

图像复杂度研究综述

周 兵<sup>1,2</sup> 刘玉霞<sup>1</sup> 杨欣欣<sup>1</sup> 刘 扬<sup>1</sup>

(河南大学计算机与信息工程学院 河南 开封 475004)<sup>1</sup>

(河南大学图像处理与模式识别研究所 河南 开封 475004)<sup>2</sup>

**摘 要** 图像相关复杂度的研究领域很广泛,除了计算机科学领域,还延伸到医学、认知心理学等研究领域。在以上应用领域,与图像相关的复杂度的定义有很多,包括图像复杂度、视觉复杂度、场景复杂度,其中图像复杂度又可以进一步细分为颜色复杂度、纹理复杂度和形状复杂度。文中对以上这些复杂度的应用、定义和计算方法进行了归纳总结,并依据组成论中相关复杂度的定义,提出了一种研究图像复杂度的思路,即从图像组成元素的角度来研究图像复杂度。这种图像复杂度的定义只与图像本身所包含的元素、内容有关系,与图像处理任务和算法无关。同时,这种图像复杂度的定义符合一般意义下人对图像复杂性的感受和理解。图像元素可以分为颜色、形状、纹理三大类,它们又可以进一步用一些特征来表示。根据组成论,文中给出了定义这 3 种特征的广义集的方法。后续研究将进一步给出图像复杂度的计算算法,并通过与人工实验的相关性分析来验证计算结果是否与人的感受相一致。

**关键词** 图像复杂度,视觉复杂度,场景复杂度,颜色复杂度,形状复杂度,纹理复杂度,组成论,广义集

**中图法分类号** TP751.1      **文献标识码** A      **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2018.09.004

Review of Research on Image Complexity

ZHOU Bing<sup>1,2</sup> LIU Yu-xia<sup>1</sup> YANG Xin-xin<sup>1</sup> LIU Yang<sup>1</sup>

(School of Computer and Information Engineering, Henan University, Kaifeng, Henan 475004, China)<sup>1</sup>

(Institute of Image Processing and Pattern Recognition, Henan University, Kaifeng, Henan 475004, China)<sup>2</sup>

**Abstract** Image complexity has been not only widely studied in the field of computer science, but also extended to the field of medicine, cognitive psychology, etc. In the above application fields, different scholars have proposed different definitions of complexity related to image, such as image complexity, visual complexity, scene complexity. And image complexity includes color complexity, shape complexity, and texture complexity. This paper summarized these applications, definitions and methods, and proposed a future research idea based on the definition of complexity in constitution theory to study the complexity from the point of image composition. This definition of the complexity only depends on the elements and contents of the image, and does not be related to the specific image processing algorithm. Meanwhile, this definition of complexity is consistent with the subjective perception and understanding of the image complexity in common sense. The elements of image can be classified to color, shape and texture feature. According to constitution theory, this paper proposed the definitions of the general sets for these three features. The further study is to calculate the image complexity and to verify its correlation with the subjective perception through experiments and correlation analysis.

**Keywords** Image complexity, Visual complexity, Scene complexity, Color complexity, Shape complexity, Texture complexity, Constitution theory, General set

与图像相关的复杂度的定义有很多,涉及到很多研究与应用领域。这些概念包括图像复杂度(Image Complexity)、视觉复杂度(Visual Complexity)和场景复杂度(Scene Complexity),其中图像复杂度又可以进一步细分为颜色复杂度(Color Complexity)、纹理复杂度(Shape Complexity)、形状复杂度(Texture Complexity)。

本文对以上这些复杂度的应用、定义和计算方法进行了归纳与总结,并依据组成论<sup>[1]</sup>中相关复杂度的定义,提出了一种研究图像复杂度的思路,即从图像组成元素的角度来研究图像复杂度。

到稿日期:2017-04-12 返修日期:2017-06-28      本文受国家自然科学基金资助项目:基于视觉注意和稀疏表示的行人检测与跟踪方法研究(61305042),河南省省部共建河南大学科研基金:基于内容的并行图像检索技术的研究(SBGJ090602)资助。

周 兵(1975—),男,博士,副教授,主要研究方向为数据挖掘及基于内容的图像检索,E-mail:zhoubl631@163.com;刘玉霞(1990—),女,硕士生,主要研究方向为图像处理,E-mail:1522153823@qq.com;杨欣欣(1977—),女,硕士,讲师,主要研究方向为模式识别,E-mail:yangxinxin38@163.com;刘 扬(1971—),男,博士,副教授,硕士生导师,CCF 会员,主要研究方向为媒体神经认知计算、时空信息高性能处理,E-mail:ly\_sci.art@gmail.com(通信作者)。

最常见的可视化图像特征有颜色、形状和纹理。根据组成论,如果能够找出这些图像特征的广义集<sup>[1]</sup>,就可以计算出这些图像特征的组成复杂度,从而获得图像复杂度的定量计算结果。

从图像组成角度来研究图像复杂度与人对图像复杂度的理解基本一致,并且这种复杂度的定义只与图像本身的特点有关。

本文第 1 节归纳了与图像相关的复杂度的研究和应用;第 2 节介绍了几种对图像复杂度内涵的解释;第 3 节总结了定量计算图像复杂度的方法;第 4 节提出了图像复杂度的研究方案;最后总结全文。

## 1 图像相关复杂度的研究领域

图像相关复杂度的研究领域很广泛,除了计算机科学领域中与图像处理相关的一些研究范畴(如目标识别、信息安全、图像分类/检索、图像压缩等)外,还延伸到了医学、认知心理学等研究领域(如医学图像处理、计算机美学、人机交互设计、车载仪器设计等)。

在目标识别领域,图像复杂度的功能之一是衡量目标识别算法的性能<sup>[2-4]</sup>。文献[2]以及文献[3-4]分别对目标识别和红外图像目标识别采用的图像复杂度定义进行了总结,体现了图像复杂度研究的重要意义。文献[5]利用图像复杂度,对比分析了手写字体的自动识别与人工识别的效果。文献[6]提出一种基于图像复杂度的自适应中文识别方法,其特点是根据图像复杂度的大小,从多种边缘检测算法中自动选择合适的算法,以弥补采用单一的边缘检测算法带来的不足,提高了中文识别的准确率。

在信息安全领域,很多信息隐写算法都通过分析图像复杂度来合适的水印嵌入区域或隐写区域<sup>[7-17]</sup>。因为图像复杂度表征的是图像内容的差异,与视觉感受有密切关系,所以把信息隐藏在不同复杂度的区域,视觉敏感性和视觉效果会大不相同<sup>[7]</sup>。这说明图像复杂度的改变也是影响信息隐藏不可感知性的一个重要因素,图像复杂度可以作为图像信息隐藏的客观评价指标。文献[9-10]就是利用图像复杂度来改进原始的基于 DCT 的水印算法。文献[14]认为除了用信息-隐藏比例来衡量隐写分析(Steganalysis)算法的性能之外,还要考虑图像复杂度。文献[15]根据纹理复杂度对图像进行分类,单独在每一类不同纹理复杂度的图像集上评估隐写分析算法的检测性能。文献[16]为了建立通用的信息隐藏实验图库,以便于对基于图像的信息隐藏算法进行评价,利用图像复杂度来对实验图像进行分类。

在图像分类和检索领域,可利用图像复杂度来对图像进行分类<sup>[18-19]</sup>或者衡量图像之间的相似度<sup>[20,22]</sup>。文献[21]将图像复杂度应用于高光谱卫星图像的大区域搜索,目的是找出其中存在的可能的人为活动迹象。

在计算机视频处理领域,可以利用图像复杂度来改进 H. 264 视频编码标准的速率控制算法。文献[23]依据图像复杂度来分配目标比特,可以降低速率控制错误,提高图像质量。文献[24-25]用图像纹理复杂度来改良帧速率上转换算法(Frame Rate Up-conversion Algorithm)。图像复杂度还可

以评价视频处理结果。传统的基于图像质量(Image Quality)的评价方法需要原始的视频信号,而基于图像复杂度的评价方法不需要原始视频信号<sup>[24]</sup>。

在图像压缩领域,图像复杂度可以用于决定压缩级别和带宽分配<sup>[27]</sup>,或者用于衡量压缩图像的客观图像质量,而且这种客观的图像质量衡量方法与人的主观感受是一致的<sup>[28]</sup>。

在医学图像处理领域,利用图像复杂度特征来分析医学图像中的纹理改变情况,描述病变区域的病理特征,实现疾病的诊断<sup>[29-32]</sup>。文献[33]研究了不同复杂度的结构性视觉刺激对大脑活动的影响。

在计算机视觉系统的研究中,文献[34]认为人类的视觉系统(Human Visual System,HVS)可以分析隐藏在图像中的微观结构,且可以判断图像的视觉复杂度(Visual Complexity)。若计算机视觉系统(Computer Vision Systems,CVS)拥有这种能力,将对很多领域如图像检索、数据隐藏等产生重大影响。文献[35]同样认为,分辨图像复杂度是人类视觉系统的一个基本概念,找到一种有效的衡量方法对于理解人的认知过程是很有帮助的,对很多相关研究也有促进作用。其实,在认知心理学领域也有很多关于图像复杂度或视觉复杂度的研究,并与计算机科学领域形成新的交叉学科研究,如计算机美学、人机交互界面设计等。

在认知心理学领域,对复杂度的研究侧重于两个方面:1)研究复杂度的表示。视觉复杂度包含多维度的感念<sup>[36]</sup>,可以用颜色、边界区域、像素亮度变化和图像压缩文件大小等图像特征来量化视觉复杂度,但找到合适的量化特征的难度还是比较大的<sup>[37]</sup>。文献[38]的研究发现,颜色并不是评价图像复杂度的一个有意义的属性。文献[39]的研究表明:边界检测特征与人的复杂度感受高度一致;另外,压缩误差也是很好的衡量复杂度的特征;多种特征的结合可以有效地获得与人的感受一致的复杂度结果。2)研究复杂度与注意力的关系。计算机科学家通常根据图像空间特性分析图像复杂度,而心理学家则对图像复杂度的时间特性更感兴趣(如注意力模型)<sup>[40]</sup>。热点图(Heat Map)或显著图(Saliency Map)的 JPEG 压缩率比原始图像的 JPEG 压缩率更符合人感受到的图像复杂性<sup>[41]</sup>。在扫视不同复杂度的图片时,图像复杂度和任务需求的相互作用是主要的影响因素<sup>[42]</sup>。同时,自然场景统计(Natural Scene Statistics)在人感受图像复杂度的过程中起到了中介作用(Mediational Role)<sup>[42]</sup>。文献[44]研究了新奇的抽象模型的视觉复杂度对注意力持续时间的影响。另外,文献[45]研究了视觉复杂度与网页可信度的关系,其通过两个实验表明了:1)用户更信任基于文本的高复杂度网页;2)基于图像的复杂度越高,信任度越低。

计算机美学研究认为美学价值与图像复杂度成正比,与处理复杂度(Processing Complexity)成反比<sup>[46]</sup>。这可以用于解释对称的图像被认为是美的这一理论。因为在相同图像复杂度下,对称图像是相似部分的重复,处理起来较简单<sup>[47]</sup>。而有目的地使设计复杂,可以提高产品的美学评价<sup>[48]</sup>。通过测试人对各种不同复杂度的图片的美的感受发现,视觉复杂度特征与人对美的期望有近似线性的关系<sup>[49]</sup>。这些研究可以指导人机交互界面设计。低视觉复杂度、高典型性(Proto-

typicality)的网页更吸引人<sup>[50]</sup>。面向儿童的网页主观美学评价发现,男孩更喜欢高复杂度的网页,而女孩喜欢中低复杂度的网页<sup>[51]</sup>。图像复杂度是影响界面可用性(Usability)的重要因素<sup>[52]</sup>。如果能够用图像的一些可计算特征来衡量人能够感受到的复杂度,那么就可以确定视觉复杂度对用户界面及用户美学评价、偏好、性能、易用性的影响<sup>[53]</sup>。实验发现,中等视觉复杂度或背景图片颜色对比度较高会使用户感到愉快<sup>[54]</sup>。而车载仪表组的视觉复杂度不应过高,否则会降低驾驶员处理视觉信息的能力<sup>[55]</sup>。在虚拟现实训练系统(Virtual Reality Training Systems)的研究中发现,与实际场景相似的视觉复杂度可以提高训练场景的学习效率<sup>[55]</sup>。

根据图像复杂度在以上研究领域中的应用可以发现,图像复杂度研究的主要有 3 点作用:1)作为一种评价指标,用于评价和改进算法的性能或衡量图像的质量;2)作为图像的一种特征,可以反映图像的视觉特性,用于目标识别、图像分类、信息隐写;3)作为人类视觉系统的基本概念,用于图像认知和计算机美学的研究。

## 2 图像复杂度的内涵

以上研究中提出了很多复杂度概念,包括图像复杂度(Image Complexity)、场景复杂度(Scene Complexity)、视觉复杂度(Visual Complexity)。其中,图像复杂度又可以进一步细分为纹理复杂度(Texture Complexity)、形状复杂度(Shape Complexity)和颜色复杂度(Color Complexity)。一般来说,从事计算机图像处理的专家习惯使用图像复杂度,以强调图像本身的客观的可以用某种特征衡量的复杂性。而认知学科研究领域的专家习惯使用视觉复杂度,以强调人主观感受到的图像的复杂性。也有很多研究将图像的某些客观特征与人感受的图像复杂性关联起来,使定量计算的图像复杂度符合人的主观复杂性感受。但是从研究对象或实验数据的角度来讲,这些研究都是针对图像(包括视频图像、照片、绘画)的,即使一些界面设计方面的研究,如网页设计的相关研究,其最终研究对象也是界面的截图。因此,本文将以上复杂度概念都统一为图像复杂度。

复杂度对于大多数人来说并不陌生,但它却没有一个统一、明确的定义。对于图像复杂度来说,由于其研究涉及到很多学科领域,不同的研究领域针对该领域关注的具体问题,对图像复杂度的内涵给出了不同的解释。

在目标识别领域,图像复杂度的含义就是找到实际目标的困难程度<sup>[2]</sup>。文献[36]提到,早期图像视觉复杂度研究者将复杂度定义为用文字描述一幅图像的困难程度。文献[44]提到,Snodgrass 和 Vanderwart 认为:图像视觉复杂度是图像中包含的详细信息难以理解的程度。针对一些网页,图像的复杂度被定义为元素的个数以及这些元素所传递的信息的详细程度<sup>[56]</sup>。文献[57]提到,早在 1928 年,Birkhoff 在其美学评价的研究中就提出美学的评价可以用秩序(Order)和复杂度(Complexity)的比例来定义,其中复杂度代表的是组成图像的元素个数。张学文在其组成论<sup>[1]</sup>的研究过程中认为“复杂程度就是定量计量客观事物组成状态的科学方法”“……描述物质状态组成的丰富程度的物理量”。本文认可图

像复杂度就是描述图像内容丰富程度的物理量这种复杂度的定义。图像内容越丰富,图像复杂度越大。这种图像复杂度的定义与前文的各种定义存在关联,它们在本质上是一致的。相同尺寸下,图像内容越丰富,意味着图像的组成成分越多,图像包含的各种元素(如对象、形状等)的数目越多,元素尺寸越小,因此越难以找到目标元素、描述图像内容以及记忆和理解图像。

另一方面,这种图像复杂度定义只与图像本身所包含的元素、内容有关,而与图像处理任务无关,因此,这种图像复杂度定义可以很好地衡量各种图像处理算法的性能,是一把公平的“尺子”。同时,这种图像复杂度定义符合一般意义下人对图像复杂性的感受和理解,因此这种图像复杂度定量计算的结果与人的主观感受一致。

本文在基于组成论的图像复杂度研究方案部分会进一步论证此观点。目前的一些研究成果可以证明这一点,我们也将将在其他文章中对其进行阐述。

## 3 定义图像复杂度的数学工具

本文侧重于如何定量计算图像复杂度,因此对以上研究中定量计算图像复杂度的数学理论和工具进行了分类说明。

### 3.1 基于统计方法的图像复杂度定义

这种定义主要是利用图像或图像的某个区域的灰度/颜色的统计信息来定义图像复杂度。最简单的是用整体图像的灰度标准差<sup>[2]</sup>、对比度<sup>[3]</sup>、信噪比<sup>[2]</sup>来定义图像复杂度,其他的则是在此基础上的改进。文献[2]在总结前人研究的基础上,提出用相邻区域的相对对比度来定义图像复杂度。文献[4]则提到有些红外目标识别方法用子图像的块内像素灰度值的变化<sup>[58]</sup>或者最大、最小方差<sup>[59]</sup>来衡量图像复杂度。文献[5]认为,在识别手写单词时,对比度和边界比较重要,因此用周长复杂度和图像密度来定义图像复杂度。图像密度指二值图像的黑色像素个数与总像素个数的比值;周长复杂度是内外周长的平方与黑色区域面积的比值。文献[6]统计了图像的灰度梯度变化密度、灰度级出现情况和边缘比率,然后加权求和得到图像复杂度。文献[26]基于二维 Kronrod 变分(Kronrod Variation)来定义图像复杂度,因为 Kronrod 变分可以反映图像的丰富度和形态特点。文献[35]基于颜色直方图、梯度方向直方图(Histogram of Gradient Orientation)、边界个数来定义图像复杂度。文献[37]结合人工实验的回归分析,基于金字塔分割(Pyramid Segmentation)后的颜色个数和像素灰度标准差建立了计算图像复杂度的经验公式。文献[60]利用灰度梯度的累加和作为图像复杂度,它反映了某个方向上的图像灰度的变化程度。文献[57]则是把图像分成若干小的区域,用所有区域的灰度的标准差来定义图像复杂度。

### 3.2 基于信息理论的图像复杂度定义

这种定义主要是利用信息理论中有关熵的概念来定义图像复杂度。文献[2]提到,早期的一些研究用灰度直方图的熵来定义图像复杂度。文献[3]也提到了几种基于信息理论的复杂度研究,如参考信息熵和灰度对比度定义图像复杂度<sup>[61]</sup>,以及几种使用加权信息熵的方法<sup>[62-63]</sup>。文献[7]把图像位平面的信息熵作为图像复杂度测度。文献[29-30]先将



图像转换成时间序列数据,然后利用时间序列的近似熵来衡量图像复杂度。文献[18]用 Kolmogorov 复杂度(Kolmogorov Complexity)来定义形状复杂度,但因为 Kolmogorov 复杂度无法计算,所以用全局距离分布(Global Distance Distribution)的熵和局部角度分布(Local Angle Distribution)的熵来进行计算。全局距离分布是所有形状上的点到其中心的距离分布,局部角度分布是边界点角度变化的分布。文献[40]用模糊熵距离(Fuzzy Entropic Distance)来衡量图像复杂度。首先,利用图像边界和离散对称变换(Discrete Symmetry Transform,DST)来提取兴趣点(Points of Interest)图像。归一化处理兴趣点图像后,再计算其模糊熵距离。文献[42]认为,不能仅用颜色直方图的熵来衡量图像复杂度,还需要考虑像素的分布。其先将图像分为若干局部区域,提取每个区域的红绿蓝分量、 $x$ - $y$  方向的灰度梯度、 $x-y$  方向的 Laplacian 算子结果,这些区域的特征向量构成一个格子图,此时计算格子图中一个节点到另一个节点随机游走(Random Walk)的概率,从而获得其平稳分布(Stationary Distribution)。得到每个节点的平稳分布后,利用信息熵公式计算其复杂度。文献[64]提出一种利用互信息(Mutual Information)和 Jensen Shannon 散度(Jensen Shannon Divergence)来计算图像复杂度的理论框架。其先将图像分割成若干区域,分割时使两个分割区域的互信息最大;然后计算这些区域的 Jensen-Shannon 散度,它代表图像组织复杂度(Image Compositional Complexity),可以理解图像的某个区域的空间异构性。

### 3.3 基于频域变换的图像复杂度定义

这种定义是利用图像某种频域变换后的特征参数来定义图像复杂度。文献[11]将原始图像分成若干 $8 \times 8$ 的小块,然后用小波变换后的低频平均值与高频平均值来衡量图像小块的复杂度。文献[14]用小波域的 GGD(Generalized Gaussian Distribution)形状参数来衡量图像复杂度。一般情况下,图像复杂度越高,GGD 的形状参数越高。文献[13]先用离散小波变换(Discrete Wavelet Transformation,DWT)对图像进行分解,然后使用 LH(水平低通和垂直高通)子波段的标准偏差代表局部复杂度,因为 LH 提供了图像的边界和细节信息。文献[16]在图像 DCT 变换域中,对图像各频率成分分别进行邻域差别计算,用人能够感知的差别的累计值来衡量图像复杂度。

### 3.4 基于共生矩阵的图像复杂度定义

这种定义是利用灰度共生矩阵的 5 个常用特征参数来衡量图像复杂度,一般用于衡量图像的纹理复杂度。这 5 个特征参数为:能量(energy)、熵(entropy)、对比度(contrast)、同质性(homogeneity)和相关性(correlation)。文献[10,12]利用图像灰度共生矩阵的熵来描述图像纹理复杂程度;文献[15]利用同质性来衡量图像复杂度;文献[34]利用以上 5 种特征来增强之前提出的一种 SND 特征空间,使图像复杂度的计算结果更接近人的主观评价,原有的 SND 特征空间包括边界、高斯噪音、折线的拐角个数;文献[65]则是综合利用了以上 5 种特征参数,通过 BP 神经网络来确定 5 种特征参数的权重。

### 3.5 基于图像压缩率的图像复杂度定义

这种定义是利用图像压缩算法的压缩率来衡量图像复杂度。为了能定量计算美学价值,文献[46]借鉴有损图像压缩算法,如 JPEG 压缩算法,用均方根误差除以压缩率代替图像复杂度,用分形图像压缩算法的压缩率代替处理复杂度。文献[41]主要研究热点图与图像复杂度的关系,用原始图像的 JPEG 压缩率、热点图的 JPEG 压缩率、显著性图的 JPEG 压缩率来衡量图像复杂度;文献[44]用 GIF 格式的图像压缩率来衡量图像复杂度;文献[48]用 ZIP 格式压缩后的图像文件大小来衡量复杂度。文献[27]提出了 3 种基于压缩的图像复杂度计算方法和一种基于空间信息(Spatial Information,SI)的图像复杂度计算方法,并对它们进行了对比研究。3 种基于压缩的方法分别为:无损压缩算法压缩率的倒数、有损压缩算法的均方根误差除以压缩率(与文献[46]一样)、有损压缩算法压缩率的倒数。空间信息的计算过程为:1)获得 Sobel 过滤的水平边界图  $S_h$  和垂直边界图  $S_v$ ;2)获得 SI 图像,  $SI_r = \sqrt{s_h^2 + s_v^2}$ ;3)计算 SI 图像的均值、均方根、标准偏差。实验发现 SI 图像的均值是较好地衡量图像复杂度的指标。文献[39]应用图像压缩误差和齐波夫定律(Zipf's law)来衡量图像视觉复杂度,具体过程为:1)首先将图像分解为 HSV 的 3 个灰度图,使 S 和 V 相乘得到一个新的 CS(colourfulness)灰度图;2)用 Canny 和 Sobel 算子对以上 4 个灰度图进行边界检测,得到垂直方向、水平方向、全方向的边界图,这样每个灰度图都有 6 个边界图;3)提取 4 个灰度图及其边界图的灰度平均和标准差、JPEG 和分形压缩的均方根误差与压缩文件大小的乘积、Zipf 的频率等级特征(Zipf rank frequency,该值基于像素灰度出现的频率计算)和 Zipf 的尺寸大小等级特征(Zipf size frequency,该值基于像素与其相邻像素灰度差异计算);4)计算人工评分与以上特征的 Spearman 相关系数(Spearman's correlation),发现所有特征的相关性都超过 0.75,同时发现采用边界检测技术可以大大增强特征的相关性;5)利用以上特征来训练神经网络,得到图像复杂度的预测模型。

### 3.6 基于其他理论的图像复杂度定义

文献[20]使用独立成分分析方法(Independent Component Analysis,ICA)<sup>[66]</sup>来计算复杂度,其实质是用数据的稀疏性来衡量复杂度。文献[21]评价光谱图像复杂度的思想基于地物的组成,地物组成类型越多,光谱范围越大,图像复杂度越高。复杂度的量化通过包围所有数据的凸集(convex set)的体积来进行计算。计算凸集体积的方法基于格拉姆矩阵(gram matrix approach)<sup>[67]</sup>。文献[23]用视频的运动向量来衡量图像复杂度,其值越大,图像转换得越快。文献[32]计算 CT 图像复杂度的过程为:1)统计光线经过的所有样本点的亮度平均值;2)以此为阈值,当两个区域的亮度差异超过该阈值时,区域变化的个数加 1;3)对图像包含的所有区域个数进行平均,得到复杂度。文献[68]使用分形维数来定义图像复杂度。文献[69]根据边缘层级的百分比(Edge Level Percentages)来计算图像复杂度,边缘层级是一个人辨别边缘时需要付出的注意力。文献[69]先用一种边缘分解算法,按照边缘层级,得到高、中、低 3 个边缘层级图像,然后用 3 个图像

的标准差的和来衡量图像复杂度。文献[70]认为,可以依据组成论<sup>[1]</sup>中的相关复杂性定律来描述图像复杂度,然后借助信息熵、纹理、边缘等相关因子来定量计算图像复杂度。文献[22]在文献[70]提出的图像复杂度的基础上,又增加了图像显著性和目标似然度两部分。显著性区域提取基于 DCT 系数稀疏编码的方法进行;目标似然度可以利用目标图像与场景图像的颜色直方图的反向投影图像计算得出。在本文的前期研究中,文献[71]针对彩色图像,利用主色个数、主色的空间平均分布以及子区域的平均相似度来计算彩色图像的复杂度;文献[72]同样根据组成论<sup>[1]</sup>,定义了颜色种类广义集和颜色空间分布广义集,然后根据这两个广义集的分布函数计算出了图像的颜色特征复杂度。

3.7 综合性的图像复杂度定义

综合性的图像复杂度定义就是运用以上多种数学工具来定义图像复杂度。文献[28]用灰度空间分布、灰度层级数量、对象数量来定义图像复杂度。灰度空间分布主要针对纹理,采用灰度共生矩阵的能量、对比度、关联度 3 个特征。灰度层级数量即每种灰度的像素数量,用信息熵特征表示。对象数量即目标数量,用目标的边界比率特征表示。最后用以上 5 个特征的加权 and 来表示图像复杂度。文献[38]利用 10 个特征来衡量图像复杂度,分别为灰度共生矩阵的对比度、灰度共生矩阵的同质性、边界密度(经过 Canny 算子得到的边界像素的灰度平均值)、特征拥塞(Feature Congestion)<sup>[73]</sup>、子波段熵<sup>[73]</sup>、JPEG 图像压缩率、区域个数(用 mean shift 算法计算)、颜色丰富度(CIELab 颜色空间下,大块像素颜色的平均值和标准差的线性组合)、颜色个数、颜色协调度(人感受的和谐颜色组合)<sup>[74]</sup>。然后针对以上 10 个特征,使用皮尔森相关系数法(Pearson Correlation Coefficient)、斯皮尔曼等级次序相关系数法(Spearman Rank-order Correlation Coefficient)与图像复杂度的人工评价进行相关性分析。文献[52]提出 4 个影响图像复杂度的因素:交互的个数;网页的功能元素,如链接、可以活动的界面元素(按钮、下拉列表等);高层结构的个数(图片、显示元素等);RGB 的信息熵的和。文献[53]用 9 个图像特征来衡量图像复杂度,即 RGB 颜色个数、颜色量化后的个数、多色调分色(Posterize,指定每个颜色分量的色调或亮度的级别,产生一种减色的效果)后的颜色个数、金字塔分割后的颜色个数、Canny 边界检测后的边界像素与非边界像素的比例、灰度的标准差、JPEG 文件的大小、PNG 文件的大小、GIF 文件的大小。最后依据人工实验结果进行回归分析,得到图像复杂度的经验公式。

4 基于组成论的图像复杂度研究方案

Purchase 等认为:要找到一种计算方法得到图像的客观复杂度比主观判断难得多,复杂度度量需要的特征非常多,想要找到合适的度量方法来描述图像的视觉复杂度,是具有挑战性的<sup>[37]</sup>。

本文认为,依据组成论<sup>[1]</sup>中相关复杂度的定义,研究图像本身包含的颜色、形状、纹理特征的复杂度,然后再综合得到图像复杂度是一个值得研究的方向。当然,也可以利用其他图像特征来研究图像复杂度的定义,如图像的遮挡、深度信

息、尺度信息等,但这些不在本文讨论的范围之内。

在本文前期的研究<sup>[72]</sup>中,借助组成论,已经提出了包含颜色种类复杂度和颜色空间分布复杂度的颜色特征复杂度的定义,按照类似的方法,也可以给出形状特征复杂度和纹理特征复杂度的定义。

根据组成论,定义复杂度的关键是定义合适的广义集合。本文给出的 3 种视觉特征的广义集方案如下。

1)颜色特征的广义集合

颜色特征包括颜色种类和颜色的空间分布,有两个广义集。

颜色种类特征的广义集如表 1 所列<sup>[72]</sup>,图像中的每个像素代表一个个体。像素的颜色为标记,标记值就是颜色值(如 RGB 颜色空间),这种颜色特征的广义集的分布函数与颜色直方图的含义是一致的。

表 1 颜色种类特征的广义集合  
Table 1 General set of color varieties

广义集合	个体名称	标志名称
一幅彩色图像的所有像素	图像中的一个像素	像素颜色值

表 1 中的颜色种类特征广义集只考虑了不同颜色的个数,但没有考虑颜色在图像中的空间分布。对于某种颜色来说,其在图像中的分布可以形成若干斑块,每个斑块就是这种颜色的一个连通域,因此可以用连通域作为标记,从而形成空间分布的广义集,如表 2 所列<sup>[72]</sup>。

表 2 特定颜色空间分布的广义集合  
Table 2 General set of color distributions

广义集合	个体名称	标志名称
图像中具有某种颜色值的所有像素	该颜色的一个像素	连通域编号

将以上两种广义集结合起来,依据其分布函数,就可以通过组成论的复杂度公式计算出颜色特征的复杂度。这种颜色特征复杂度反映了图像中不同颜色的丰富程度(即颜色数目),也反映了颜色空间分布的丰富程度(即颜色斑块数目)。

2)形状特征的广义集合

形状特征的广义集如表 3 所列。经过形状特征提取后,所有形状特征(如边界)包含的像素组成一个广义集,一个像素是一个个体,而该像素所属的形状特征为标记值。

表 3 形状特征的广义集合  
Table 3 General set of shapes

广义集合	个体名称	标志名称
所有形状特征包含的所有像素	一个像素	形状特征编号

通过这个广义集得到的形状特征复杂度仅仅反映了图像中有多少个形状,也就是形状的丰富程度,没有考虑单个形状本身的复杂性,如何定量描述圆形和五角形这两种形状的复杂度尚待解决。

定量度量单独形状의复杂度需要结合人对形状的理解,可以依据形状曲率变化或者边线角度变化等来度量。

3)纹理特征的广义集合

纹理特征反映的是颜色或者形状在空间分布上的某种规律,纹理一般可以分为规则纹理和不规则纹理。规则纹理一般由一些纹理基元按照某种规律排列形成,如人工印染的布

匹;不规则纹理没有明显的基元,只是从图像整体来看,颜色或者形状在空间上存在相似性的重复,如木材的木纹。对这两种纹理,分以下两种情况处理。

①有纹理基元的情况

每个纹理基元代表一个标记,所有纹理基元包含的像素构成一个广义集,如表 4 所列。

表 4 纹理基元的广义集合

Table 4 General set of texture primitives

广义集合	个体名称	标志名称
所有纹理基元包含的所有像素	一个像素	纹理基元编号

通过纹理基元广义集得到的纹理特征复杂度反映了图像中有多少个纹理基元,也就是纹理基元的丰富程度,除此之外,还需要分析单个纹理基元的复杂度。因为一个纹理基元就是一个小图像,可以利用前面的颜色和形状特征来分析其复杂度。这样就可以得到整个纹理图像的复杂度。

②没有纹理基元的情况

纹理特征与颜色特征、形状特征是正相关的,不同点在于纹理反映了颜色和形状在空间分布上的规律,这个规律可以通过灰度(可以扩展到颜色)共生矩阵表现出来,而一个灰度共生矩阵其实就是一个广义集。按照广义集的复杂程度公式计算出来的复杂度与灰度共生矩阵的熵是成正比的,因为“从广义集合引出的  $N$  个个体的复杂程度与信息论中引入的一次抽样时结局的信息熵是成正比例关系的两个物理量,其比例系数是个体总数  $N^{1/[1]}$ ,所以结合颜色特征复杂度、形状特征复杂度和灰度共生矩阵复杂度就可以描述整个纹理图像的复杂度。

根据以上 3 种视觉特征的广义集,可以计算出图像复杂度。本文后续的研究就是基于这种思路,配合人工问卷调查,通过人工实验与复杂度计算结果的相关性分析<sup>[38]</sup>,来验证图像复杂度计算结果是否与人的感受一致。

**结束语** 图像复杂度在多个领域中均有应用,本文对这些图像复杂度的应用、内涵以及数学定义方法进行了总结,并且提出了依据组成论中相关复杂度的定义来研究图像复杂度的思路。

参 考 文 献

[1] 张学文.组成论[M].合肥:中国科学技术大学出版社,2003.

[2] PETERS I R A,STRICKLAND R N. Image Complexity Metrics for Automatic Target Recognizers[C]// Automatic Target Recognizer System and Technology Conference, Naval Surface Warfare Center. Silver Spring,MD,1990:1-17.

[3] QIAO L Y,XU L X,GAO M. Survey of Image Complexity Metrics for Infrared Target Recognition[J]. Infrared Technology, 2013,35(2):88-96. (in Chinese)

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.

[4] LIU Y. Review of Infrared Image Complexity Evaluation Method[J]. Aero Weaponry,2014(3):51-54. (in Chinese)

刘毅.红外图像复杂度评估方法综述[J]. 航空兵器,2014(3):51-54.

[5] RUSU A,GOVINDARAJU V. The Influence of Image Com-

plexity on Handwriting Recognition[C]// Tenth International Workshop on Frontiers in Handwriting Recognition. La Baule (France),Suvisoft,2006:1-6.

[6] LI M,BAI M. A mixed edge based text detection method by applying image complexity analysis[C]// Intelligent Control and Automation. IEEE,2012:4809-4814.

[7] GUO Y B,YOU X G,ZHANG C T,et al. Study of Image Bit-Plane Complexity in the Information Hiding[J]. Acta Electronica Sinica,2006,34(6):1048-1052. (in Chinese)

郭云彪,尤新刚,张春田,等.面向信息隐藏的图像复杂度研究[J]. 电子学报,2006,34(6):1048-1052.

[8] FENG X G,ZHOU Q. Information Hiding of Satellite Remote Image Based on Image Complexity Classification[J]. Journal of Astronautics,2010,31(7):1000-1328. (in Chinese)

冯新岗,周论.基于图像复杂度分类的卫星遥感图像信息隐藏[J]. 宇航学报,2010,31(7):1000-1328.

[9] WANG J,WANG B. Image Watermark Algorithm Based on DCT Domain and Texture Complexity[J]. Computer Engineering,2010,31(7):1000-1328. (in Chinese)

王静,王冰.基于DCT域和纹理复杂度的图像水印算法[J]. 计算机工程,2011,37(18):1000-3428.

[10] HU X G,WANG Y. Watermarking Algorithm Based on Complexity of Image[J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2012,33(5):1000-1220. (in Chinese)

胡学刚,王月.基于图像复杂度的数字水印算法[J]. 小型微型计算机系统,2012,33(5):1000-1220.

[11] PAN F,LI J,YANG X Y,et al. Image steganography using complexity analysis[J]. Application Research of Computers, 2011,28(7):2712-2714. (in Chinese)

潘峰,李军,杨晓元,等.基于图像复杂度的隐写方法研究[J]. 计算机应用研究,2011,28(7):2712-2714.

[12] XIAO Z J,TIAN S J,CHEN H. Wavelet Domain Digital Watermarking Algorithm Based on Image Texture Complexity[J]. Computer Engineering,2014,40(6):1000-3428. (in Chinese)

肖振久,田淑娇,陈虹.基于图像纹理复杂度的小波域数字水印算法[J]. 计算机工程,2014,40(6):1000-3428.

[13] CARVAJAL-GAMEZ B E,GALLEGOS-FUNES F J,ROSALES-SILVA A J. Color local complexity estimation based steganographic (CLCES) method[J]. Expert Systems with Applications,2013,40(4):1132-1142.

[14] LIU Q Z,SUNG A H,RIBEIRO B,et al. Image complexity and feature mining for steganalysis of least significant bit matching steganography[J]. Information Sciences,2008,178(1):21-36.

[15] DENG G,ZHAO X F,HUANG W,et al. Image Texture Complexity Estimation Approach for Steganography Evaluation[J]. Computer Engineering,2012,38(14):1000-3428. (in Chinese)

邓果,赵险峰,黄炜,等.一种用于隐写测评的图像纹理复杂度估计方法[J]. 计算机工程,2012,38(14):1000-3428.

[16] QIAN S J,ZHANG H,HE D Q. Image Library building in information hiding research[J]. Journal of PLA University of Science and Technology(Natural Science Edition),2010,11(1):26-30. (in Chinese)

钱思进,张恒,何德全.基于图像视觉复杂度计算的分类信息隐藏图像库[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版),2010,11(1):26-30.



- [17] WANG R, PING X J. Research on Blind Detection Based on Image Content[J]. Journal of Computer-Aided Design and Computer Graphics, 2010, 22(9): 1606-1612. (in Chinese)  
汪然, 平西建. 基于图像纹理复杂度和奇异值分解的重采样检测[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2010, 22(9): 1606-1612.
- [18] CHEN Y P, SUNDARAM H. Estimating complexity of 2D shapes[C] // 7th Workshop on Multimedia Signal Processing. IEEE, 2005: 1-4.
- [19] SU H, BOURIDANE A, CROOKES D. Scale Adaptive Complexity Measure of 2D Shapes[C] // International Conference on Pattern Recognition. IEEE Computer Society, 2006: 134-137.
- [20] PERKI, JUKKA, RINEN A. Modelling Image Complexity by Independent Component Analysis, with Application to Content-Based Image Retrieval[C] // International Conference on Artificial Neural Networks. Springer-Verlag, 2009: 704-714.
- [21] MESSINGER D W, ZIEMANN A K, SCHLAMM A, et al. Metrics of spectral image complexity with application to large area search[J]. Optical Engineering, 2012, 51(3): 6201.
- [22] MA Z W, JIN X F. Research on target method for mobile robot base on scene complexity[J]. Journal of Yanbian University (Natural Science), 2012, 38(2): 158-162. (in Chinese)  
马志伟, 金小峰. 基于场景复杂度的移动机器人目标搜索方法的研究[J]. 延边大学学报(自然科学版), 2012, 38(2): 158-162.
- [23] LI Z, CHEN L. Novel Rate Control Algorithm Based on Image Complexity and Motion Information on H. 264[C] // Seventh International Conference on Image and Graphics. IEEE Computer Society, 2013: 19-22.
- [24] LEE K, JEONG J. Bilateral frame rate up-conversion algorithm based on image texture complexity compensation[J]. Electronics Letters, 2015, 51(16): 1245-1247.
- [25] LEE K, JEONG J. Bilateral frame rate up-conversion algorithm based on the comparison of texture complexity[J]. Electronics Letters, 2016, 52(5): 354-355.
- [26] CHOCHIA P A, MILUKOVA O P. Comparison of Two\_Dimensional Variations in the Context of the Digital Image Complexity Assessment[J]. Journal of Communications Technology and Electronics, 2015, 60(12): 1432-1440.
- [27] YU H, WINKLER S. Image complexity and spatial information [C] // Fifth International Workshop on Quality of Multimedia Experience. IEEE, 2013: 12-17.
- [28] YANG S, GAO P, MENG F, et al. Objective Image Quality Assessment based on Image Complexity and Color Similarity[C] // Fourth World Congress on Software Engineering. IEEE, 2013: 5-9.
- [29] WANG J, LUO Y, LI D Y, et al. Fatty liver diagnosed by B-mode ultrasonography based on the complexity analysis[J]. Chinese Journal of Medical Imaging Technology, 2006, 22(1): 135-138. (in Chinese)  
王娇, 罗燕, 李德玉, 等. B超图像复杂性特征分析方法诊断脂肪肝[J]. 中国医学影像技术, 2006, 22(1): 135-138.
- [30] LIU Q H, FANG Q H. Diagnosis of Cervicitis Based on the Image Complexity Analysis[J]. Medical Information, 2007, 20(5): 703-706. (in Chinese)  
刘清华, 房庆海. 基于图像复杂性特征分析的宫颈炎诊断[J]. 医学信息, 2007, 20(5): 703-706.
- [31] SERGEYEV D V, OSTANIN S A. Software Package for Evaluation of Medical Image Complexity[J]. Biomedical Engineering, 2014, 48(1): 45-48.
- [32] JUN S S, HA O K. Complexity Evaluation of CT-Images for GPU-Based Volume Rendering[C] // International Conference on U- and E- Service, Science and Technology. IEEE, 2015: 18-21.
- [33] JASKUŁA B, SZKOŁA J, PANCERZK. Towards determining syntactic complexity of visual stimuli used in art therapy[C] // Computer Science and Information Systems. IEEE, 2013: 219-223.
- [34] ILIYASU A M, AL-ASMARI A K, ABDELWAHAB M A, et al. Mining visual complexity of images based on an enhanced feature space representation[C] // 8th International Symposium on Intelligent Signal Processing. IEEE, 2013: 65-70.
- [35] YIN KY, WANG L B, GUO Y W. Fusing Multiple Visual Features for Image Complexity Evaluation[C] // Pacific-rim Conference on Advances in Multimedia Information Processing, LNCS 8294. 2013: 308-317.
- [36] OLIVA A, MACK M L, SHRESTHA M, et al. Identifying the perceptual dimensions of visual complexity of scenes[J]. Proc. Annual Meeting of the Cognitive Science Society, 2017, 3(49): 1041-1046.
- [37] PURCHASE H C, FREEMAN E, HAMER J. Predicting Visual Complexity[C] // Proceedings of the 3rd International Conference on Appearance, Edinburgh. UK, IEEE, 2012: 62-65.
- [38] CIOCCA G, CORCHS S, GASPARINI F, et al. Does Color Influence Image Complexity Perception? [M] // Computational Color Imaging. Springer International Publishing, 2015: 139-148.
- [39] MACHADO P, ROMERO J, NADAL M, et al. Computerized measures of visual complexity[J]. Acta Psychologica, 2015, 160 (September 2015): 43-57.
- [40] CARDACI M, GESU V D, PETROU M, et al. A fuzzy approach to the evaluation of image complexity[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2009, 160(10): 1474-1484.
- [41] SILVA M P D, COURBOULAY V, ESTRAILLIER P. Image complexity measure based on visual attention[C] // International Conference on Image Processing. IEEE, 2011: 3281-3284.
- [42] BONEV B, CHUANG L L, ESCOLANO F. How do image complexity, task demands and looking biases influence human gaze behavior? [J]. Pattern Recognition Letters, 2013, 34(7): 723-730.
- [43] GAUVRIT N, SOLER-TOSCANO F, ZENIL H. Natural scene statistics mediate the perception of image complexity[J]. Visual Cognition, 2014, 22(8): 1084-1091.
- [44] PALUMBO L, OGDEN, MAKIN R, et al. Examining visual complexity and its influence on perceived duration[J]. Journal of Vision, 2014, 14(14): 1-18.
- [45] TSENG K T, TSENG Y C. The Correlation between Visual Complexity and User Trust in On-line Shopping: Implications for Design[C] // International Conference, Hci International. 2014: 90-99.
- [46] MACHADO P, CARDOSO A. Computing Aesthetics[M] //

Advances in Artificial Intelligence. Springer Berlin Heidelberg, 1998;219-229.

[47] CHEN C C, WU J H, WU C C. Reduction of Image Complexity Explains Aesthetic Preference for Symmetry [J]. Symmetry, 2011,3(3):443-456.

[48] MAYER S, LANDWEHR J R. When Complexity is Symmetric: The Interplay of Two Core Determinants of Visual Aesthetics [C]//Advances in Consumer Research. 2014;608-609.

[49] SUN L, YAMASAKI T, AIZAWA K. Relationship Between Visual Complexity and Aesthetics: Application to Beauty Prediction of Photos [M] // Computer Vision - ECCV 2014 Workshops. Springer International Publishing, 2014;20-34.

[50] TUCH A N, PRESSLABER E E, STOCKLIN M, et al. The role of visual complexity and prototypicality regarding first impression of websites; Working towards understanding aesthetic judgments [J]. International Journal of Human-Computer Studies, 2012,70(11):794-811.

[51] WANG H F. Picture perfect: Girls' and boys' preferences towards visual complexity in children's websites [J]. Computers in Human Behavior, 2014,31(1):551-557.

[52] STICKEL C, EBNER M, HOLZINGER A. The XAOS Metric - Understanding Visual Complexity as Measure of Usability [C]// Hci in Work and Learning, Life and Leisure-Symposium of the Workgroup Human-Computer Interaction and Usability Engineering. Austria, DBLP, 2010;278-290.

[53] PURCHASE H C, FREEMAN E, HAMER J. An Exploration of Visual Complexity [M] // Diagrammatic Representation and Inference. Springer Berlin Heidelberg, 2012;200-213.

[54] LIN S W, LO L Y S, HUANG T K. Visual Complexity and Figure-Background Color Contrast of E-Commerce Websites: Effects on Consumers' Emotional Responses [C] // Hawaii International Conference on System Sciences. IEEE Computer Society, 2016;3594-3603.

[55] YOON S H, LIM J, JI Y G. Assessment model for perceived visual complexity of automotive instrument cluster [J]. Applied Ergonomics, 2014,46;76-83.

[56] WU K, VASSILEVA J, ZHAO Y, et al. Complexity or simplicity? Designing product pictures for advertising in online marketplaces [J]. Journal of Retailing & Consumer Services, 2016,28:17-27.

[57] LOU D C, WU N I, WANG C M, et al. A novel adaptive steganography based on local complexity and human vision sensitivity [J]. Journal of Systems and Software, 2010,83(7):1236-1248.

[58] ZHANG Y H, LI Y. Image Digital Watermarking Hiding Method Based on Statistics [J]. Journal of Natural Science of Heilongjiang University, 2001,10(1):62-63. (in Chinese)

张友华,李扬. 基于统计的图像数字水印隐藏方法 [J]. 计算机系统应用, 2001,10(1):62-63.

[59] WANG P, SUN J Y, JU X N. Criteria for FLIR Image Quality Assessment [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2012,32(1):53-56. (in Chinese)

王鹏,孙继银,巨西诺. 前视红外图像质量评价指标研究 [J]. 弹箭与制导学报, 2012,32(1):53-56.

[60] LI X, WU Q, KOU Y, et al. Driver's Eyes State Detection Based on Adaboost Algorithm and Image Complexity [C] // International Conference on Intelligent Systems Design & Engineering Applications. IEEE, 2015;349-352.

[61] 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. (in Chinese)

黄康,毛侠,胡海勇,等. 复杂背景下红外弱小运动目标检测的新方法 [J]. 航空学报, 2009,30(9):1754-1760.

[62] YANG L, YANG J, YANG K. Adaptive detection for infrared small target under sea-sky complex background [J]. Electronics Letters, 2004,40(17):1083-1085.

[63] YANG L, ZHOU Y, YANG J, et al. Variance WIE based infrared images processing [J]. Electronics Letters, 2006,42(15):1-2.

[64] RIGAU J, FEIXAS M, SBERT M. An Information-Theoretic Framework for Image Complexity [C] // Eurographics Workshop on Computational Aesthetics in Graphics Visualization & Imaging, DBLP. 2005;177-184.

[65] CHEN Y Q, DUAN J, ZHU Y, et al. Research on the image complexity based on texture features [J]. Chinese Optics, 2015,8(3):407-414. (in Chinese)

陈燕芹,段锦,祝勇,等. 基于纹理特征的图像复杂度研究 [J]. 中国光学, 2015,8(3):407-414.

[66] STONE J V. Independent Component Analysis [M]. Springer US, 1998.

[67] SAUL L K, ROWEIS S T. Think globally, fit locally: unsupervised learning of low dimensional manifolds [J]. J Machine Learning Research, 2004,4(2):119-155.

[68] ZHUANG X, MASTORAKIS N E. Multi-Feature Edge Detection with the Feature of Local Image Complexity [C] // Proceedings of the 5th WSEAS Int. Conf. on Signal Processing, Computational Geometry & Artificial Vision. 2005;128-135.

[69] MARIO I, CHACON M, ALMA D, et al. Image complexity measure: a human criterion free approach [C] // Nafips 2005 Meeting of the North American. Fuzzy Information Processing Society, 2005;241-246.

[70] GAO Z Y, YANG X M, GONG J M, et al. Research on Image Complexity Description Methods [J]. Journal of image and Graphics, 2010,15(1):129-135. (in Chinese)

高振宇,杨晓梅,龚剑明,等. 图像复杂度描述方法研究 [J]. 中国图象图形学报, 2010,15(1):129-135.

[71] ZHOU B, YANG X X. A Definition of the Feature Complexity for Color Image [J]. Journal of Henan University (Natural Science), 2010,40(2):185-188,212. (in Chinese)

周兵,杨欣欣. 一种彩色图像特征复杂度的定义 [J]. 河南大学学报(自然科学版), 2010,40(2):185-188,212.

[72] ZHOU B, XU S, YANG X X. Computing the Color Complexity of Images [C] // 12th International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD'15). IEEE, 2015;1942-1946.

[73] ROSENHOLTZ R, LI Y, NAKANO L. Measuring visual clutter [J]. Journal of Vision, 2007,7(2):17.

[74] SOLLI M, LENZ R. Color harmony for image indexing [C] // 12th International Conference on Computer Vision Workshops. IEEE, 2009;1885-1892.