于印章的细节查看有着非常大的助力; 同时, E_3 和 E_4 均表示, 印章鉴伪需要和真迹印章进行细节比对, 本文系统可以找到同一印章出现的多个书画作品, 并且借助高质量图片和重建的印齿骨架对印章进行比对。

在系统的交互使用上, E_1 表示, 点击印章查看相应印章的详细信息是非常方便的, 节省了在找到印章作者后在其他资料中翻阅作者信息的时间; E_2 表示, 在书画印章匹配视图中展开和隐藏印章图片的操作很巧妙, 展开印章图片即可查看全部印章的对应图片, 隐藏印章图片即可留下时间和作者, 查看印章的流传路径; E_3 和 E_4 表示, 将待对比的2个印章放在对比框内, 并增加辅助线对于直观比较印章的形态是非常有效的。

在系统的评估中, 本系统的满意度得分均分为4.5分, 传统方法满意度得分为2分, 结果显示系统总体满意度优于传统分析方法。4位专家都认为本文系统的有效性和实用性较高, 并提出一些建议: E_1 和 E_2 表示, 可以增加更多的书画作品和印章数据, 以扩充系统; E_3 和 E_4 建议, 可将书画作品与其背后的故事联系起来, 在系统中添加对应的书籍或历史数据。

6 结 语

本文系统以印章作者的出生顺序为依据展示书画的流传递藏顺序, 但在作者出生时间相近的情况下, 鉴藏顺序不一定与出生顺序一致, 可能出现部分逆序的情况。未来, 将添加更多关于人物鉴藏时间和人物关系的数据, 对书画的流传递藏进行补充验证。

本文系统提供印章横向对比功能, 通过将印章与确为真迹的印章进行横向对比, 可以对其真伪进行鉴定, 但哪些印章为真迹, 则依赖专家的经验, 且孤本印章难以鉴定。未来, 可以添加相关的数据和书籍, 结合多种文物数据源扩充数据集, 并对确为真迹的印章进行标记。由于印章的构造, 盖章时的力度、印泥厚度等都会对盖出的印章产生影响, 采用自动化方法收集印章之间的区别可能会造成大量的误判, 需要考虑多方面因素。未来, 将进一步探索深度学习方法, 实现对印章间微小差异的自动化准确判定, 进一步降低专家的工作量并提高鉴别效率。

本文针对书画印章场景下存在的问题, 设计印章处理算法完成印章目标检测、印章匹配和印章超分辨率重建, 并在此基础上设计了一个功能完善的中国书画印章分析系统, 辅助专家达到“识印鉴章”的目的。本文系统可以对书画作品中的印章进行提取并匹配、对印章进行超分辨率重建和对比, 同时提供多种交互方式帮助专家进行印章可视分析研究。专家反馈的结果表明, 本文系统可以大大提升专家的效率, 为书画印章研究提供强有力的支持。

参考文献(References):

- [1] Zhu Yaopu. The "Seal" of the calligraphy and painting collection[J]. Art and Design: Theoretical Edition, 2009(3): 212-214(in Chinese)
(朱耀璞. 书画鉴藏中的“印章”[J]. 艺术与设计: 理论, 2009(3): 212-214)
- [2] Zhang W, Kam-Kwai W, Chen Y T, et al. ScrollTimes: Tracing the provenance of paintings as a window into history[OL]. [2024-01-17]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2306.08834>
- [3] Liang Siqi. The role of seal recognition in calligraphy and painting appraisal[J]. Identification and Appreciation to Cultural Relics, 2021(23): 96-98(in Chinese)
(梁斯琪. 解析印章识别对书画鉴定的作用[J]. 文物鉴定与鉴赏, 2021(23): 96-98)
- [4] Girshick R, Donahue J, Darrell T, et al. Rich feature hierarchies for accurate object detection and semantic segmentation[C] // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2014: 580-587
- [5] Girshick R. Fast R-CNN[C] // Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2015: 1440-1448

- [6] Ren S Q, He K M, Girshick R, *et al.* Faster R-CNN: Towards real-time object detection with region proposal networks[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2017, 39(6): 1137-1149
- [7] Redmon J, Divvala S, Girshick R, *et al.* You only look once: Unified, real-time object detection[C] // *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2016: 779-788
- [8] Redmon J, Farhad A. YOLO9000: better, faster, stronger[C] // *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2017: 6517-6525
- [9] Redmon J, Farhad A. YOLOv3: An incremental improvement[OL]. [2023-10-12]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1804.02767>
- [10] Bochkovskiy A, Wang C Y, Liao H Y M. YOLOv4: Optimal speed and accuracy of object detection[OL]. [2023-10-12]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2004.10934>
- [11] Ge Z, Liu S T, Wang F, *et al.* YOLOX: Exceeding YOLO series in 2021[OL]. [2023-10-12]. <https://arxiv.org/abs/2107.08430>
- [12] Vaswani A, Shazeer N, Parmar N, *et al.* Attention is all you need[C] // *Proceedings of the 31st International Conference on Neural Information Processing Systems*. Red Hook: Curran Associates Inc., 2017: 6000-6010
- [13] Carion N, Massa F, Synnaeve G, *et al.* End-to-end object detection with transformers[C] // *Proceedings of the 16th European Conference on Computer Vision*. Heidelberg: Springer, 2020: 213-229
- [14] Zhang H, Li F, Liu S L, *et al.* DINO: DETR with improved De-Noising anchor boxes for end-to-end object detection[OL]. [2023-10-12]. <https://arxiv.org/pdf/2203.03605.pdf>
- [15] Sun B, Hua S J, Li S T, *et al.* Graph-matching-based character recognition for Chinese seal images[J]. *Science China Information Sciences*, 2019, 62(9): 192102
- [16] Lowe D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2004, 60(2): 91-110
- [17] Zhang Na. Automatic matching of seals and character recognition[D]. Xi'an: Xidian University, 2020(in Chinese)
(张娜. 印章的自动匹配与文字识别[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2020)
- [18] Wang Z Y, Lian J, Song C F, *et al.* CSRS: A Chinese seal recognition system with multi-task learning and automatic background generation[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 96628-96638
- [19] Dong C, Loy C C, He K M, *et al.* Image super-resolution using deep convolutional networks[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2016, 38(2): 295-307
- [20] Shi W Z, Caballero J, Huszár F, *et al.* Real-time single image and video super-resolution using an efficient sub-pixel convolutional neural network[C] // *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2016: 1874-1883
- [21] Lim B, Son S, Kim H, *et al.* Enhanced deep residual networks for single image super-resolution[C] // *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops*. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2017: 1132-1140
- [22] Ledig C, Theis L, Huszár F, *et al.* Photo-realistic single image super-resolution using a generative adversarial network[C] // *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2017: 105-114
- [23] Lu Z S, Li J C, Liu H, *et al.* Transformer for single image super-resolution[C] // *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops*. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2022: 456-465
- [24] Liang J Y, Cao J Z, Sun G L, *et al.* SwinIR: Image restoration using swin transformer[C] // *Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision Workshops*. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2021: 1833-1844
- [25] Zheng Z H, Wang P, Liu W, *et al.* Distance-IoU loss: Faster and better learning for bounding box regression[C] // *Proceedings of the 34th AAAI Conference on Artificial Intelligence*. Palo Alto: AAAI Press, 2020: 12993-13000
- [26] Chen X L, Xie S N, He K M. An empirical study of training self-supervised vision transformers[C] // *Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision*. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2021: 9620-9629
- [27] Otsu N. A threshold selection method from gray-level histograms[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1979, 9(1): 62-66
- [28] Indyk P, Motwani R. Approximate nearest neighbors: towards removing the curse of dimensionality[C] // *Proceedings of the Thirtieth Annual ACM Symposium on Theory of Computing*. New York: ACM Press, 1998: 604-613
- [29] Liu Z, Lin Y T, Cao Y, *et al.* Swin transformer: Hierarchical vision transformer using shifted windows[C] // *Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision*. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2021: 9992-10002
- [30] Zhang T Y, Suen C Y. A fast parallel algorithm for thinning digital patterns[J]. *Communications of the ACM*, 1984, 27(3): 236-239
- [31] Zhang Wei, Tan Siwei, Liu Kai, *et al.* A new perspective on the study of literature (Songci): text correlation and spatio-temporal visual analytics[J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2019, 31(10): 1687-1697(in Chinese)
(张玮, 谭思危, 刘凯, 等. 宋词研究的新视角: 文本关联与时空可视分析[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2019, 31(10): 1687-1697)
- [32] Zhang W, Ma Q, Pan R S, *et al.* Visual storytelling of song ci and the poets in the social-cultural context of song dynasty[J]. *Visual Informatics*, 2021, 5(4): 34-40