

可计算图像复杂度评价方法综述

郭小英^{1,3}, 李文书², 钱宇华³, 白茹意¹, 贾春花¹

(1. 山西大学软件学院, 山西太原 030013; 2. 浙江理工大学信息学院, 浙江杭州 310018;

3. 山西大学大数据科学与产业研究院, 山西大学计算智能与中文信息处理教育部重点实验室, 山西太原 030006)

摘 要: 可计算的图像复杂度评价是让计算机模拟人类视觉感知, 从而对图像视觉复杂度进行决策的研究, 该研究属于多学科交叉的创新性研究课题, 在图像工程领域具有重要意义. 本文针对可计算的图像复杂度评价方法进行了全面的梳理和分析, 文中首先回顾了图像复杂度的应用领域, 并详细阐述了图像复杂度评价方法, 从信息论、图像压缩理论、图像特征分析、眼动数据等方面进行总结; 随后, 着重阐述基于图像特征的图像复杂度评价方法中所使用的图像特征; 归纳图像复杂度建模中的分类和回归问题; 最后, 总结当前图像视觉复杂度评价方法存在的问题和挑战, 展望图像复杂度的计算化发展方向.

关键词: 视觉复杂度; 情感感知; 复杂度评价; 特征提取; 分类与回归

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2020)04-0819-08

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2020.04.024

Computational Evaluation Methods of Visual Complexity Perception for Images

GUO Xiao-ying^{1,3}, LI Wen-shu², QIAN Yu-hua³, BAI Ru-yi¹, JIA Chun-hua¹

(1. School of Software Engineering, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030013, China;

2. Department of Information Science and Technology, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China;

3. Institute of Big Data Science and Industry, Key Laboratory of Computational Intelligence and Chinese Information Processing of Ministry of Education, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006, China)

Abstract: Modeling of image complexity is a research that builds a computer to sense the visual complexity of images in a way that is similar to the majority of people. The research is an interdisciplinary subject and is of great significance in the field of image engineering. In this article, the main methods of evaluating image complexity have been carried out by a comprehensive analysis. The paper reviews the different application fields of image complexity. Then the paper introduces the evaluation methods for visual complexity in detail from information theory, theory of image compression, image analysis and image modeling method of complexity. Especially, we focus on descriptions of the image features used in the complexity evaluation method based on the image features. In terms of image complexity assessment, we illustrate the classification and regression methods for evaluating complexity of images. This work also proposes the existing problems and challenges in the study of image complexity.

Key words: visual complexity; affective perception; complexity evaluations; feature extraction; classification and regression

1 引言

“图像复杂度”是指图像内在复杂程度的描述. 近年来, 研究人员提出了可计算图像复杂度 (Image Computational Complexity) 的概念^[1], 旨在让计算机模拟人类视觉感知, 从而对图像复杂度感知进行量化的研究^[2,3], 该研究属于情感计算^[4]的一部分.

纵观前人对图像复杂度评价方法的总结, 高振宇^[5]和周兵^[6]等从复杂度定义及组成论的角度出发对传统复杂度的描述方法进行讨论, 指出其局限和不足. 然而, 随着图像数据的迅猛增长和机器学习算法的不断改进, 近年来, 图像复杂度的评价方法主要是基于图像特征组合和机器学习的方法来构造复杂度模型的^[7], 因此, 急需补充综述相关图像复杂度评价方法.

2 图像复杂度应用领域

图像复杂度的研究涉及计算机学科、心理学、认知学、美学等学科领域,是多学科融合交叉的前沿研究课题,对图像工程等各应用领域具有非常重要的意义。

(1) 图像复杂度可用于图像版权保护领域. 数字水印技术是图像版权保护的一种重要手段^[8]. 目前,数字水印技术在数字水印嵌入区域和嵌入强度(容量)的问题上,仍然缺乏量化指标. 然而,图像复杂度可作为解决以上问题的一个评价指标,一方面,为水印技术选择合适的嵌入水印的区域;另一方面是图像嵌入水印容量的重要指标。

(2) 图像复杂度可以用于图像分类与分析算法性能的评估^[9,10].

(3) 图像复杂度可以反映出对图像进行某些操作的困难程度,如图像压缩^[11]和图像分割^[12]. 此外,图像复杂度还可反映出图像目标识别或提取过程中所面临的复杂场景变化的困难程度^[13,14].

(4) 图像复杂度可应用到融合主观感知的基于语义(或情感)的图像检索. 图像复杂度可用来描述图像之间的相似度^[15],并将其应用于图像检索中。

(5) 图像复杂度是衡量图像美学价值的一个重要度量^[16],被认为是高度相关的审美因素之一,对评估图像的美学价值有非常重要的意义^[17]. 因此,可以应用到网页复杂度评价^[18]、产品的设计与欣赏^[19]等方面,具有关键性的指导作用。

综上所述,图像复杂度的内涵体现在三方面^[6]: ①作为一种评价指标,反映图像水印技术、图像压缩和图像分割的困难程度;②作为一种图像特征,用于图像分类与检索;③作为一种图像视觉感知情感,用于图像认知与美学计算的研究。

3 可计算图像复杂度研究

在计算机相关领域,研究者们通过不同的量化方法对图像复杂度进行量化研究。

3.1 信息论与图像复杂度

香农理论(Shannon Theory)出现后,信息论中熵的概念已成为量化图像复杂度的一种主流方法. 信息熵的提出解决了对信息的量化度量的问题,图像的熵反映了图像中平均信息内容的多少. 图像的一维熵^[20]只能统计图像灰度分布的聚集特征,却不能从空间特征上反映图像的灰度分布,因此,扩展出了图像二维熵的计算,图像二维熵不仅反映了图像中像素的灰度信息,更能体现像素邻域内灰度分布的空间特征。

此外,众多文献还对图像熵的算法进行了不断的改进. 文献[21]提出了基于加权信息熵的图像复杂度

计算方法. 文献[22]提出了结合信息熵和灰度对比度的方法来量化图像复杂度. Andrienko 等^[23]提出了一种基于平均信息增益(Mean Information Gain)的复杂度计算方法,并将这种计算方法应用到二维图像上。

3.2 图像压缩率与图像复杂度

图像的压缩文件大小被认为是最简单直接的图像复杂度计算方法,在 Donderi^[24]和 Jamzad 等^[25]的研究中,图像的 JPEG 压缩文件的大小和 GIF 文件大小分别被证实与人的视觉复杂度感知高度相关. Silva 等^[26]研究了眼动行为和图像复杂度感知的关系,通过眼动数据视觉注视模式提取视觉显著性区域,实验结果表明,与整幅图像的 JPEG 压缩率相比,显著性区域的 JPEG 压缩率能更准确反映图像的视觉复杂度. Landwehr 和 Mayer^[27]采用 ZIP 图像压缩率来衡量图像复杂度,实验结果表明 ZIP 压缩率与主观图像复杂度感知正相关。

3.3 图像特征组合与图像复杂度

随着图像分析和机器学习方法的不断提升,基于图像特征的视觉复杂度分类和回归,成为图像复杂度可计算化实现的主要方法. 针对灰度、纹理和彩色图像,研究者采用不同的特征组合来量化评价图像复杂度. 图 1 体现了基于图像特征的视觉复杂度评价模型,其中图像视觉复杂度评价方法中的图像特征描述将在第 4 节进行详细的阐述,建模方法将在第 5 节进行描述。

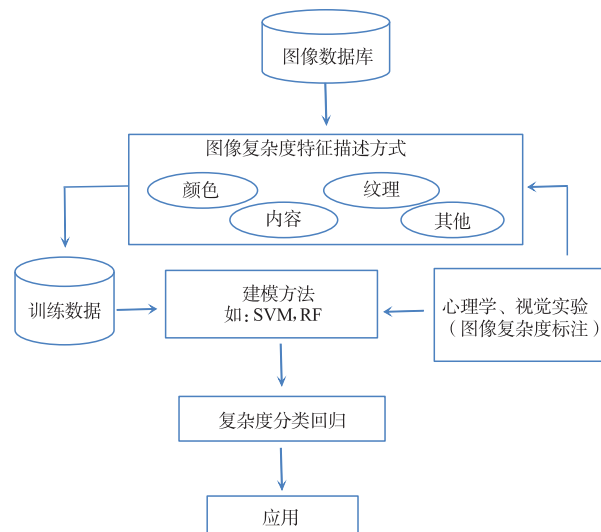


图1 基于图像特征的视觉复杂度评价模型

3.4 其他图像复杂度研究

分形维数反映了复杂形体不规则的度量,也是用来计算图像复杂度的一种方法^[28]. 此外,四叉树也可以用来评估图像的复杂度^[24].

视觉相似性和熟悉度用来反映图像的复杂度,文献[29]提出了一种基于视觉相似度的 3D 图形复杂度计算方法. 视觉熟悉度在感知过程中降低了图像的

复杂度^[28],越熟悉的事物,复杂度越低。

近年来,研究者们逐步借助眼动仪等认知领域的研究工具和手段,分析和探讨影响视觉复杂度感知的因素以及视觉复杂度对认知方面的影响.研究者 Georges 等^[30]提出了一种基于用户的神经电生理信号的界面视觉复杂性评价方法,该方法将用户的生理信号形成热点图,以可视化的方式指导界面设计人员和研究人员.文献[31]从认知分层角度对图像复杂度进行研究,文中以常见的地铁交通信息图为研究对象,基于由浅入深的认知加工次序,对地铁信息图像的复杂度进行了研究。

3.5 图像复杂度数据库

图像复杂度的研究离不开具有复杂度标注信息的图像库,目前,公开的图像复杂度数据库较少,且一些标注的图像库中包含数量不多的图像,表 1 汇总了部分图像复杂度标注数据库.除表 1 中列出的部分图像复杂度标注数据库外,其他研究者^[7]也采用一公开的图像美学标注数据库来替代图像复杂度标注数据库,如 Jenaesthetics 数据库^[38]和 AVA (Aesthetic Visual Analysis) 数据库^[44]等。

表 1 图像复杂度标注数据库汇总

文献	介绍	复杂度等级量化	来源
[32]	100 张室内场景图	8 级	未公开
[33]	120 张抽象派和具象派艺术作品	3 级	未公开
[24]	收集了 40 幅吴冠中水墨画图像的复杂度评分,其中 26 张是抽象水墨画图像.	7 级	未公开
[34,35]	从 Live 数据库 ^[34] 选取 29 张包含不同场景(外景、人脸、建筑等)的缩略图,收集了实验者对彩色图像和灰度图像的复杂度评分	[0-100]	Live 数据库: http://live.ece.utexas.edu/research/quality
[36]	收集了 500 张油画图像的复杂度评分,其中 50 张油画图像选自 PaintDb ^[37] ,150 张油画图像选自 Jenaesthetics 数据库 ^[38] ,300 张油画图像选自 Wikia ^[39]	7 级	http://visualperception.cn
[40]	912 张黑白抽象模式图像	5 级	未公开
[41]	140 张网页图像	5 级	未公开
[42]	9 张网络地图	5 级	未公开
[43]	1420 张包含七种类型的图像,包含 200 张场景图像、200 张广告图像、200 张图表等可视化图像、200 张特定对象的图像、100 张室内设计图、420 张艺术图、100 张至上主义图像(至上主义的传达抽象形式的各种几何形状和对象)	[0-100]	https://github.com/esaraee/Savoias-Dataset

4 图像特征描述

4.1 颜色特征

4.1.1 色彩空间

常用的颜色色彩模型有:RGB、HSV、HSL 和 $L * a * b$ 色彩模型等. Guo 等^[45]将图像从 RGB 空间转换成 HSL 空间,提取了全局和局部 H 、 S 、 L 特征. Sun 等^[7]基于 HSL 空间计算了色相角、色相偏度、色相组成、饱和度和亮度等共 114 维图像特征进行图像复杂度建模. Redies 等^[46]提出了基于像素在 Lab 颜色模式下的最大梯度算法的图像复杂度评价方法。

4.1.2 颜色复杂度

颜色复杂度 (Color Complexity Measure, CCM) 或者颜色的差异对于视觉感知非常敏感. Yoon 等^[47]提出了一种基于局部区域的颜色复杂度计算方法。

4.1.3 色彩和谐模式

和谐的色彩能给人较强的精神享受. 日本学者 Matsumura^[48]总结了 8 种反映和谐色彩的色相分布模式. 这

些模式已经被用于绘画图像色彩和谐和美学评价上. 文献[16]研究了图像美学评价方法,文中通过对油画图像色彩和谐模式进行分析,找到与油画主题色彩相匹配的色彩和谐模式。

4.2 内容特征

4.2.1 边缘特征

众多研究^[16,17]认为图像复杂度和图像内容(客观存在的物体、线条、组成元素等)有关,图像内容越多,图像越复杂;而反映这些内容特征最直接的方式就是边缘特征,边缘信息越多,反映图像杂乱程度越高. 边缘特征通常是将图像先进行边缘提取,再计算边缘交叉的点数、边缘密度等. 文献[16]指出油画图像中的边缘分布特征反映了作者在构图过程的想法,从而对图像美学感知起到很关键的作用,在文中,作者提取了图像的边缘分布特征,通过计算边缘边界框面积比例来分析图像的边缘特征。

4.2.2 视觉显著性特征

我们在注意一幅图像时,虽然并非对图像的所有

信息进行理解与分析,但首先进入视觉系统的是图像的全局特征(Global features),其次是选择性地对图像的局部区域特征(Local features)进行深度理解,特别地,视觉感兴趣区域的特征尤其吸引视觉注意力. Silva等^[26]研究了眼动行为和图像复杂度感知的关系,通过眼动数据视觉注视模式提取视觉显著性区域,实验结果表明,显著性区域是可以作为图像复杂度评价指标.此外,图像复杂度与图像显著性区域的大小、分割区域的多少和分割后最大区域面积^[8]等都有关系.

4.3 纹理特征

图像的视觉复杂度还受到纹理特征等其他特征的影响^[7],常用的纹理特征提取方法有灰度共生矩阵、Tamura^[49]纹理特征等.文献[9]利用灰度共生矩阵的熵值(图像所包含的信息量)来描述图像复杂度;文献[50]在采用 Tamura 纹理特征中的规整度和方向度特征参数的基础上,提出了基于密度、粗糙度和熟悉度等共 5 个特征来描述图像复杂度.此外,小波变换^[51]在基于图像复杂度的信息隐写方面较为常用.

4.4 其他特征

绘画图像的视觉复杂度感知分析成为近年来研究热点^[7,44,52-55],下面针对绘画图像特有的特征(笔触和留白特征)进行详细的阐述.

4.4.1 笔触特征

笔触(Brush Stroke),即画家在绘画中用笔的手法

或者痕迹,是绘画图像中一个非常重要的可视化表征.画家在作画时,不同的心境和情感使得作者在下笔时力度的轻、重、急、缓程度不同,造就不同的笔触艺术表现力,体现了不同画家的艺术风格.目前对绘画作品笔触的研究已有不少^[52-55],但主要集中在国内外一些大师的绘画作品上,譬如梵高的作品、吴冠中的作品等.

4.4.2 留白特征

绘画图像的留白特征主要体现在中国的绘画图像上^[52],是一种常用的构图方法.绘画者通过对留白的巧妙运用,使绘画具有“虚实相生”的艺术境界,产生视觉上的层次感和空间的想象力. Fan、Zheng 和 Zhang^[53]研究了我国当代著名油画家吴冠中的绘画,对其代表作中的留白进行研究,实验结果表明,中国绘画中的留白并不单单是一个空白,它能达到“此时无声胜有声”的艺术感染力.

5 图像复杂度建模方法描述

人类可以将图像的特征进行组合从而感知出图像的复杂程度,那么计算机如何组织图像特征从而做出与人的视觉感知相似的选择?答案就是需要建立一个映射过程,实现计算机从图像特征到视觉复杂度之间的映射研究包含两个方面:一、依据图像特征进行视觉复杂度等级分类;二、依据图像特征进行视觉复杂度分值预测.文中对已有图像复杂度分类/回归方法进行总结,见表 2.

表 2 可计算图像复杂度分类/回归方法文献研究

图像复杂度建模方法	特点		文献	
	优点	缺点		
基于分类的方法	支持向量机	在小样本训练集上效果较好;可解决非线性问题;无局部极小值问题;可以很好的解决高维数据集问题;具有优秀的泛化能力.	对于核函数的高维映射解释力不强,尤其是径向基函数;对缺失数据敏感;调参麻烦,核函数难选难调.	[45]
	聚类	聚类是一种无监督学习任务,根据样本数据点的特征将具有相同特征的样本聚集在一组.	集群的中心点不容易确定,需手动指定集群数量;如果样本数据的真实集群并不是类球状的,那么聚类效果较差.	[56]
	随机森林	可以处理高维数据;模型的泛化能力较强,训练模型时速度快,成并行化方式,即树之间相互独立;最终训练结果,可以对特征排序,选择比较重要的特征;随机森林有袋外数据(OOB),因此不需要单独划分交叉验证集;对缺失值、异常值不敏感;模型训练结果准确度高.	当数据噪声比较大时,会产生过拟合现象;对不同取值的属性的数据,取值划分较多的属性,会对随机森林产生更大的影响.	[36]
	神经网络	具有较强的学习能力;对噪声数据鲁棒性和容错性较强;自适应能力强;有联想能力,能适应任何非线性关系.	神经网络参数(权值和阈值)较多;是一个黑盒过程,不能观察中间结果;学习过程比较长,有可能陷入局部极小值.	[46,57]
	深度学习	深度学习与传统的方法相比,在图像、音频和文本等数据的分析和解释性能上有很大的提升,并在新数据中,使用反向传播算法更新模型参数;深度学习具有较多的层级结构,能够解决不同的问题,并且隐藏层也减少了算法对特征工程的依赖.	不适合作为通用目的的算法,因为需要海量的数据;是一个黑盒过程,不能观察中间结果;需要更富经验的人进行调参(即设置架构和超参数)以减少训练时间;需要较高的硬件支持.	[57,58]

续表

图像复杂度建模方法		特点		文献
		优点	缺点	
基于回归的方法	线性回归	建模快速简单,特别适用于要建模的关系不是非常复杂且数据量不大的情况;有直观的理解和解释.	线性回归对异常值非常敏感;只能拟合线性关系的数据.	[52]
	随机森林回归	随机森林是决策树的集成算法,分别训练一系列的决策树,所以训练过程是并行的;回归问题中,随机森林的输出结果为所有决策树输出的平均值.	在解决回归问题时,随机森林不能给出一个连续的输出;此外,随机森林不能够做出超越训练集数据范围的预测,可能导致在对某些有特定噪声的数据进行建模时出现过拟合.	[36]

6 总结与展望

6.1 总结

目前已经建立了基于信息理论、图像压缩率、图像特征组合和借助其他获取生理数据仪器的图像复杂度评价方法,许多方法已经得到了广泛的应用,但仍有诸多问题需要解决. 本文对图像复杂度评价方法的优势和缺点进行总结,见表 3 所示.

表 3 各复杂度评价方法存在的优势和缺点

图像复杂度评价方法	优势	缺点
基于信息理论	统计图像灰度特征;易理解;操作简单.	没有从人眼视觉复杂度感知机理出发,也没有充分考虑视觉对与颜色、空间等信息的加工和处理.
基于图像压缩率	图像压缩文件大小可以直观地反映图像复杂程度,其计算方法也比较简单.	无法从空间或者组成论的角度直观地解释造成图像简单与复杂的原因,更难以很好地解释为什么一些图像看起来更复杂.
基于图像特征组合	特征提取的方法较多;可全面提取对复杂度有影响的图像特征.	易忽略了其他因素(不同尺度的特征、整体和局部特征、视觉感兴趣区域特征)对视觉复杂度的影响.

此外,图像复杂度数据库存在很大的问题和挑战,现有图像复杂度标注数据库非常少,而且能公开使用的图像复杂度数据库少之又少. 文献中所用的数据大多是作者自己搜集的,常通过传统的数据库标注方式(主要分为实验室内的人工打分实验和在线图像分享打分)进行数据标注,然而这些方法存在样本相对较少、参与人数有限、难以控制认知差异等缺陷.

6.2 展望

与人类图像复杂度感知相比,可计算图像复杂度还未出现准确的可量化解释,因为图像复杂度的评价除了具备一定的“客观性”之外,还具有很强的“主观

性”,且评价方式也存在不同的形式,或论“简单/复杂”,或论“复杂度数值评分”,或直接给出复杂度语言评价. 综上分析,结合计算机视觉技术的不断发展,未来图像复杂度的评价方法在以下几个方面有待进一步发展.

6.2.1 图像复杂度评价方法性能的提升

计算机在图像视觉感知(如美学感知、复杂度感知等)和创造美学感知等方面的能力还未取得长足的进步,与人类的感知能力还有较大差距,因此,在图像复杂度评价方法性能提升方面,需进一步研究:

(1) 新的图像属性的提出

从人类感知复杂度的内在机理出发,提取新的影响图像复杂度感知的图像属性,如基于人眼视觉的图像视觉新属性(如对称特性等)和感知新属性(如熟悉程度等),这些属性的提出将更加有助于图像视觉复杂度的评价和量化.

(2) 与眼动、脑电技术等结合

与眼动跟踪技术相结合,通过实验发现图像复杂度与视觉注视之间的关联,进而尝试将图像情感(复杂度等情感)这些难以量化的情感因素进行客观的描述;进一步与脑电技术等关联,探讨除眼动数据之外其他生理信号(如脑电波信号)与图像视觉情感之间的一些关联.

(3) 基于深度学习算法进行改进,构造可解释模型

目前神经网络是计算机视觉主流的技术手段,其性能大大超越了传统的基于手工设计特征的方法,然而神经网络学习的特征可解释性较差,难以解释图像视觉复杂度感知机制,因此,需要对深度学习方法进行改进,打开深度学习特征的黑匣子,提升预测图像复杂度的性能并提升复杂度情感在其他视觉情感中的应用.

6.2.2 图像复杂度数据集的扩大

与图像识别等其他计算机视觉领域内的研究任务相比,图像复杂度数据标注的任务难度较大,整体数据规模都十分有限,且目前极少数的公开图像数据库属于西方国家,这对于东方国家的研究极为不利,应在规

模上不断扩大,建立我们自己的图像复杂度数据库,可借鉴国外图像标注的有利工具,采用众包(Crowdsourcing)的方式通过大量用户对数据库图像进行标注,目前较为主流和常用的标注平台有:亚马逊土耳其机器人(Amazon Mechanical Turk)和百度的众测平台等。

6.2.3 图像复杂度任务输出的多样化

传统的对图像复杂度任务的输出主要集中在图像复杂度等级的评价和复杂度分数的预测,未来随着计算机“感知能力”的逐步提升,将对图像复杂度评价模型的输出任务提出了多样化的要求,输出的可能是图像复杂度分布、影像因素乃至语言描述等。

参考文献

- [1] JOSHI D, DATTA R, FEDOROVSKAYA E, Q T, LUONG J Z, WANG J L, LUO J B. Aesthetics and emotions in images: A computational perspective[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2011, 28(5): 94 – 115.
- [2] DA M P Silva, COURBOULAY V, ESTRAILLIER P. Image complexity measure based on visual attention[A]. 18th IEEE International Conference on Image Processing ICIP2011[C]. IEEE, 2011. 3281 – 3284.
- [3] GUO X Y, KURITA T, ASANO C M, ASANO A. Visual complexity assessment of painting images[A]. 20th IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)[C]. IEEE, 2013. 388 – 392.
- [4] PICARD R W. *Affective Computing* [M]. Cambridge, MA: MIT Press, 1997.
- [5] 高振宇, 杨晓梅, 龚剑明, 金海. 图像复杂度描述方法研究[J]. *中国图形图像学报*, 2010, 15(1): 129 – 135. GAO Zhen-yu, YANG Xiao-mei, GONG Jian-ming, JIN Hai. Research on image complexity description methods [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2010, 15(1): 129 – 135. (in Chinese)
- [6] 周兵, 刘玉霞, 杨欣欣, 刘扬. 图像复杂度研究综述[J]. *计算机科学*, 2018, 45(9): 30 – 37. ZHOU Bing, LIU Yu-xia, YANG Xin-xin, LIU Yang. Review of research on image complexity [J]. *Computer Science*, 2018, 45(9): 30 – 37. (in Chinese)
- [7] Sun L, Yamasaki T, Aizawa K. Relationship between visual complexity and aesthetics: application to beauty prediction of photos[A]. *European Conference on Computer Vision* [C]. Zurich, 2014. 20 – 34.
- [8] YAGHMAEE F, JAMZAD M. Estimating watermarking capacity in gray scale images based on image complexity [J]. *Eurasip Journal on Advances in Signal Processing*, 2010, DOI:10.1155/2010/851920.
- [9] JAYANT N, JOHNSTON J, SAFRANEK R. Signal compression based on model of human perception[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1993, 81(10): 1385 – 1422.
- [10] CERRA D, MALLET A, GUEGUEN L, DATCU M. Complexity based analysis of earth observation imagery: an assessment[A]. *ESA-EUSC 2008; Image Information Mining: pursuing automation of geospatial intelligence for environment and security* [C]. ESA/Esrin Frascati, Italy, 2008.
- [11] VEISI H, JAMZAD M. A complexity-based approach in image compression using neural networks[J]. *International Scholarly and Scientific Research & Innovation*, 2009, 3(11): 552 – 562.
- [12] 王海峰, 章怡, 蒋益锋. 基于图像复杂度曲线拟合的快速图像分割方法[J]. *计算机科学*, 2018, 45(2): 130 – 134. WANG Hai-feng, ZHANG Yi, JIANG Yi-feng. Fast image segmentation method based on image complexity through curve fitting [J]. *Computer Science*, 2018, 45(2): 130 – 134. (in Chinese)
- [13] PERJU V, CASASENT D, MARDARE I. Image complexity matrix for pattern and target recognition based on Fourier spectrum analysis [J]. *Proc SPIE-The International Society for Optical Engineering*, 2009, 7340: 1 – 9.
- [14] 乔立永, 徐立新, 高敏. 红外目标识别图像复杂度度量方法综述[J]. *红外技术*, 2013, 35(2): 88 – 96. QIAO Li-yong, XU Li-xin, Gao Min. Survey of image complexity metrics for infrared target recognition [J]. *Infrared Technology*, 2013, 35(2): 88 – 96. (in Chinese)
- [15] PERKIO J, HYVARINEN A. Modelling image complexity by independent component analysis, with application to content-based image retrieval[A]. *19th International Conference on Artificial Neural Networks: Part II* [C]. Springer, 2009. 1 – 11.
- [16] LI C, CHEN T. Aesthetic visual quality assessment of paintings[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2009, 3(2): 236 – 253.
- [17] 王伟凝, 蚁静斌, 贺前华. 可计算图像美学研究进展[J]. *中国图形图像学报*, 2012, 17(8): 893 – 901. WANG Wei-ning, Yi Jing-bian, HE Qian-hua. Review for computational image aesthetic [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2012, 17(8): 893 – 901. (in Chinese)
- [18] 王求真, 曹仔科, 马庆国. 认知负荷视角下不同复杂度购物网站的眼动研究[J]. *信息系统学报*, 2012, 2: 54 – 63. WANG Qiu-zhen, CAO Zi-ke, MA Qing-guo. An eye movement study on online shopping websites with different complexity from a cognitive load perspective [J]. *China Journal of Information Systems*, 2012, 2: 54 – 63. (in Chinese)
- [19] PIETERS R, WEDEL M, BATRA R. The stopping power

- of advertising: Measures and effects of visual complexity [J]. *Journal of Marketing*, 2010, 74(5): 48 – 60.
- [20] ZHOU L H, ZHOU J Q, BAI Z Y. Trademark retrieval based on image information entropy [J]. *Computer Applications*, 2000, 20(2): 21 – 23.
- [21] YANG L, ZHOU Y, YANG J, et al. Variance WIE based infrared images processing [J]. *Electronics Letters*, 2006, 42(15): 1 – 2.
- [22] HUANG K, MAO X, HU H Y, et al. Novel approach to IR moving dim target detection against complex background [J]. *Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica*, 2009, 30(9): 1754 – 1760.
- [23] ANDRIENKO Y A, BRILLIANTOV N V, KURTHS J. Complexity of two-dimensional patterns [J]. *The European Physical Journal B-Condensed Matter and Complex Systems*, 2000, 15(3): 539 – 546.
- [24] DONDERI D C. An information theory analysis of visual complexity and dissimilarity [J]. *Perception*, 2006, 35(6): 823 – 835.
- [25] JAMZAD M, YAGHMAEI F. Achieving higher stability in watermarking according to image complexity [J]. *Scientia Iranica*, 2006: 404 – 412.
- [26] SILVA M P, COURBOULAY V, ESTRAILLIER P. Image complexity measure based on visual attention [A]. 18th IEEE International Conference on Image Processing [C]. IEEE, 2011. 3281 – 3284.
- [27] LANDWEHR J R, MAYER S. When complexity is symmetric: The interplay of two core determinants of visual aesthetics [J]. *ACR North American Advances*, 2014, 42: 608 – 609.
- [28] FORSRTHE A, NADAL M, SHEEHY N, CELA-CONDE C J, SAWEY M. Predicting beauty: Fractal dimension and visual complexity in art [J]. *British Journal of Psychology (London, England; 1953)*, 2011, 102(1): 49 – 70.
- [29] SALEEM W, BELYAEV A, WANG D, SEIDEL H P. On visual complexity of 3d shapes [J]. *Computer Graph*, 2011, 35(3): 580 – 585.
- [30] GEORGES V, COURTEMANCHE F, Sénécal S, BACCINO T, LEGER P M, FREDETTE M. Measuring Visual Complexity Using Neurophysiological Data. *Information Systems and Neuroscience [M]*. Switzerland: Springer International Publishing, 2015. 207 – 212. DOI: 10.1007/978-3-319-18702-0.
- [31] 张晶, 薛澄岐, 沈张帆, 王海燕, 周蕾, 等. 基于认知分层的图像复杂度研究 [J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2016, 46(6): 1149 – 1154.
ZHANG Jing, XUE Cheng-qi, SHEN Zhang-fan, WANG Hai-yan, ZHOU Lei, et al. Study on image complexity based on cognitive layering method [J]. *Journal of South-east University (Natural Science Edition)*, 2016, 46(6): 1149 – 1154. (in Chinese)
- [32] OLIVIA A, MACK M L, SHRESTHA M, PEEPER A. Identifying the perceptual dimensions of visual complexity of scenes [A]. *Proceedings of the 26th Annual Meeting of the Cognitive Society [C]*. Chicago, 2004. 1041 – 1046.
- [33] NADAL M, MUNAR E, MARTY G, CELA-CONDE C J. Visual complexity and beauty appreciation: explaining the divergence of results [J]. *Empirical Studies of the Arts*, 2010, 28(2): 173 – 191.
- [34] SHEIK H, WANG Z, CORMAKC L, BOVIK A. Live Image Quality Assessment Database Release2 [DB]. <http://live.ece.utexas.edu/research/quality>, 2018.
- [35] CIOCCA G, CORCHS S, GASPARINI F, BRICOLO E, TEBANO R. Does color influence image complexity perception? [A]. 5th International Computational Color Imaging Workshop (CCIW2015) Lecture Notes in Computer Science vol 9016 [C]. Springer, Cham, 2015. 139 – 148.
- [36] GUO X Y, QIAN Y H, LI L, ASANO A. Assessment model of perceived visual complexity of painting images [J]. *Knowledge-Based Systems*, 2018, 159: 110 – 119.
- [37] PAINTINGDB [DB]. <http://paintingdb.com/>, 2015-09-08.
- [38] JENAAESTHETICS [DB]. <http://www.inf-cv.uni-jena.de/en/jenaesthetics>, 2015-10-08.
- [39] MARENGO L, FAZEKAS G, TOMBROS A, et al. The interaction of casual users with digital collections of visual art, an exploratory study of the WikiArt website [A]. 19th International Conference on Human-Computer Interaction [C]. Vancouver, 2017. 583 – 590.
- [40] GARTUS A, LEDER H. The small step toward asymmetry: aesthetic judgment of broken symmetries [J]. *i-Perception*, 2013, 4(5): 361 – 364.
- [41] MINIUKOVICH A, ALINGELI A D. Quantification of interface visual complexity [A]. *Proceedings of International Working Conference on Advanced Visual Interfaces: AVI [C]*. Italy, 2014. 153 – 160.
- [42] SCHNUR S, BEKTAS K, OLTEKIN A C. Measured and perceived visual complexity: A comparative study among three online map providers [J]. *Cartography and Geographic Information Science*, 2018, 45(3): 238 – 254.
- [43] SARAEE E, JALAL M, BETKE M. SAVOIAS: A diverse, multi-category visual complexity dataset [R]. arXiv preprint arXiv:1810.01771. 2018.
- [44] MURRAY N, MARCHESOTTI L, PERRONNIN F. Ava: A large-scale database for aesthetic visual analysis [A]. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) [C]*. IEEE, 2012. 2408 – 2415.
- [45] GUO X Y, ASANO C M, ASANO A, KURITA T. Model-

- ing the perception of visual complexity in texture images [J]. *International Journal of Affective Engineering*, 2013, 12(2): 223 – 231.
- [46] CHEN Y Q, DUAN J, Zhu Y, QIAN X F, XIAO B. Research on the image complexity based on texture features [J]. *Chinese Journal of Optics*, 2015, 8(3): 407 – 414.
- [47] YOON K J, KWEON I S. Color image segmentation considering human sensitivity for color pattern variations [A]. *Proc of SPIE* [C]. Korea, 2001. 269 – 278.
- [48] MATUSDA Y. *Color Design* [M]. Asakura Shoten, 1995.
- [49] TAMURA H, MORI S, YAMAWALI T, et al. Textural features corresponding to visual perception [J]. *Systems, Man and Cybernetics*, 1978, 8(6): 460 – 473.
- [50] GUO X, ASANO C M, ASANO A, et al. Analysis of texture characteristics associated with visual complexity perception [J]. *Optical Review*, 2012, 19(5): 306 – 314.
- [51] 董学枢. 基于双正交小波变换和图像复杂度的水印算法 [J]. *微型机与应用*, 2014, 33(21): 39 – 41.
DONG Xue-shu. Watermarking algorithm based on bi-orthogonal discrete wavelet transform and image complexity model [J]. *Microcomputer & Its Applications*, 2014, 33(21): 39 – 41. (in Chinese)
- [52] FAN Z B, LI Y N, YU J H, et al. Visual complexity of Chinese ink paintings [A]. *Proceedings of SAP' 17* [C]. Cottbus, Germany, 2017. DOI: 10.1145/3119881.3119883.
- [53] FAN Z B, ZHENG S X-J, ZHANG K. Computational analysis and eye movement experiments of white space in Chinese paintings [A]. *Proceedings of the IEEE International Conference on Progress in Informatics and Computing* [C]. China, 2015. 301 – 306.
- [54] LI J, YAO L, WANG Z J. Rhythmic brushstrokes distinguish Van Gogh from his contemporaries: findings via automated brushstroke extraction [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2012, 34(6): 1159 – 1176.
- [55] SUN M J, ZHANG D, ZHENG W, et al. Monte Carlo convex hull model for classification of traditional Chinese paintings [J]. *Neuro Computing*, 2016, 171: 788 – 797.
- [56] YIN K Y. Evaluation and Application of Image Complexity Based on Multi-visual Features [D]. Nanjing University, 2013.
- [57] KAO Y, HUANG K, MAYBANK S J. Hierarchical aesthetic quality assessment using deep convolutional neural networks [J]. *Signal Processing-Image Communication*, 2016, 47(47): 500 – 510.
- [58] TALEBI H, MILANFAR P. NIMA: Neural image assessment [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2018, 27(8): 3998 – 4011.

作者简介



郭小英 女, 1985 年 1 月出生于山西原平. 2013 年于日本广岛大学取得博士学位, 现为山西大学软件学院副教授、硕士生导师, 从事图像分析与视觉感知、情感计算、眼动追踪等研究.
E-mail: guoxiaoying@sxu.edu.cn



李文书 男, 1975 年 7 月出生于黑龙江. 于浙江大学取得博士学位, 现为浙江理工大学信息学院教授、硕士生导师, 主要研究方向为图像处理、认知建模.
E-mail: charlie@zstu.edu.cn