

## 水墨画计算审美评估<sup>\*</sup>

张佳婧<sup>1</sup>, 彭 韧<sup>2</sup>, 王 健<sup>3</sup>, 于金辉<sup>1</sup>



<sup>1</sup>(CAD&CG 国家重点实验室(浙江大学), 浙江 杭州 310058)

<sup>2</sup>(浙江大学 计算机科学与技术学院, 浙江 杭州 310027)

<sup>3</sup>(浙江大学 教育学院 心理系, 浙江 杭州 310007)

通讯作者: 于金辉, E-mail: jhyu@cad.zju.edu.cn

**摘 要:** 近几年计算审美已成为一个活跃的研究方向,但现有工作主要以照片和油画作为研究对象.水墨画以水墨为主,以颜色为辅来表现物体,因而在视觉特征上与照片和油画有显著不同.提出一个水墨画的计算审美评估框架.该框架首先提取水墨画中的颜色、构图和纹理特征,然后用著名画家齐白石的 60 幅国画作品进行验证.具体先对这些作品进行人工审美评分,然后将计算的特征变量和人工审美评估数据回归得到一个计算审美评估模型.实验结果表明,该模型计算审美评估结果与人工审美评估结果之间的皮尔森相关系数达到 0.949.该工作为水墨画作品审美评估提供了一个参考框架,而且有助于进一步探索人类审美与从水墨画中提取可计算视觉特征之间的关系.

**关键词:** 计算审美;水墨画;特征提取;人工评估;回归分析

中文引用格式: 张佳婧,彭韧,王健,于金辉.水墨画计算审美评估.软件学报,2016,27(Suppl.(2)):220-233. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/16036.htm>

英文引用格式: Zhang JJ, Peng R, Wang J, Yu JH. Computational aesthetic evaluation of Chinese wash paintings. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2016, 27(Suppl.(2)):220-233 (in Chinese). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/16036.htm>

## Computational Aesthetic Evaluation of Chinese Wash Paintings

ZHANG Jia-Jing<sup>1</sup>, PENG Ren<sup>2</sup>, WANG Jian<sup>3</sup>, YU Jin-Hui<sup>1</sup>

<sup>1</sup>(State Key Laboratory of CAD&CG (Zhejiang University), Hangzhou 310058, China)

<sup>2</sup>(College of Computer Science and Technology, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

<sup>3</sup>(Department of Psychology, College of Education, Zhejiang University, Hangzhou 310007, China)

**Abstract:** Computational aesthetics has become an active research area in recent years, but current works mainly focus on aesthetic evaluation of photographs and oil paintings. Chinese wash painting differs significantly from photograph and oil painting in visual features because it uses ink blended with water and a few colors to depict objects. This paper proposes a framework for computational aesthetic evaluation of Chinese wash paintings. The framework first extracts several features in color, composition and texture from Chinese wash paintings, and then uses 60 Chinese paintings by the famous artist Qi Baishi to verify it. Specifically, human ratings of aesthetics are conducted on these paintings and human evaluated aesthetics are regressed on calculated feature variables to obtain the computational aesthetic evaluation model. Experimental results show that the Pearson correlation coefficient between the computational aesthetic evaluation results and human aesthetic evaluation results is 0.949. This paper provides a reference framework for aesthetic evaluation of Chinese wash paintings, and also furthers the understanding of the relationship between human aesthetics and computational visual features extracted from Chinese wash paintings.

\* 基金项目: 国家自然科学基金(61379069); 国家重点科技支撑计划(2014BAK09B04); 国家社会科学基金重大项目(12&ZD231); 浙江省自然科学基金(LG14E050010)

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (61379069); National Key Technologies R&D Program of China (2014BAK09B04); National Social Science Foundation Major Project (12&ZD231); Natural Science Foundation of Zhejiang Province of China (LG14E050010)

收稿时间: 2016-05-10; 采用时间: 2016-09-07

**Key words:** computational aesthetics; Chinese wash painting; feature extraction; human evaluation; regression analysis

“计算审美”是由英语 *computational aesthetics* 翻译过来的,也翻译成“计算美学”。根据《辞海》,美学是指研究人对现实的审美关系的一门科学。美学研究的主要对象是艺术,但它并不研究艺术中的一般问题,而是研究艺术中的哲学问题。在《辞海》中没有收录“审美”条目。根据《现代汉语词典》,审美是指领会事物或艺术品的美。从“美学”和“审美”的权威定义出发,我们在本文采用“计算审美”。根据英语文献<sup>[1,2]</sup>,计算审美是让计算机模拟人类视觉系统和审美思维并自动做出合理审美决策的计算方法研究。近几年来它已经成为一个活跃的研究方向,但大多数工作以照片和油画作为主要研究对象。由于水墨画以水墨为主,颜色为辅来表现物体,因而在视觉特征上与照片和油画有显著不同。目前尚未见到对水墨画的计算审美研究。

水墨画是中国传统绘画中的典型代表,通过水墨相调和笔法变化营造墨色干湿浓淡的层次变化,墨分 5 色,有“如兼五彩”的艺术效果。此外,在审美层次上,水墨画强调阴阳对比均衡,包括虚实、动静、刚柔、疏密、开合和主宾的对比均衡等。不同水墨画家在应用这些审美准则时又形成自己独特的风格。传统的水墨画审美评估只能通过鉴赏专家进行,且评估结果高度依赖专家水平。此外,专家大多数用定性的语言进行评估,因而评估结果具有主观性和一定范围的弹性。

现在互联网中存储大量的水墨画图像,邀请为数不多的高水平专家以人工方式对它们逐一评估是不可能的。如能用计算机高效的对网上大量水墨画进行批量评估,将有助于普通用户更好的理解和欣赏水墨画作品,同时对水墨画高级检索和风格鉴定也有重要意义。

齐白石是我国近代国画家的杰出代表。他的作品以花鸟画为主,包含花卉草虫、蔬菜瓜果、虾蟹鱼蛙和家禽鸟类等类型,图 1 展示了他的 4 幅作品。我们研究用计算机对水墨画进行审美评估的方法,并用齐白石的国画作品进行验证。然而,这项研究工作具有如下几个挑战。

- (1) 齐白石国画作品用色简练单纯,大多数只用 2 种~3 种颜色,少数作品甚至仅用 1 种颜色。尽管颜色少,但作品中的墨迹却有浓淡干湿的丰富变化,墨色交融,颜色对比鲜明。此外画面简洁自然,擅用留白,主体鲜明突出。这些特点使得齐白石国画作品在颜色、构图、纹理上和照片以及油画明显不同,所以现有关于照片和西方油画的计算审美评估架构<sup>[3-13]</sup>并不完全适用于水墨画的计算审美评估。我们需要寻找新的特征变量对水墨画进行评估。
- (2) 虽然有一些关于齐白石国画作品鉴赏的文献<sup>[14-16]</sup>,但它们主要是从作品题材、构图、墨色和造型上用美术专业鉴赏语言分析其艺术特色。我们需要在这些美术鉴赏语言中抽取合适的审美特征并将其转化为可计算的变量。
- (3) 审美活动虽然有个体差异,但在不同个体之间也有共同的审美趋向,否则不会有收藏家购买名家作品,艺术品也不会普通观众心里产生审美共鸣。在本研究工作中,我们需要把计算出来的审美评估结果和普通观众审美评估结果契合。为此,我们需要和心理学交叉结合。



Fig.1 Chinese paintings by Qi Baishi

图 1 齐白石国画作品

为了解决上述问题,我们提出一个水墨画的计算审美评估模型。本文第 1 节回顾计算审美的相关工作。第 2 节介绍水墨画计算审美评估的整体框架。第 3 节~第 5 节详细描述如何构建水墨画的颜色、构图和纹理特征变

量.第6节介绍人工审美评估实验.我们在第7节和第8节介绍回归分析并通过模型性能分析来验证模型的有效性.第9节对我们工作进行了讨论与展望.

## 1 相关工作

计算审美在近几年已成为一个活跃的研究方向,相关的工作主要集中在对艺术作品特别是照片和西方油画进行审美评估.

在照片计算审美研究方面,Ke 等人<sup>[3]</sup>基于简洁性(simplicity)、真实度(realism)和基本摄影技巧提取边缘空间分布、颜色分布、模糊效果等特征来评估照片的审美质量.Wong 等人<sup>[4]</sup>提出一种视觉显著性模型对照片审美进行分类.Obrador 等人<sup>[5]</sup>提出一种基于类别的方法对照片进行审美评估,他们计算了包括清晰度(sharpness)、色度(chroma)、曝光度(exposure)以及不同区域之间的对比特征.王朝晖等人<sup>[6]</sup>通过提取视觉结构、暗通道(dark channel)、亮度和脸部区域局部特征对肖像照片进行美感质量评价.高寒等人<sup>[7]</sup>通过验证风景、人脸、动物等不同类别照片图像在审美标准上的差异性,提出了一种图像预分类的新型图像审美系统.王伟凝等人采用“可计算美学”一词对相关研究进展进行了综述<sup>[8]</sup>.他们还按照低层视觉、高层美学和区域特征类别提取色彩均衡性、景深、颜色矩等特征对摄影图像进行审美分类和评估<sup>[9]</sup>.顾婷婷等人<sup>[10]</sup>提出了一种结合图像景深和构图特征的图像审美质量评价方法.由于水墨画作品中没有照片里的真实度、清晰度、曝光度、景深以及基本摄影技巧因素影响,也没有肖像照片中的人脸面部特征,所以上述的照片计算审美评估方法难以直接应用到水墨画的计算审美评估上.

在西方油画计算审美研究方面,Li 等人<sup>[11]</sup>通过提取颜色分布、亮度、朦胧效果和边缘分布等全局特征,以及分割区域之间的局部对比特征对油画的审美视觉质量进行分类.Amirshahi 等人<sup>[12]</sup>介绍了一种新的油画数据集,并发现颜色特征在评估油画的审美视觉质量方面起到重要作用.Sartori 等人<sup>[13]</sup>通过提取 LAB 颜色空间特征和 SIFT 描述子来区分专业和业余的抽象油画.西方油画色彩丰富,强调光影的表现,而水墨画色彩数量很少,没有光影,更多的是用墨的浓淡干湿变化来表现层次,并且作品中还有留白,在视觉效果上与西方油画有很大不同.因此,我们难以将西方油画审美计算方法照搬到水墨画计算审美中.

还有一些研究工作试图建立艺术作品与计算机视觉之间的关系.Jiang 等人<sup>[17]</sup>通过提取颜色直方图、连续向量、边缘尺寸直方图和纹理特征并结合 SVM 将国画分类为工笔和写意.刘玉清等人<sup>[18]</sup>基于空域和 Gabor 域提取统计特征来区分梵高不同时期的艺术作品风格.吕鹏等人<sup>[19]</sup>对水墨作品的局部技法风格特征进行学习并赋予其他作品相似的“艺术风格特征”.谢菲等人<sup>[20]</sup>利用纹理特征区分木纹、年画和民间剪纸图像.刘晓巍等人<sup>[21]</sup>通过提取色板熵、冗余度、有序度和复杂度等特征来区分中西方作品视觉艺术风格.吴涛等人<sup>[22]</sup>通过提取主题色、色相环、分形维、彩色度等特征来区分不同沙画作品的创作风格.

虽然上述工作的目的不是计算审美,但它们在提取艺术作品中的特征方面对我们很有启示.我们从水墨画作品的特点出发,结合现有的计算审美基础,提出一个水墨画计算审美评估框架.

## 2 水墨画计算审美评估框架

图2显示了我们的计算审美评估框架.我们收集了60幅齐白石作品,构成一个水墨画数据集.对于数据集中的每幅作品,我们提取其颜色、构图和纹理特征构成特征变量集合.然后,我们对水墨画数据集进行人工审美评估,得到评估分数.最后我们按照心理学中常用的线性回归分析方法将特征变量数据和人工审美评估分数回归,得到一个计算审美评估模型.

特征提取在水墨画计算审美评估中最为关键,特征主要集中在颜色、构图和纹理3个方面.我们具体一共提取了29个特征,它们构成一个特征集合  $\Phi = \{f_i | 1 \leq i \leq 29\}$ .需要指出的是,这29个特征只是作为我们计算审美模型的候选变量,经过回归分析后才得到含有较少有效变量的最终模型.下面,我们将介绍这29个特征变量的提取和计算方法.

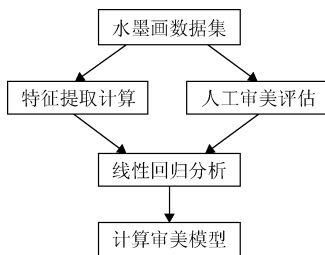


Fig.2 Framework of computational aesthetic evaluation of Chinese wash paintings

图2 水墨画计算审美评估框架

### 3 颜色

在齐白石国画中,物体是通过墨汁和彩色的笔触来表现的,其他部分除了提款和印章外基本是留白.我们用  $I$  表示齐白石的一幅国画图像,  $R_w$  代表留白区域,  $R_b$  代表笔触区域,则有:

$$I = R_w + R_b \tag{1}$$

其中,笔触区域  $R_b$  可以进一步分为墨迹笔触区域  $R_{ink}$  和彩色笔触区域  $R_c$ :

$$R_b = R_{ink} + R_c \tag{2}$$

我们将  $I$  转换成 HSV 颜色空间得到  $I_H, I_S$  和  $I_V$  这 3 个图像,如图 3(b)~3(d)所示.进一步将  $I$  二值化并从中提取白色像素构成  $R_w$ ,黑色像素构成  $R_b$ .根据实验,我们将  $R_b$  中同时满足  $I_S > 0.1$  和  $0.15 < I_V < 0.95$  的像素提取出来,得到  $R_c$ ,其他像素构成  $R_{ink}$ .

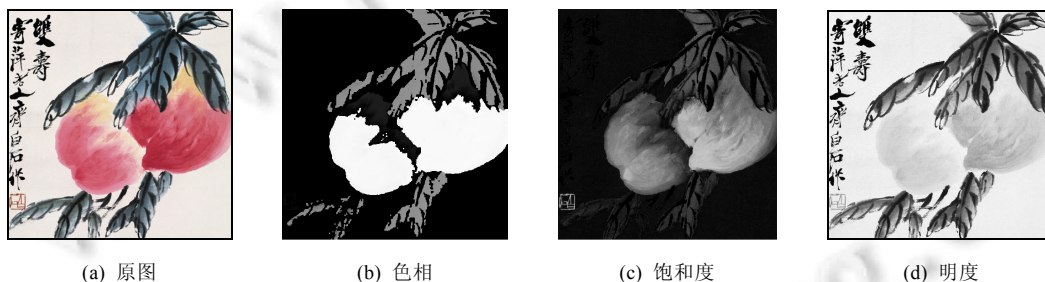


Fig.3 HSV color space

图3 HSV 颜色空间

#### 3.1 色相对比

因为墨迹笔触区域  $R_{ink}$  内没有色彩信息,所以我们只在彩色笔触区域  $R_c$  中(如图 4(a)所示)提取色相特征.考虑到齐白石国画中用色比较少,我们对  $R_c$  中的色相灰度图进行 meanshift 处理<sup>[23]</sup>,得到一个只含 6 个离散分量的图像  $I'_H \in R_c$ ,如图 4(b)所示.这些分量分别对应红、黄、绿、青、蓝、紫 6 个色相,如图 4(c)所示.接下来,我们将  $I'_H$  映射到直角坐标系上,计算 6 个区间上的直方图分布  $h_c$ ,如图 4(d)所示,横轴上从低到高的数字区间分别对应红、黄、绿、青、蓝、紫 6 个色相.

假设  $Q$  是色相带直方图中最高矩形对应的像素频数,我们设定一个阈值  $m \cdot Q$ ,并统计该直方图中所有像素频数大于该阈值的矩形数目作为色相总数,色相总数计算如下:

$$f_1 = \#\{i | h_c(i) > m \cdot Q\}, \quad i = 1, 2, \dots, 6 \tag{3}$$

根据文献[11],  $m$  取 0.1.落入第  $i$  个区间的像素所构成区域记为  $R_c(i)$ ,它代表具有一种色相的笔触区域,显然,  $R_c = \sum R_c(i)$ .我们用  $I'_H(i)$  表示  $R_c(i)$  的平均色相,则彩色笔触区域  $R_c$  内不同色相区域之间最大和平均色相对比计算如下:

$$f_2 = \max\{\min(|I'_H(i) - I'_H(j)|, 360 - |I'_H(i) - I'_H(j)|)\} \quad (4)$$

$$f_3 = \text{mean}\{\min(|I'_H(i) - I'_H(j)|, 360 - |I'_H(i) - I'_H(j)|)\} \quad (5)$$

这里,  $i, j=1, 2, \dots, n$ , 其中  $n$  是满足式(3)的色相区间个数.

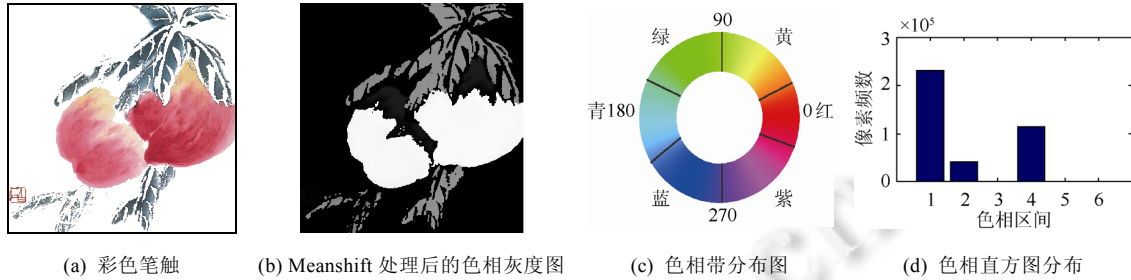


Fig.4 Procedure of hue histogram calculation

图4 色相直方图计算过程

### 3.2 单色与白色背景对比

在齐白石国画中,有的作品采用多种颜色,有的作品只用 1 种颜色,在单色情况下作品没有不同颜色之间的对比,只有单色与白色背景的对比如:在视觉上红色和白色的对比度最大,而青色和白色的对比度最小.我们定义如下色相加权来计算该对比度:

$$f_4 = \frac{\sum ct(I'_H(i)) \cdot A_c(i)}{\sum A_c(i)}, \quad i=1, 2, \dots, n \quad (6)$$

这里,  $ct(I'_H(i))=0.1+0.9 \cdot |1-I'_H(i)/180|$  表示  $I'_H(i)$  在色相环上所对应的对比度,如果  $I'_H(i)$  等于 0,则它对应色相环上的红色,  $ct(I'_H(i))$  等于 1,相应的对比度最大;如果  $I'_H(i)$  等于 180,则它对应色相环上的青色,  $ct(I'_H(i))$  等于 0.1,相应的对比度最小.  $A_c(i)$  表示  $R_c(i)$  的面积,我们用该区域内的像素数量计算.

### 3.3 饱和度和亮度

饱和度指颜色的纯净程度,而亮度指颜色的明暗程度.在计算一幅作品的饱和度和亮度对比时,我们需要同时考虑彩色笔触区域  $R_c(i) \in R_c$  以及墨迹笔触区域  $R_{ink}$ ,共 7 个区域.对于其中第  $i$  个区域,我们用  $I_s(i)$  表示它的平均饱和度,用  $I_v(i)$  表示它的平均亮度,则不同区域之间最大和平均饱和度对比和亮度对比计算如下:

$$f_5 = \max\{|I_s(i) - I_s(j)|\} \quad (7)$$

$$f_6 = \text{mean}\{|I_s(i) - I_s(j)|\} \quad (8)$$

$$f_7 = \max\{|I_v(i) - I_v(j)|\} \quad (9)$$

$$f_8 = \text{mean}\{|I_v(i) - I_v(j)|\} \quad (10)$$

这里,  $i, j=1, 2, \dots, 7$ . 同样地,我们用  $A(i)$  表示第  $i$  个区域的面积,则饱和度加权和亮度加权计算如下:

$$f_9 = \frac{\sum I_s(i) \cdot A(i)}{A(i)}, \quad i=1, 2, \dots, 7 \quad (11)$$

$$f_{10} = \frac{\sum I_v(i) \cdot A(i)}{A(i)}, \quad i=1, 2, \dots, 7 \quad (12)$$

### 3.4 彩色笔触比例

我们用  $A_c$  表示彩色笔触区域  $R_c$  的面积,  $A_b$  表示笔触区域  $R_b$  (参见式(2))的面积,则彩色笔触占整体笔触区域的面积比例为

$$f_{11} = \frac{A_c}{A_b} \quad (13)$$



### 3.5 浓淡对比

在齐白石国画中,墨迹还有焦、浓、重、淡、清的变化,如图 5(a)所示.因为这些变化体现在墨迹的灰度上,我们将原始作品图像的墨迹笔触区域  $R_{ink}$  提取出来,并计算其灰度图像  $I_g$ ,如图 5(b)所示.按照传统“墨分五色”的原则将灰度分为 5 个等级间隔,并计算  $I_g$  在这 5 个灰度区间上的直方图分布  $h_g$ ,如图 5(c)所示.我们把落入前 3 个灰度区间的像素划归为浓墨迹.在全部墨迹中浓墨迹占的面积比例计算如下:

$$f_{12} = \frac{\sum_i h_g(i)}{\sum_j h_g(j)}, \quad i=1,2,3; j=1,2,\dots,5. \quad (14)$$

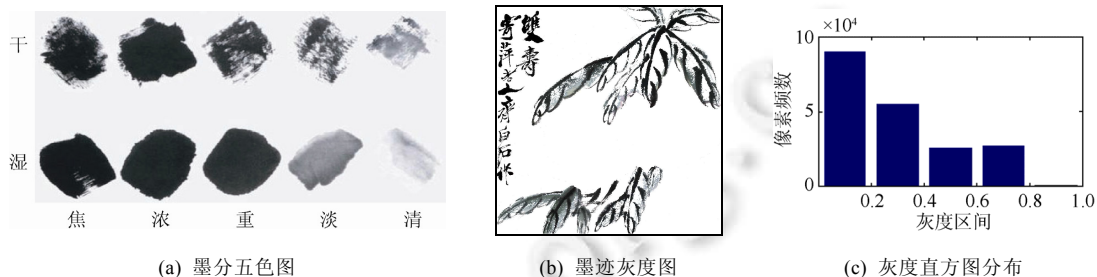


Fig.5 Shading of ink  
图 5 墨迹浓淡

## 4 构图

构图是指将画面中的视觉元素组织起来,构成一个协调完整的画面.我们通过检测画面中的显著性区域来分析画面中各个元素的空间分布结构.我们首先采用 SLIC 超像素分割方法<sup>[24]</sup>将原图像  $I$  分割成若干均匀区域,并将相邻的具有相似颜色直方图的区域合并,如图 6(b)所示.

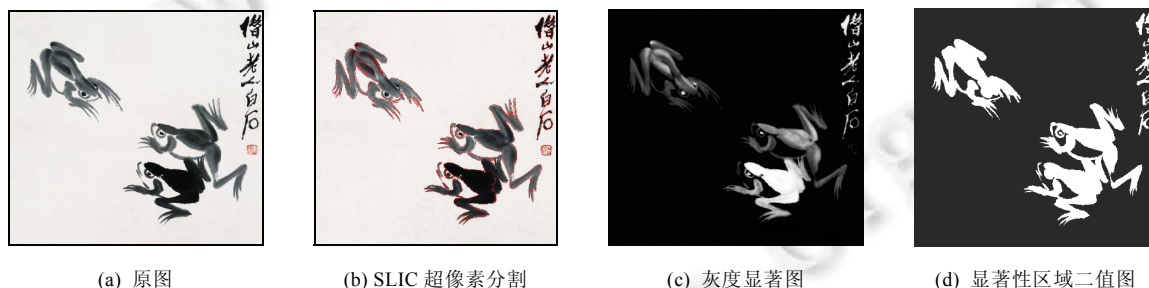


Fig.6 Procedure of salient regions extraction  
图 6 显著性区域提取过程

然后,我们采用 Achanta 等人<sup>[25]</sup>提出的基于频率调谐(frequency-tuned)的方法来计算灰度显著图(saliency map),用  $S_a$  表示,如图 6(c)所示.根据显著图,我们计算整体平均显著值,并提取出平均显著值大于 1.5 倍的整体平均显著值的区域作为显著性区域  $S_i$ ,这里,  $i=1,2,\dots,n_s$ ,其中  $n_s$  代表显著性区域个数,如图 6(d)所示,其中,显著性区域为白色,剩下的区域为黑色.我们分别用  $C(S_i)$ ,  $A(S_i)$ ,  $V(S_i)$  和  $M(S_i)$  表示  $S_i$  的中心、面积、平均显著值和质量,其中  $M(S_i)=A(S_i) \cdot V(S_i)$ <sup>[26]</sup>.在此基础上,我们根据艺术作品中常用的一些构图法则计算如下几个构图特征.

### 4.1 三分线法则

三分线法则(rule of thirds)是一种在艺术作品创作中经常使用的构图手段<sup>[26]</sup>.在该准则中,画面被分割成 9

个等面积区域,如图 7(a)所示.由这些线相交形成的 4 个交叉点是整幅画面的聚焦点,用  $FP_i$  表示,这里  $i=1,2,3,4$ .由画面的中心区域向外进一步延伸构成的矩形区域称为聚焦区域<sup>[11]</sup>,如图 7(a)中的虚线框所示.该准则要求画面中重要的主体元素围绕这 4 个聚焦点或者集中分布在画面的聚焦区域.我们用 Liu 等人<sup>[26]</sup>提出的方法计算三分线准则下所有显著性区域与聚焦点之间的接近程度:

$$f_{13} = \frac{\sum_i M(S_i) \cdot e^{-\frac{D^2(S_i)}{2\sigma_1}}}{\sum_i M(S_i)}, \quad i=1,2,\dots,n_s \quad (15)$$

这里,  $M(S_i)$  是区域  $S_i$  的质量,  $\sigma_1=0.17$ ,  $D(S_i)$  表示区域  $S_i$  中心与 4 个聚焦点的最小距离:

$$D(S_i) = \min d_M(C(S_i), FP_j), \quad j=1,2,3,4 \quad (16)$$

这里,  $d_M$  代表归一化的曼哈顿距离.

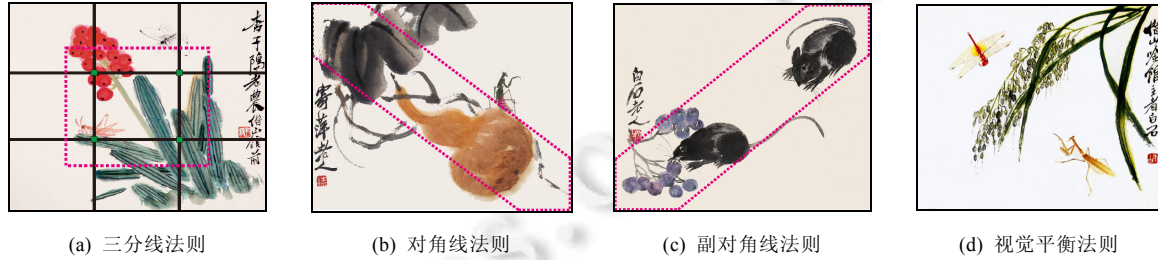


Fig.7 Basic principles of composition and corresponding examples

图 7 基本构图法则和对应的例子

我们将 Sun 等人<sup>[27]</sup>提出的描述人们观察画面时注意力的聚焦程度的注意力聚焦率(RFA)作为  $f_{14}$ :

$$f_{14} = \frac{\sum_{x=1}^W \sum_{y=1}^H Sa(x,y)Mask_1(x,y)}{\sum_{x=1}^W \sum_{y=1}^H Sa(x,y)} \quad (17)$$

这里,  $W$  和  $H$  表示图像  $I$  的宽度与长度,  $Sa(x,y)$  是位置  $(x,y)$  上像素显著度值,  $Mask_1(x,y)$  是聚焦掩码值(如图 7(a)虚线框内部区域所示).

#### 4.2 对角线法则

对角线法则是指画面上主体呈现出一种对角态势,如图 7(b)、图 7(c)所示.我们分别使用文献[28]中的对角线与副对角线掩码  $Mask_2$ (如图 7(b)虚线所围区域所示)和  $Mask_3$ (如图 7(c)虚线所围区域所示)计算得到基于对角线和副对角线掩码的注意力聚焦率<sup>[28]</sup>,以及两者最大值:

$$f_{15} = \frac{\sum_{x=1}^W \sum_{y=1}^H Sa(x,y)Mask_2(x,y)}{\sum_{x=1}^W \sum_{y=1}^H Sa(x,y)} \quad (18)$$

$$f_{16} = \frac{\sum_{x=1}^W \sum_{y=1}^H Sa(x,y)Mask_3(x,y)}{\sum_{x=1}^W \sum_{y=1}^H Sa(x,y)} \quad (19)$$

$$f_{17} = \max(f_{15}, f_{16}) \quad (20)$$

#### 4.3 视觉平衡法则

视觉平衡是画面和谐布局的一个关键因素<sup>[26]</sup>.在一幅满足视觉平衡构图法则的画面中,所有视觉上的显著性区域都均匀地围绕画面中心分布,从而使画面结构对应而平衡,如图 7(d)所示.当一幅画面达到视觉平衡时,画面中所有显著性区域构成的“质心”应该接近画面中心.这里我们采用 Liu 等人<sup>[26]</sup>计算视觉平衡分数的方法来描述所有显著性区域构成的“质心”与画面中心  $C$  的接近程度:

$$f_{18} = e^{-\frac{d_{VB}^2}{2\sigma_2}} \quad (21)$$

这里,  $\sigma_2=0.17$ .  $d_{VB}$  表示所有显著性区域构成的“质心”与画面中心  $C$  的距离:

$$d_{VB} = d_M \left( C, \frac{\sum_i M(S_i) \cdot C(S_i)}{\sum_i M(S_i)} \right), \quad i = 1, 2, \dots, n_s \quad (22)$$

#### 4.4 疏密对比

疏密对比可用《画语录》中的“疏可走马,则疏处不是空虚;密不透风,还得有立锥之地”来形容.意思是,画面疏处要适当放置物体,而密处不能全封闭以至于喘不过气.因为疏密是对画面局部而言,我们根据三分线法则将画面分割成 9 个等面积区域  $G_i(i=1,2,\dots,9)$ ,用  $A(G_i)$  表示  $G_i$  的面积,则疏密对比用笔触区域  $R_b$  在每个  $G_i$  内所占面积比例来计算:

$$f_{18+i} = \frac{A(G_i \cap R_b)}{A(G_i)}, \quad i = 1, 2, \dots, 9 \quad (23)$$

#### 4.5 虚实对比

在国画中,笔触区域  $R_b$  为实,留白区域  $R_w$  为虚.我们用第 3.4 节中定义的变量  $A_b$  表示笔触区域的面积,用  $A_w$  表示留白区域的面积,则虚实对比通过笔触区域占整体画面的面积比例来计算:

$$f_{28} = \frac{A_b}{A_b + A_w} \quad (24)$$

### 5 纹 理

纹理在国画中叫作笔触,用来描绘画面中物体的表面质量.国画作品中纹理的变化源于笔墨与画纸之间接触的力、方向、粗细等因素的变化,其中墨迹的干湿对比是纹理中一个重要的特征.例如,图 8(a)中枫叶用湿墨进行渲染,而叶梗用焦墨进行勾勒,从而使整体画面充满生机.



(a) 湿墨渲染的枫叶与干墨勾勒的叶梗 (b) 通过灰度共生矩阵中的能量特征提取的干墨区域

Fig.8 Dry-Wet contrast

图 8 干湿对比

我们通过计算灰度共生矩阵(GLCM)<sup>[29]</sup>中的能量特征来提取画面中的干墨.能量特征反映了图像灰度分布均匀程度和纹理粗细度,当图像纹理比较细致,灰度分布均匀时,能量值较大,反之则较小.我们将图像分割成  $40 \times 40$  的等面积区域(该尺寸大小的区域能够捕获足够的纹理变化,太大的纹理区域丧失了纹理之间的局部差异).然后计算每个区域的能量值,如果能量值小于 0.3,则该区域为干墨区域,如图 8(b)中的方框所示.所有干墨区域中的落墨像素构成干墨笔触区域  $R_{dry}$ ,而剩下的落墨像素构成湿墨笔触区域  $R_{wet}$ .我们用  $A_{dry}$  表示  $R_{dry}$  的面积,用  $A_{wet}$  表示  $R_{wet}$  的面积,则干湿对比通过湿墨笔触占整体笔触区域的面积比例来计算:



$$f_{29} = \frac{A_{wet}}{A_{dry} + A_{wet}} \quad (25)$$

## 6 人工审美评估

人工审美评估分为两个层次:一个是少数艺术家和鉴赏家的专家级评估,另一个是大众的普通审美评估.虽然大众没有专家那么丰富的人文历史与绘画知识,但在日常生活中积累的审美经验中也有共同的审美趋向.我们通过“谷歌图像搜索”收集了 60 幅齐白石国画作品,如图 9 所示.

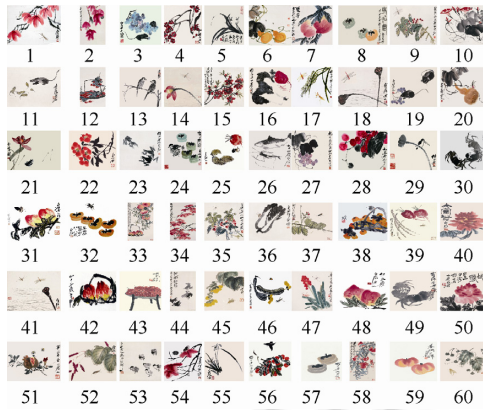


Fig.9 Experimental dataset  
图 9 实验数据集



Fig.10 A page of human evaluation rating  
图 10 人工评估打分页面

我们邀请合适的人员作为测试者,对收集的齐白石国画作品进行人工评估打分.经过咨询心理学家,本科生和研究生已经具备成熟的审美观点,而且用 30 个测试者可以满足常规的心理测试要求.我们邀请 15 个男生和 15 个女生(年龄范围是 18 岁~27 岁,包括工学、理学和医学专业的学生)参加人工评估打分.

我们设计了一个评估打分页面,如图 10 所示.界面上方显示国画作品,每位测试者要求对每幅读入作品的以下几个方面进行评估打分:整体审美、颜色、构图和纹理.整体审美用来描述测试者对作品的整体印象,颜色、构图和纹理分别用来描述测试者对作品中的颜色搭配、物体布局和笔触的感觉.这里,我们采用 5 级量表打分,5(最右侧)代表最好分数,1(最左侧)代表最坏分数.当完成当前作品的打分后,测试者点击“下一个”按钮,界面读入下一幅作品,测试者继续对其进行打分.当测试者对之前的打分不确定时,可以点击“上一个”按钮返回之前的作品,然后重新进行打分.当所有 60 幅作品完成打分后,评估打分结束.每幅作品都有一个四维的数组记录所有测试者的打分结果.

## 7 回归分析

我们用第 3 节~第 5 节介绍的 29 个特征变量对收集的齐白石国画作品进行计算,得到相关数据,然后按照心理学中常用的线性回归分析方法将这些数据和人工审美评估数据进行回归.我们使用国际上常用的统计分析软件 SPSS<sup>[30]</sup>来进行回归分析.我们将图 9 所示的实验数据集中 1 号~30 号图像作为训练集,将 31 号~60 号图像作为测试集,进行 SPSS 线性回归分析.

心理学回归分析中采用的策略是剔除影响较小的变量,保留影响较大的变量.我们把 29 个候选特征变量全部输入到 SPSS 中,并启用变量筛选模块,SPSS 通过 t 检验从 29 个候选变量中自动去掉冗余变量,得到只有 7 个有效变量的回归模型.该模型的整体统计信息见表 1.每个统计量的含义解释如下.

- $R$  方,用来反映用自变量大约可以解释因变量变化的比例.在统计上  $R$  方大于 0.8 的回归模型被认为是强回归模型,小于 0.5 的则为弱回归模型.

- 校正  $R$  方,指加入新变量后  $R$  方的改变量,用来消除  $R$  方中随着自变量数目增加而增大的缺点.我们的审美回归模型在整体上可以解释人类审美评估 88.7%的变化,这说明我们的模型性能非常好.
- 标准误差,代表观测值距离回归线的平均距离.
- $F$ ,指回归均方除以剩余残差均方,该值决定了用于显著性检验的  $Sig.$  值.
- $Sig.$  表示模型的显著性,也称为  $p$  值,当  $p < 0.05$  时,表示模型具有显著性.

回归模型的参数估计信息见表 2,具体含义解释如下.

- 回归系数,指回归模型中的系数.
- 标准误差,代表每个系数对应的标准误差,该变量用来衡量模型对系数值估计的精确性,标准误差越小,估计越精确.
- 标准系数,表示当预测变量和结果标准化后对应的系数.
- $t$  和  $Sig.$ ,也称为  $t$  检验,用于检验每个系数是否具有显著性.表 2 中的 7 个特征变量  $Sig.$  值都小于 0.05,说明它们对模型具有显著性贡献.

**Table 1** Overall goodness of fit for aesthetic regression model

**表 1** 审美回归模型整体吻合度

$R$ 方	校正 $R$ 方	标准误差	$F$	$Sig.$
0.901	0.887	0.222	67.372	0.000

**Table 2** Parameter estimates for aesthetic regression model

**表 2** 审美回归模型参数估计

模型	回归系数	标准误差	标准系数	$t$	$Sig.$
常量	0.876	0.162	-	5.411	0.000
$f_{18}$	0.875	0.135	0.412	6.473	0.000
$f_4$	0.607	0.121	0.322	5.032	0.000
$f_{17}$	0.701	0.150	0.283	4.670	0.000
$f_{23}$	0.488	0.127	0.205	3.849	0.000
$f_{29}$	0.534	0.147	0.188	3.642	0.001
$f_{11}$	0.369	0.122	0.201	3.035	0.004
$f_9$	0.330	0.159	0.094	2.078	0.043

## 8 计算审美模型性能分析

本节对回归分析得到的计算审美模型性能做进一步的分析.

### 8.1 模型系数大小

我们用表 3 列出表 2 中 7 个变量的特征描述.

**Table 3** Feature variables in computational aesthetic model

**表 3** 计算审美模型中的特征变量

特征	特征描述	类别
$f_{18}$	视觉平衡分数	构图
$f_4$	色相加权	颜色
$f_{17}$	对角线和副对角线掩码的注意力聚焦率最大值	构图
$f_{23}$	中心区域笔触所占比例	构图
$f_{29}$	湿墨笔触占笔触面积比例	纹理
$f_{11}$	彩色笔触占笔触面积比例	颜色
$f_9$	饱和度加权	颜色

我们把对应表 2 的回归模型写成公式形式:

$$C_a = 0.875f_{18} + 0.607f_4 + 0.701f_{17} + 0.488f_{23} + 0.534f_{29} + 0.369f_{11} + 0.330f_9 + 0.876 \quad (26)$$

公式中的变量系数就是表 2 中的回归系数,它们反映了每个变量对总体审美评估的影响大小.我们按照各个变

量属于的类别把它们一起画在一个圆饼图中,如图 11 所示.从该图可以看出,在大众审美评估时,人们对视觉平衡分数 $f_{18}$ 关注度最高,其次是基于对角线和副对角线掩码的注意力聚焦率最大值 $f_{17}$ ,然后依次是色相加权 $f_4$ 、湿墨笔触占笔触面积比例 $f_{29}$ 、中心区域笔触所占比例 $f_{23}$ 、彩色笔触占笔触面积比例 $f_{11}$ 和饱和度加权 $f_9$ .从图 11 中我们还可以看出,构图特征对总体审美评估的影响最大,占 53%,颜色特征占 33%,纹理特征占 14%.

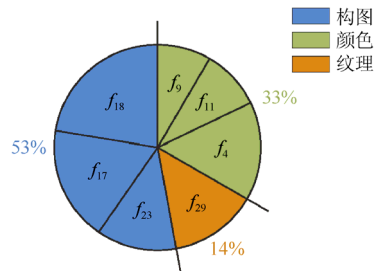


Fig.11 Proportion of each category of features in computational aesthetic model  $C_a$

图 11 计算审美模型  $C_a$  中各类别特征所占比例

## 8.2 训练集和测试集数据拟合比较

图 12(a)显示了对训练集(图 9 中 1 号~30 号)的人工评估分数曲线和计算评估分数曲线,图 12(b)显示了对测试集(图 9 中 31~60 号)的人工评估分数曲线和计算评估分数曲线.结果表明,无论采用训练集还是测试集,我们的计算审美评估结果都比较接近人工审美评估结果.为了进一步评估计算审美模型的性能,我们分别计算训练集( $S_1$ )和测试集( $S_2$ )上计算审美模型  $C_a$  预测分数与人工评估分数之间的皮尔森相关系数( $R_p$ )与均方误差(MSE),见表 4.皮尔森相关系数越高并且均方误差越小,则模型性能越好.表 4 表明,无论对于训练集还是测试集,我们的计算审美模型都有较高的  $R_p$  和较低的 MSE,因而对水墨画有较高的审美评估性能.

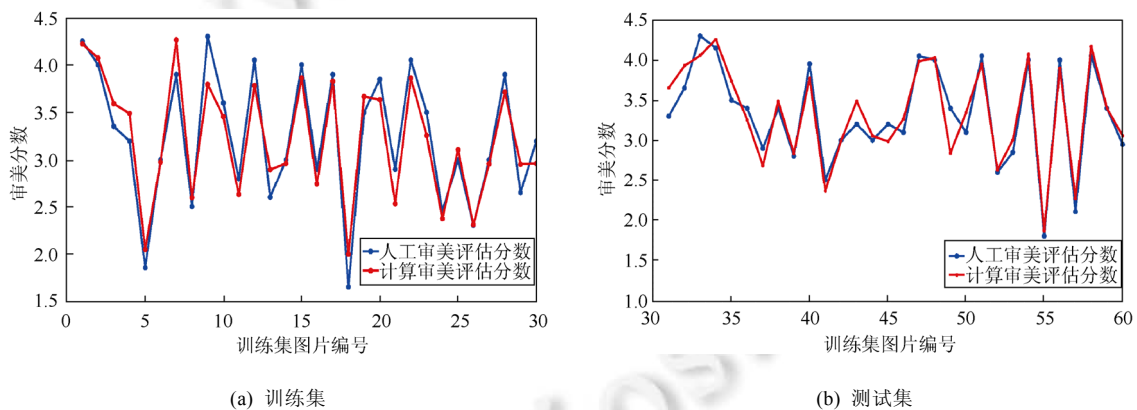


Fig.12 Score curves of human aesthetic evaluation and computational aesthetic evaluation

图 12 人工审美评估与计算审美评估分数曲线

Table 4  $R_p$  and MSE in computational aesthetic model  $C_a$

表 4 计算审美模型  $C_a$  中  $R_p$  与 MSE

$R_p(S_1)$	$R_p(S_2)$	MSE( $S_1$ )	MSE( $S_2$ )
0.952	0.949	0.037	0.049

## 8.3 不同训练集和测试集数据性能比较

为了评估特征变量在不同训练集和测试集下的预测性能,我们将上述回归分析过程运行 10 次,每次运行,

我们在图 9 所示的实验数据集中随机选出 30 个图像作为训练集,剩余的 30 个图像作为测试集.图 13 显示了 10 次运行对应的计算审美模型中  $R_p$  与 MSE 的统计情况.可以看出,对于不同的训练集和测试集,我们的计算审美模型依然有较高的  $R_p$  和较低的 MSE,因而在水墨画审美评估方面有较高的性能.

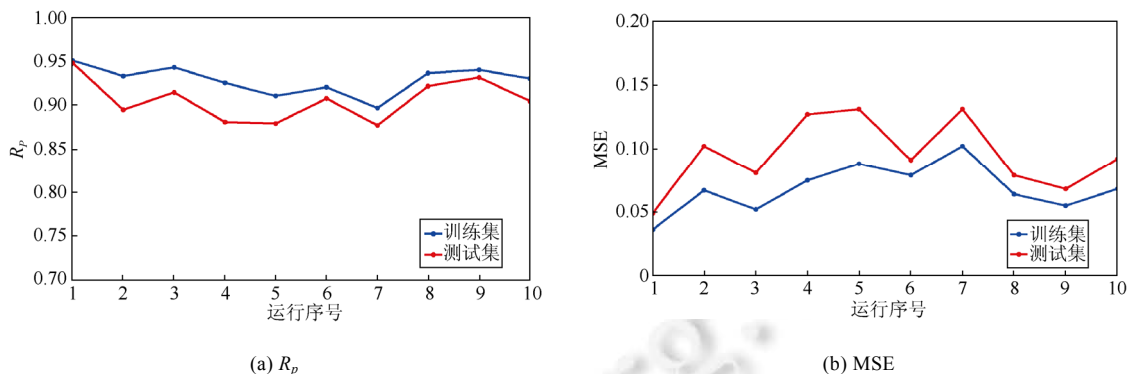


Fig.13 Performance curves of computational aesthetic model  $C_a$

图 13 计算审美模型  $C_a$  性能曲线

## 9 讨论与未来的工作

我们以水墨画作为对象,提出一个审美评估线性回归模型,该模型建立起人类审美与从水墨画中提取的可计算视觉特征之间的关系.我们用 60 幅齐白石的国画作品进行模型验证.实验结果表明,我们的计算审美评估结果与人工审美评估结果之间的皮尔森相关系数达 0.949,证明了该模型的有效性.因此,我们的工作为水墨画作品审美评估提供了一个参考框架,该框架在一个新的维度上使我们加深了对国画作品审美的理解.

与齐白石水墨画作品相比,不同画家的水墨画作品有其独特的风格特点,如吴昌硕的作品中很少有浓墨的运用,通常是几种颜色混合在一起形成复合色,讲究邻近色的运用,整体画面形成灰色调,追求色彩的统一,但降低了颜色的纯度和明度,对比不强烈.而齐白石的用色近乎原色,红色、绿色、黄色常常同时放在一个画面,形成强烈的颜色对比;张大千的作品则是色彩基调统一,多用冷色调,构图方式也与齐白石的水墨画作品大不相同.

如果要推广到其他画家(比如张大千)的水墨画计算审美模型,需要对其他画家的水墨画作品进行心理测评,然后进行回归分析,从而得到其他画家的水墨画计算审美模型.与齐白石水墨画作品计算审美模型相比,该模型会有如下几种形式:

(a) 和齐白石水墨画作品计算审美模型有相同的特征变量,但变量前面的系数不同.

(b) 和齐白石水墨画作品计算审美模型具有不同的特征变量,每个变量前面有对应系数,这些系数与其他画家作品的心理测试数据有关.

(c) 该模型包含齐白石水墨画作品计算审美模型中的部分特征变量,又有模型中不包含的特征变量,在这种情况下,齐白石作品和其他画家作品有部分相似的审美特征.

尽管齐白石作品和其他画家作品的计算审美模型不同,但是我们的回归分析方法对不同画家水墨画作品的计算审美研究都是适用的.在未来工作中,我们拟把计算审美推广到中国绘画中的另一个大家族工笔画上.工笔画的特点是用线条表现物体的轮廓和内部特征,同时又使用丰富的颜色表现各种物体,因此,我们需要探索新的特征变量来构建工笔画的计算审美模型.

## References:

- [1] Hoening F. Defining computational aesthetics. In: Proc. of the 1st Eurographics Conf. on Computational Aesthetics in Graphics, Visualization and Imaging. Eurographics Association, 2005. 13-18.
- [2] Fishwick PA. Aesthetic Computing. Cambridge: MIT Press, 2008.

- [3] Ke Y, Tang X, Jing F. The design of high-level features for photo quality assessment. In: Proc. of the IEEE Computer Society Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition. New York: IEEE Computer Society, 2006. 419–426.
- [4] Wong LK, Low KL. Saliency-Enhanced image aesthetics class prediction. In: Proc. of the 16th IEEE Int'l Conf. on Image Processing. Cairo: IEEE, 2009. 997–1000.
- [5] Obrador P, Saad MA, Suryanarayan P, Oliver N. Towards category-based aesthetic models of photographs. In: Proc. of the 18th Int'l Conf. on Advances in Multimedia Modeling. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2012. 63–76.
- [6] Wang ZH, Pu YY, Xu D, Zhu J, Tao ZE. Evaluating aesthetics quality in portrait photos. *Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software*, 2015,26:20–28 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/15012.htm>
- [7] Gao H, Tang XL, Liu JF, Jin Y. Research on image aesthetic evaluation based on image classification. *Intelligent Computer and Applications*, 2013,3(4):39–41 (in Chinese with English abstract).
- [8] Wang WN, Yi JJ, He QH. Review for computational image aesthetics. *Journal of Image and Graphics*, 2012,17(8):893–901 (in Chinese with English abstract).
- [9] Wang WN, Yi JJ, Xu XM, Wang L. Computational aesthetics of image classification and evaluation. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2014,26(7):1075–1083 (in Chinese with English abstract).
- [10] Gu TT, Guo YW, Yin KY. Image quality assessment combining low DoF and composition. *Journal of Image and Graphics*, 2013, 18(5):574–582 (in Chinese with English abstract).
- [11] Li C, Chen T. Aesthetic visual quality assessment of paintings. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2009,3(2): 236–252.
- [12] Amirshahi SA, Hayn-Leichsenring GU, Denzler J, Redies C. Color: A crucial factor for aesthetic quality assessment in a subjective database of paintings. In: Proc. of the 12th Congress of the Int'l Colour Association. 2013.
- [13] Sartori A, Yanulevskaya V, Salah AA, Uijlings J, Bruni E, Sebe N. Affective analysis of professional and amateur abstract paintings using statistical analysis and art theory. *ACM Trans. on Interactive Intelligent Systems*, 2015,5(2):Article 8.
- [14] Liu JL. Appreciation of paintings of flowers and birds from Chinese painting master Qi Baishi. *Big Stage*, 2015,7:23–24 (in Chinese).
- [15] Luo F. Red flower with ink blade lights eyes-understanding the color in Qi Baishi's paintings. *Art Spectacle*, 2011,2:86–87 (in Chinese).
- [16] Zhang HT. The beauty of composition in Qi Baishi's paintings. *Northern Art: Journal of Tianjin Academy of Arts*, 2012,1:65–66 (in Chinese).
- [17] Jiang S, Huang Q, Ye Q, Gao W. An effective method to detect and categorize digitized traditional Chinese paintings. *Pattern Recognition Letters*, 2006,27(7):734–746.
- [18] Liu YQ, Pu YY, Ren YF, Xu D. Digital analysis for Van Gogh's painting. *Journal of System Simulation*, 2015,27(4):779–785 (in Chinese with English abstract).
- [19] Lü P. Neural network-based Chinese ink-painting artistic style learning [MS. Thesis]. Tianjin: Tianjin University, 2009 (in Chinese with English abstract).
- [20] Xie F, Chen LT, Qiu H. Research of image classification method based on texture feature extraction and system to achieve. *Application Research of Computers*, 2009,26(7):2767–2770 (in Chinese with English abstract).
- [21] Liu XW, Pu YY, Huang YQ, Xu D. Quantitative statistics and analysis for painting visual art style. *Journal of Frontiers of Computer Science and Technology*, 2013,7(10):942–952 (in Chinese with English abstract).
- [22] Wu T, Yang JJ, Ran GH. Computational aesthetics analysis on sand painting style. *Journal of Frontiers of Computer Science and Technology*, 2016 (in Chinese with English abstract).
- [23] Comaniciu D, Meer P. Mean shift: A robust approach toward feature space analysis. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2002,24(5):603–619.
- [24] Perazzi F, Krähenbühl P, Pritch Y, Hornung A. Saliency filters: Contrast based filtering for salient region detection. In: Proc. of the IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition. Providence: IEEE, 2012. 733–740.
- [25] Achanta R, Hemami S, Estrada F, Susstrunk S. Frequency-Tuned salient region detection. In: Proc. of the IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition. Miami: IEEE, 2009. 1597–1604.



- [26] Liu L, Chen R, Wolf L, Cohen-Or D. Optimizing photo composition. Computer Graphics Forum, 2010,29(2):469–478.
- [27] Sun X, Yao H, Ji R, Liu S. Photo assessment based on computational visual attention model. In: Proc. of the 17th ACM Int'l Conf. on Multimedia. New York: ACM, 2009. 541–544.
- [28] Zhao S, Gao Y, Jiang X, Yao H, Chua T-S, Sun X. Exploring principles-of-art features for image emotion recognition. In: Proc. of the 22nd ACM Int'l Conf. on Multimedia. New York: ACM, 2014. 47–56.
- [29] Haralick RM, Shapiro LG. Computer and Robot Vision. Addison-Wesley, 1992.
- [30] Bryman A, Cramer D. Quantitative Data Analysis with IBM SPSS 17, 18 and 19: A Guide for Social Scientists. New York: Routledge, 2011.

#### 附中文参考文献:

- [6] 王朝晖,普园媛,徐丹,祝娟,陶则恩.人像照片的美感质量评价.软件学报,2015,26:20–28. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/15012.htm>
- [7] 高寒,唐降龙,刘家锋,金野.基于图像分类的图像美学评价研究.智能计算机与应用,2013,3(4):39–41.
- [8] 王伟凝,蚁静绒,贺前华.可计算图像美学研究进展.中国图象图形学报,2012,17(8):893–901.
- [9] 王伟凝,蚁静绒,徐向民,王励.可计算的图像美学分类与评估.计算机辅助设计与图形学学报,2014,26(7):1075–1083.
- [10] 顾婷婷,郭延文,殷昆燕.结合浅景深与构图的图像质量评价.中国图象图形学报,2013,18(5):574–582.
- [14] 刘剑利.国画大师齐白石花鸟作品赏析.大舞台,2015,7:23–24.
- [15] 骆风.红花墨叶照眼明-解读齐白石绘画中的色彩.美术大观,2011,2:86–87.
- [16] 张海童.齐白石绘画中的构成之美.北方美术:天津美术学院学报,2012,1:65–66.
- [18] 刘玉清,普园媛,任洋甫,徐丹.梵高绘画风格特点的数字化分析.系统仿真学报,2015,27(4):779–785.
- [19] 吕鹏.基于神经网络的中国水墨画艺术风格学习[硕士学位论文].天津:天津大学,2009.
- [20] 谢菲,陈雷霆,邱航.基于纹理特征提取的图像分类方法研究及系统实现.计算机应用研究,2009,26(7):2767–2770.
- [21] 刘晓巍,普园媛,黄亚群,徐丹.绘画视觉艺术风格的量化统计与分析.计算机科学与探索,2013,7(10):942–952.
- [22] 吴涛,杨俊杰,冉国洪.沙画图像特征的可计算美学分析.计算机科学与探索,2016.



张佳婧(1991—),女,浙江杭州人,博士生,主要研究领域为计算审美,计算机图像分析与处理.



王健(1961—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为应用心理学.



彭勃(1968—),男,副教授,主要研究领域为产品创新设计,计算机辅助工业设计,数字媒体设计,环境艺术设计.



于金辉(1960—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为计算机图形学,计算机动画,数字艺术.