



JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS

主办：中国科学院遥感与数字地球研究所
中国图象图形学学会
北京应用物理与计算数学研究所

中国图象图形学报

2015
03
VOL.20

ISSN1006-8961
CN11-3758/TB

非真实感图像处理 P437





第20卷第3期（总第227期）

2015年3月16日

中国精品科技期刊
中国国际影响力优秀学术期刊
中国科技核心期刊

版权声明

凡向《中国图象图形学报》投稿，均视为同意在本刊网站及CNKI等全文数据库出版，所刊载论文已获得著作权人的授权。本刊所有图片均为非商业目的使用，所有内容，未经许可，不得转载或以其他方式使用。

Copyright

All rights reserved by Journal of Image and Graphics, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS. The content (including but not limited text, photo, etc) published in this journal is for non-commercial use.

主管单位 中国科学院

主办单位 中国科学院遥感与数字地球研究所

中国图象图形学学会

北京应用物理与计算数学研究所

主 编 李小文

编辑出版《中国图象图形学报》编辑出版委员会

邮政信箱 北京9718信箱

邮 编 100101

电子信箱 jig@radi.ac.cn

电 话 010-64807995

网 址 www.cjig.cn

广告经营许可证 京朝工商广字第0361号

总 发 行 北京报刊发行局

订 购 全国各地邮局

海外发行 中国国际图书贸易集团有限公司

（邮政信箱：北京399信箱 邮编：100048）

印刷装订 北京科信印刷有限公司

Journal of Image and Graphics

Title inscription: Song Jian

Monthly, Started in 1996

Superintended by Chinese Academy of Sciences

Sponsored by Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS

China Society of Image and Graphics

Institute of Applied Physics and Computational Mathematics

Editor-in-Chief LI Xiaowen

Editor, Publisher Editorial and Publishing Board of Journal of Image and Graphics

P.O.Box 9718, Beijing, P.R.China

Zip code 100101

E-mail jig@radi.ac.cn

Telephone 010-64807995

Website www.cjig.cn

Distributed by Beijing Bureau for Distribution of Newspapers and Journals

Domestic All Local Post Offices in China

Overseas China International Book Trading Corporation
(P.O.Box 399, Beijing 100048, P.R.China))

Printed by Beijing Kexin Printing Co., Ltd.

CN 11-3758/TB

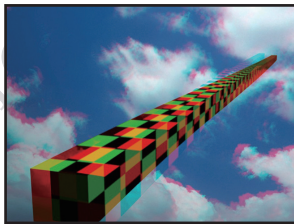
ISSN 1006-8961

CODEN ZTTXFZ

国外发行代号 M1406

国内邮发代号 82-831

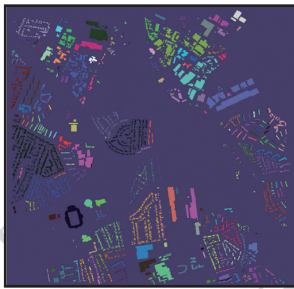
国内定价 50.00元



实时立体视觉系统中的深度映射(第0366页)



基于辐照度的运动模糊图像去模糊(第0395页)



面向智慧城市的3维城市在线可视化(第0445页)

综述

面向血管疾病诊断及预测分析的血流动力学模拟综述

徐梦佳, 杨金柱, 赵宏, 赵大哲 0297

图像处理和编码

多特征融合的车辆阴影消除

邱一川, 张亚英, 刘春梅 0311

图像分析和识别

基于局部时空特征方向加权的人体行为识别

李俊峰, 张飞燕 0320

对表情鲁棒的面部轮廓线3维人脸识别

常朋朋, 达飞鹏, 梅俊 0332

融合双层信息的显著性检测

姜霞霞, 李宗民, 匡振中, 刘玉杰 0340

面向动摄像机的高速运动目标检测

穆春迪, 谢剑斌, 闫玮, 刘通, 李沛秦 0349

匹配滤波在SAR目标单个散射部件检测中的应用

丁柏圆, 文贡坚, 钟金荣, 马聪慧 0357

图像理解和计算机视觉

实时立体视觉系统中的深度映射

李大锦, 白成杰 0366

遥感图像处理

GPU支持的SAR影像几何校正大规模并行处理

杨景辉, 程春泉, 张继贤, 黄国满 0374

基于正则化约束的遥感图像多尺度去模糊

谭海鹏, 曾炫杰, 牛四杰, 陈强, 孙权森 0386

第十届中国计算机图形学大会专栏

基于辐照度的运动模糊图像去模糊

方贤勇, 阚未然, 周健, 李黎, 郭延文 0395

对比度、颜色一致性和灰度像素保持的消色算法

王勋, 罗婷婷, 刘春晓, 彭浩宇 0408

结合因子图的多目的地地图布局优化

罗振珊, 张俊松, 范接鹏 0418

高阶连续的形状可调三角多项式曲线曲面

严兰兰, 韩旭里 0427

改进的自然图像铅笔画效果生成

黄志勇, 姚远, 张晶晶, 马凯, 任东 0437

面向智慧城市的3维城市在线可视化

潘斌, 郭小明, 陈明明, 陈为, 彭群生 0445

CONTENTS

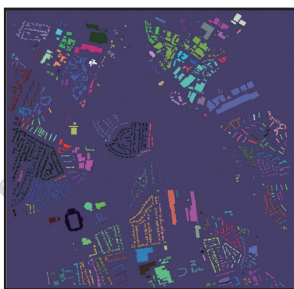
JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS



Depth mapping in real-time stereoscopic systems (P0366)



Deblurring of motion blurred images based on the irradiance(P0395)



Online 3D city visualization for smarter cities(P0445)

Review

Survey of hemodynamics simulation for diagnosis and prediction in vascular disease

Xu Mengjia, Yang Jinzhu, Zhao Hong, Zhao Dazhe 0297

Image Processing and Coding

Vehicle shadow removal with multi-feature fusion

Qiu Yichuan, Zhang Yaying, Liu Chunmei 0311

Image Analysis and Recognition

Human behavior recognition based on directional weighting local space-time features

Li Junfeng, Zhang Feiyan 0320

Expression-robustness 3D face recognition based on facial profiles

Chang Pengpeng, Da Feipeng, Mei Jun 0332

Image saliency detection based on two-layer information fusion

Jiang Xiaxia, Li Zongmin, Kuang Zhenzhong, Liu Yujie 0340

Detecting high-speed moving targets in moving camera environments

Mu Chundi, Xie Jianbin, Yan Wei, Liu Tong, Li Peiqin 0349

The application of matched filter in detecting single scattering parts of SAR targets

Ding Boyuan, Wen Gongjian, Zhong Jinrong, Ma Conghui 0357

Image Understanding and Computer Vision

Depth mapping in real-time stereoscopic systems

Li Dajin, Bai Chengjie 0366

Remote Sensing Image Processing

GPU supported massively parallel processing for geometric correction of SAR imagery

Yang Jinghui, Cheng Chunquan, Zhang Jixian, Huang Guoman 0374

Remote sensing image multi-scale deblurring based on regularization constraint

Tan Haipeng, Zeng Xuanjie, Niu Sijie, Chen Qiang, Sun Quansen 0386

Column of Chinagraph'2014

Deblurring of motion blurred images based on the irradiance

Fang Xianying, Kan Weiran, Zhou Jian, Li Li, Guo Yanwen 0395

Decolorization with contrast, color consistency and grayscale pixel preservation

Wang Xun, Luo Tingting, Liu Chunxiao, Peng Haoyu 0408

Synthesizing multi-destinations map with factor graph

Luo Zhenshan, Zhang Junsong, Fan Jiepeng 0418

Higher-order continuous shape adjustable trigonometric polynomial curve and surface

Yan Lanlan, Han Xuli 0427

Improved algorithm for natural image pencil drawing production

Huang Zhiyong, Yao Yuan, Zhang Jingjing, Ma Kai, Ren Dong 0437

Online 3D city visualization for smarter cities

Pan Bin, Guo Xiaoming, Chen Mingming, Chen Wei, Peng Qunsheng 0445

中图分类号: TP301 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2015)03-0340-09

论文引用格式: Jiang X X, Li Z M, Kuang Z Z, Liu Y J. Image saliency detection based on two-layer information fusion[J]. Journal of Image and Graphics, 2015, 20(3): 0340-0348. [姜霞霞, 李宗民, 匡振中, 刘玉杰. 融合双层信息的显著性检测[J]. 中国图象图形学报, 2015, 20(3): 0340-0348.] [DOI:10.11834/jig.20150305]

融合双层信息的显著性检测

姜霞霞¹, 李宗民^{1,2}, 匡振中², 刘玉杰¹

1. 中国石油大学(华东)计算机与通信工程学院, 青岛 266580; 2. 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 青岛 266580

摘要: 目的 针对已有工作在颜色及结构显著性描述方面的缺陷, 提出一种新的图像显著性检测方法。方法 本文方法在不同的图像区域表达上从颜色与空间结构角度计算图像的显著性, 充分考虑图像的特征与像素聚类方式之间的适应性。首先, 根据颜色复杂度、边缘与连通性等信息, 将图像从像素空间映射到双层区域表示空间。然后, 根据两个层次空间的特性, 与每个图像区域的边界特性, 计算图像的结构和颜色显著度。最后, 由于不同图像表示中的显著性信息存在互补性, 将所有这些信息进行融合得到最终的显著性图。结果 在公认的 MSRA-1000 数据集上验证本文方法并与目前国际上流行的方法进行对比。实验结果表明, 本文方法在精确率、召回率以及绝对误差(分别为 75.03%、89.39%、85.61%)等方面要优于当前前沿的方法。结论 提出了一种融合双层信息的显著性检测算法。根据图像本身信息控制区域数目构建图像双层表示, 提高了方法的普适性; 利用图像不同层次的特性从不同角度计算显著性, 增强了方法鲁棒性。

关键词: 显著性检测; 双层表示; 颜色; 空间结构

Image saliency detection based on two-layer information fusion

Jiang Xiaxia¹, Li Zongmin^{1,2}, Kuang Zhenzhong², Liu Yujie¹

1. College of Computer and Communication Engineering, China University of Petroleum (Huadong), Qingdao 266580, China;

2. School of Geosciences, China University of Petroleum (Huadong), Qingdao 266580, China

Abstract: **Objective** Image saliency detection is a method used to eliminate the redundant image information. Moreover, this method is used in many computer vision applications, such as adaptive compression of images, content-aware image editing, and image retrieval. In this study, a new image saliency detection method is proposed to compute for image saliency from different perspectives. In fact, many methods are used to compute for saliency, and most of these approaches use different types of features to detect saliency in single regional representation. However, only a few methods consider the adaptability between the feature and image representation. **Method** According to the different characters of different types of regional representations, we compute image saliency from different angles by using a wide variety of information, including color. The method consists of three basic steps. First, the image is mapped from the pixel space to a two-layer regional representation space on the basis of connectivity and edge information. The first layer is related to the spatial structure of the image, whereas the second one is superior in describing color information. Then, on the basis of the diverse properties of

收稿日期: 2014-08-13; 修回日期: 2014-10-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(61379106); 山东省中青年科学家奖励基金项目(BS2010DX037); 山东省自然科学基金项目(ZR2009GL014, ZR2013FM036); 浙江大学 CAD&CG 国家重点实验室开放课题(A1315); 中央高校基本科研基金项目(13CX06007A, 14CX06010A, 14CX06012A); 中国石油大学(华东)研究生创新工程(YCX2014066)

第一作者简介: 姜霞霞(1988—), 女, 中国石油大学(华东)计算机科学与技术专业硕士研究生, 主要研究领域为计算机图形学与图像处理。E-mail: jiangxiaxia@gmail.com

Supported by: National Natural Science Foundation of China (61379106); Project supported by the Natural Science Foundation of Shandong Province, China (ZR2009GL014, ZR2013FM036)

the constructed two-layer representations, we adopt a number of features to abstract image saliency. In the first layer, we use the spatial distribution of region in the image and the structure feature to obtain the spatial structure saliency. In the second layer, we use the color feature to compute for color saliency. Given the complementarity between the two kinds of saliency, the last step is to integrate the two kinds to obtain the final saliency map. In practice, color saliency has higher significance and discriminative power than spatial structure saliency. Thus, we use an exponential function to combine the two kinds of saliency while highlighting color saliency. In addition, the boundary prior is also a reasonable and popular method for enhancing saliency detection and has thus been widely used for image saliency detection. In contrast to existing methods that set a region containing boundary pixels directly to the background, we employ the percentage of boundary pixels in each region to adjust saliency values. **Result** Given that the extracted saliency clues correspond to the attributes of the local image regions quite well, our method has several advantages over existing methods. To verify the efficiency of the proposed method, experiments are performed using the MSRA-1000 dataset, which is one of the largest publicly available datasets. Results show that our method outperforms state-of-the-art methods in terms of precision, recall, F-measure, and mean absolute error. **Conclusion** Image saliency detection is a promising approach in the field of image processing and analysis. This study presents a new saliency detection method based on two-layer regional representation through both color saliency and spatial structure saliency. Experimental evaluation results suggest that our method outperforms other methods in image saliency detection.

Key words: saliency detection; two-layer representation; color; spatial structure

0 引言

图像的显著性检测能够剔除图像中的冗余信息,找到图像中最具代表性并且能够吸引注意力的部分,是通过对人类视觉系统(HVS)研究而发展来的一种图像处理方法。它是一项基础性的研究,能够有效地降低图像的复杂度以及实现去噪。因此,这项技术对图像处理其他方面的发展也有着重要的意义,如基于内容的图像检索、目标识别、目标跟踪检测、基于内容的图像压缩等。

显著性检测是以人类视觉注意模型(VAM)为基础进行研究。VAM是根据视觉注意机制来获取图像中最容易引起注意的区域。根据人类注意力形成原因,可以将VAM分为两类:自上而下的任务驱动模式和自底向上的数据驱动模式。由于自上而下的VAM涉及高级信息与人脑的活动而这类信息在相关领域内的发展较慢,故自上而下的显著性检测研究的进展较慢。自底向上的方法主要是对底层信息进行分析得到图像的显著性信息,因而这种以数据为驱动的自底向上方法得到了快速的发展^[1-3]。

基于底层特征空间的显著性区域检测是最为普遍的方法。通过对图像底层数据进行分析,在一定合理的先验假设的基础上完成显著图提取^[4-5]。先验信息在显著性检测相关工作中有重

要的作用,其中最具有代表性的是背景先验^[7]和中心先验^[8]:背景先验是指位于图像边界的部分受关注的程度较低;中心先验则是显著目标比较靠近图像中心。现有的工作从不同角度提出了不同的解决方案^[3,9],多以图像区域为基本的度量单元,分析其在结构、分布等方面的差异,但是这些方法没有充分考虑所用特征本身的性质与特征和区域之间的适应性。

为了解决上述问题,提出一种融合多层次信息的显著区域检测方法。图1给出方法的流程图。与已有方法相比,主要优点有:1)利用边缘划分得到的图像的双层表示可以从两种不同的角度计算显著性,同时也可达到平滑去噪的效果;2)得到的显著区域边界明显,更接近人工标记的显著性结果。

1 相关工作

显著性检测方法主要分为两类,基于生物模型与计算模型的显著性检测方法。基于生物模型的方法以Itti等人^[10]提出的快速场景分析方法为代表。该方法以Koch等人^[11]的视觉注意模型为基础,主要思路是:在不同尺度上,通过中心一周围的对比方式利用不同的特征分别计算显著性。但是该类方法侧重于视觉焦点的获取而忽略了显著区域的整体性,使该类方法的应用受到了限制。

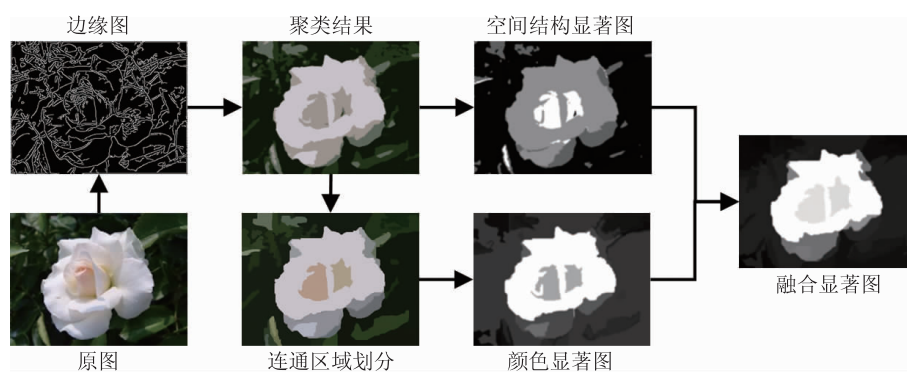


图1 方法基本流程图

Fig. 1 The basic flow chart of the method

计算模型的显著性检测是显著性检测的主要研究方向。Zhai 等人^[2]在视频显著性检测中提出了针对静态图像的显著性检测方法,该方法利用亮度信息计算显著性。Hou 等人^[1]从信息论的角度将图像信息分为显著与非显著信息,从而提出频域空间内的频谱残余方法(SR)。Achanta 等人^[12]提出频域调谐的显著性检测(FT)方法,将像素颜色与图像平均颜色间的差异作为显著性,得到全分辨率的显著图。以上方法都是得到像素级别显著性,所用图像特征没有体现图像信息的多样性,忽略图像空间结构信息,因此,仅适用于背景变化较小的图像,并且结果比较模糊,效果不稳定,对纹理与噪声敏感。

为克服上述缺陷,研究人员将区域作为显著性计算的基本单位,以体现信息的多样性。在减少计算量的同时也对纹理与噪声有一定的鲁棒性。划分图像区域最直接的方法是将图像进行均匀分块。Goferman 等人^[7]以图像块为计算单元提出了基于环境上下文的显著性检测,Wang 等人^[13]利用图像块在图像数据集中的出现概率表示图像块的显著性。在对图像均匀分块中发现,块过大,会将不同视觉特征的像素划分到同一区域中。块过小,则不能体现出像素的结构特性,也不能有效地减少计算量。图像过分割方法是目前显著性检测算法中常用的区域划分方式。Cheng 等人^[3]提出了利用颜色直方图特征计算显著性的直方图对比(HC)与全局对比(RC)两种方法。HC方法主要是通过对图像颜色进行量化,利用直方图特征进行显著性的计算。在RC方法中,利用基于图的方法^[14]分割图像产生视觉均匀区域,在全局对比的基础上融入了空间位置信息,较之前的方法效果有较大提高。但是该方法过于强调颜色变化小的小区域。最近,图像显著性

更趋向于利用不同的特征从多个角度计算图像的显著性。Perazzi 等人^[9]在超像素^[15]分割基础上,提出了从结构与颜色两方面计算的显著性滤波器(SF)方法。与RC方法的主要区别是SF方法采用高斯公式计算区域之间的差异在显著性计算中所占权重。得到的显著图比较平滑,能够很大程度上提高显著图对图像目标区域的增强效果。上述几种方法是在单一的图像分块的基础上计算结构与颜色两方面的显著性。然而,不同特征具有不同的性质^[8]。同样,从不同的角度用不同特征度量显著性时,应考虑特征与图像区域之间的适应性。根据区域性质选择特征才能准确地体现图像区域之间的差异性。Margolin 等人^[16]在不同区域划分中分别计算的模式与颜色显著性。该方法将模式特征投影到PCA空间内,提高了计算的准确性。但是由于计算颜色对比度时,没有根据区域的位置、结构等信息对区域之间的颜色对比加以权重区分,因此,得到的显著图模糊,显著区域内部加强不明显。

虽然已有方法能够定位显著性区域,但是检测结果仍有很大的提升空间,存在显著性区域加强不明显、纹理与噪声敏感等问题。于是,提出了一种新的融合双层信息的显著性检测方法。根据HVS通过边缘的突变捕捉显著性区域^[17]的原理,将图像映射到双层表示空间并分别从颜色与空间结构两方面计算图像的显著性。与之前的方法相比,本文方法的检测结果的精度较其他方法有进一步提升,而且能够有效抵抗噪声与纹理的影响。

2 图像的层次性表示

像素级别的显著性计算开销较大,并且没有

考虑到空间上相邻的、颜色相似的像素具有相似的显著性^[9]。同时,像素级别的计算也不利于从不同角度计算显著性。为了避免上述因素对计算结果的影响,将图像区域作为显著性计算的基本单元。

2.1 聚类

目前,多数的显著性检测方法采用图像过分割方法^[14-15]得到图像的局部区域作为显著性计算的基本单元。图像过分割是将图像分割成为多个连通的局部性的、紧凑的图像区域,但其结果不能表示图像的基本的颜色分布。同时,过分割方法最终得到的区域数量都比较大。图像区域数量也是影响检测结果的一个重要因素。数量越小,越利于显著性检测。为了有效控制图像的区域数量,采用K均值方法利用颜色特征对图像像素进行聚类。

1) 聚类种子点的选取。K均值算法的时间复杂度是 $O(N \times K \times T)$,其中 N 是待聚类的数据数量, K 是聚类数目, T 是迭代次数。 N 对聚类开销有重要的影响。在梯度变化小的区域内,像素颜色是相对不变的。为了减少不必要的开销,只选择具有代表性的像素进行聚类得到聚类中心,而其余像素则按照颜色将其归类。图像边缘是图像区域之间的过渡,能够代表区域中的基本颜色。因此,将图像边缘像素点作为聚类的基本数据。同时,为了提高对图像描述的全面性,将图像边界的像素加入到聚类数据中。通过实验发现,本文所采用的聚类方法与采用全部像素进行聚类方法相比,能减少聚类开销并且不会降低显著性检测精度。

2) 聚类数目 K 的确定。聚类数目可通过预先设定与动态计算两种方式获取。(1)设定是指不同图像均用一个固定的数值作为其聚类数目。但是,不同类型的数据集中的图像的特点不同,适应的聚类数目也不同。一般,为了使聚类结果更加准确,复杂图像聚类数目要比简单图像大。因此,预先设定方式不利于本文方法的扩展。(2)计算方式是指利用图像本身的信息动态地为每幅图像选取各自的聚类数目。图像中的颜色是确定图像复杂度的一个重要指标。随着图像中颜色数量的增加,用聚类表达图像时,聚类数目也应该随之变大。本文方法采用图像的颜色数目作为计算聚类数目的依据。

受光照、阴影、噪声等因素的影响,一种颜色在

一幅图像中可能有不同的表现形式,直接统计图像中的颜色数目误差较大,不符合实际情况。因此,利用文献[3]中的量化方法对图像进行颜色量化。该方法能够较好地反映图像的颜色复杂度,同时也能保留足够用于描述显著性的视觉信息。本文方法最终聚类数目的确定方法为

$$K = \max(4, \lfloor \sqrt{nc}/2 \rfloor) \quad (1)$$

式中, nc 是图像量化后的颜色数目。

本文聚类方法的基本过程如下:

- 1) 根据式(1)计算聚类数目 K ;
- 2) 提取图像的边缘图,统计聚类种子点;
- 3) 用K均值算法对种子点聚类得到 K 个聚类中心;
- 4) 将剩余像素归并到 K 个聚类中,即

$$L_{(x,y)} = n$$

$$\text{s. t. } \min_{1 \leq n \leq K} \|c_{(x,y)} - c_n\| \quad (2)$$

式中, c_n 表示边缘像素聚类得到的第 n 个聚类的颜色特征, $c_{(x,y)}$ 表示 (x,y) 处像素颜色特征。因为Lab颜色空间比较符合人类视觉,所以本文方法是在Lab颜色空间下进行聚类及后续显著性的计算。

2.2 层次性的图像表示

通过2.1节,得到了一个初始的聚类结果。该聚类结果中,同一聚类可能是由多个不同的连通区域组成。根据聚类结果的空间特点并考虑到前背景像素分布的差异性,可以构建一个双层结构来更精确地刻画显著区域。将初始的聚类结果作为第1层,记为 L_1 。通过 L_1 的表示,可以得到颜色一致性的非邻接区域,降低背景因素对前景目标的影响从而提高检测的性能。然而,由于同一聚类可能是由空间上的不连通的区域组成,同一聚类的不同连通区域可能会因为空间位置以及相邻区域的影响而具有不同的性质,因此将空间上不连通的区域进一步划分成为不同的区域,得到第2层图像表示,记为 L_2 。以图2(a)中的区域1为例。经过划分后得到了图2(b)中的1和4两个区域。通过 L_2 层的表示,可以独立地计算出前背景显著性,避免了相互间的干扰。同时为了避免后续的计算过于突出小区域, L_2 中将过小的区域归并到其相邻的区域内(图3第2行图像中的一小块白云在 L_2 层中归并到其他区域中)。为了更加具体地展示本

文所提分层表示的结果,图3给出了一个有代表性的实验结果。

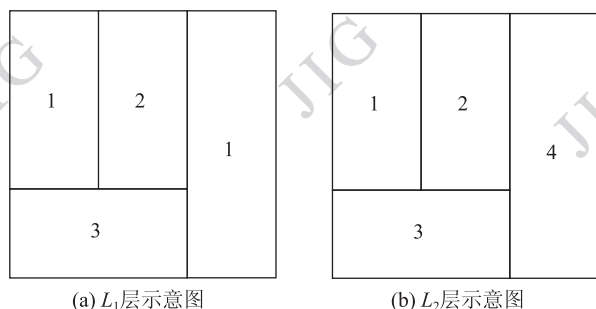


图2 图像双层表示示意图

Fig. 2 Schematic of the two-layer representation

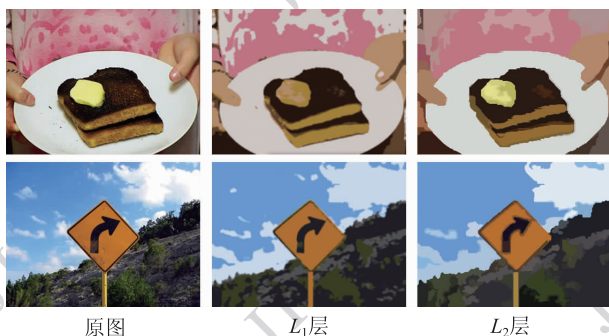


图3 图像双层表示举例

Fig. 3 Examples of the two-layer representation

图像的 L_1 表示将空间上不连续的前景(背景)聚合在一起,对空间结构描述能力强。但 L_1 也可能将颜色相似的背景与前景区域划分到同一类中造成聚类类错误。 L_2 通过对连通区域的划分可降低这种分类错误。同时, L_2 对图像的描述也更加细腻准确,对图像颜色的描述能力强。如图3第1行图像,连通区域分割后的中心黄色区域更加贴近于原始图像。 L_1 和 L_2 两层分别从结构与颜色角度描述图像,为空间结构与颜色显著性的计算提供了各自的度量空间,使最终的计算结果更加准确。

3 显著性计算

HVS 对信号对比比较敏感。一幅图像中,与周围区域差异大的区域更容易获得视觉关注。因此,特征对比是衡量显著性的一个重要依据。根据图3得到的 L_2 与 L_1 层图像表示的不同特性,本文将从颜色与空间结构两个不同角度计算图像的

显著性。

3.1 颜色显著性

颜色是图像中最直观的表达图像信息的一种特征,同时也是最易被理解的一种图像特征,是显著性的一个重要计算依据。不同区域之间的对比度对区域的显著性的贡献受到区域之间的空间位置、区域大小等因素影响:

1) 空间位置。相邻区域之间的高对比度比距离远的区域之间的高对比度更易获得视觉注意。

2) 区域大小。与大区域的对比度比与小区域的对比度对区域的显著性贡献大。

利用空间位置、区域大小等因素控制与区域间对比度所占权重。同时,用区域背景像素点所占比例引入非绝对性的背景先验。颜色显著性的计算公式为

$$SC_i = (1 - b_i) \sum_{j=1}^N \exp\left(-\frac{d_{i,j}}{\alpha}\right) w_j \|c_i - c_j\| \quad (3)$$

式中, $d_{i,j}$ 表示区域 i 与区域 j 中心坐标之间的欧氏距离;参数 α 控制空间权值强度,一般位于 0 到 1 之间,越大,空间权值的控制力越弱,导致距离较远区域的对比度对显著性的贡献变大; $\|c_i - c_j\|$ 表示区域 i 与区域 j 之间的颜色差异; b_i 表示包含边界像素的比例, $b_i = bN_i/p_i$, bN_i 表示区域 i 中包含的边界某像素宽度(15 像素)内的像素数目(简称,边界像素), p_i 是区域 i 的像素数目; w_j 表示某区域与区域 j 的对比度在其显著性的计算中所占的比重,计算公式为

$$w_j = (1 + b_j) \times n_j / (W \times H) \quad (4)$$

式中, n_j 表示区域的像素数目, W 表示图像宽度, H 表示图像高度,实验结果如图4(b)。

本文方法通过 b_i 从两个方面引入背景先验知识: $(1 - b_i)$ 表示区域中包含的边界像素的比例越大,越有可能是背景,其显著度也越低; w_j 中的 $(1 + b_j)$ 表示与边界区域的对比度要比非边界区域的对比度对于显著性的贡献大。不同于之前的许多方法^[3,5] 直接将边界区域显著性定义为 0,主要考虑以下两种情况:

1) K 均值聚类得到的聚类空间跨度较大。显著性区域与边界可能含有相同的颜色,聚类时会将部分显著区域与部分边界划分在同一区域中;

2) 大部分图像显著性区域都不在边界处,但是,仍然存在图像的部分边界是显著的。

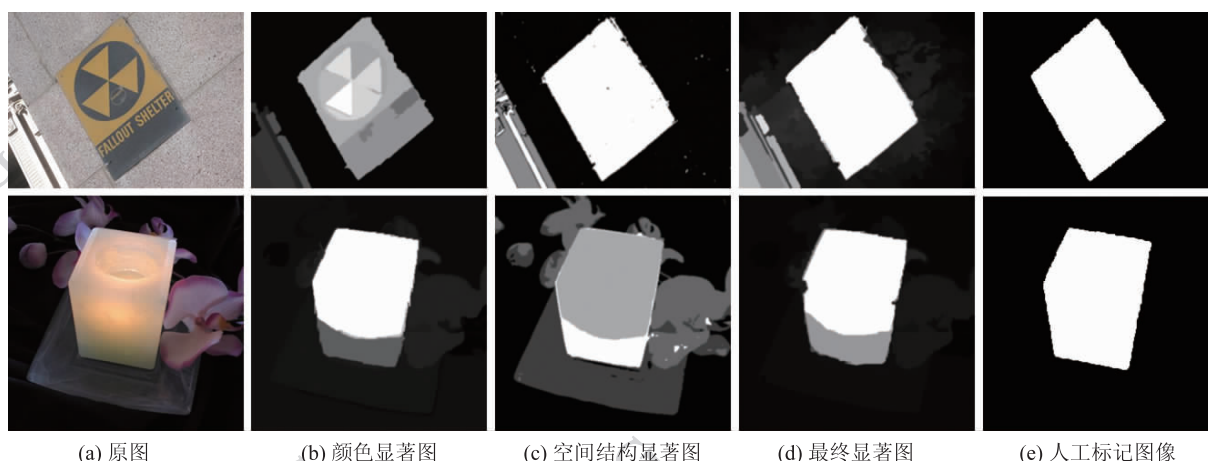


图4 本文方法结果

Fig. 4 Results of our method

3.2 空间结构显著性

颜色对比度是衡量显著性的一个重要依据。但是,对于某些颜色变化不大的图像,颜色对比度会失去区分力。因此,引入空间结构显著性进一步完善颜色显著性。本文方法将从结构独特性与空间分布性两方面计算空间结构显著性。

本文方法用中方向一幅度直方图(OM)特征^[8]计算区域之间的结构对比度。OM从方向与幅度两方面描述图像的区域。图像中,平滑区域内部颜色均匀,其像素的方向与幅度变化不大,因此仅用图像边缘像素的OM特征进行计算。另外,通过对大量图像观察发现,显著区域的颜色跨度比非显著区域大,因此,在计算结构独特性中加入了能够代表区域颜色分布性的颜色变化方差,以提升最终的效果。

结构独特性计算公式为

$$SU_i = v_i + \sum_{j=1}^K \exp\left(-\frac{d_{i,j}}{\alpha}\right) w_j \|om_i - om_j\| \quad (5)$$

式中, om_i 表示区域*i*中的边缘像素点平均的OM特征, v_i 表示聚类中像素颜色的方差,归一化到 $[0,1]$ 。另外,图像区域的空间分布特性也会影响区域的显著性。 L_1 层中,聚类不考虑空间信息只是依靠颜色信息得到的,因此,每个聚类会因为颜色的分布的不同而具有不同的空间结构特性,从而影响聚类的显著性。一般,空间紧凑性的显著区域具有较高的显著性^[4,7]。根据文献^[4,18]计算空间分布性,即

$$SD_i = (1 - V_i)(1 - D_i) \quad (6)$$

式中, $V_i = V_h(i) + V_v(i)$, $V_h(i)$ 与 $V_v(i)$ 表示区域

*i*内像素 x, y 坐标方差, D_i 表示*i*内像素点距图像中心的平均欧氏距离, V_i 与 D_i 归一化到 $[0,1]$ 区间。

将式(5)(6)中计算得到的数据结合起来得到本文的空间结构显著性,计算方法为

$$SS_i = (SU_i + SD_i)(1 - b_i) \quad (7)$$

同样利用 $(1 - b_i)$ 引入背景先验知识,实验结果如图4(c)。

3.3 显著性融合

式(3)与式(7)分别从颜色与空间结构上度量图像的显著性。相比于空间结构,HVS对颜色更加敏感。同时,通过实验发现颜色显著性 SC_i 比空间结构显著性 SS_i 具有更强的区分能力。所以,本文方法采用指数函数的形式将两种显著性相结合,以突出颜色显著性对最终的结果的作用。公式为

$$S_i = \exp(SS_i) \times SC_i \quad (8)$$

式中, SC_i 与 SS_i 分别是 L_2 表示中的区域*i*的空间结构显著性与颜色显著性,两者均被归一化到 $[0,1]$ 。图4给出了本文方法的颜色显著图、空间结构显著图与最终显著图的效果举例。

利用图像的边缘、连通性等信息对图像像素进行聚类,得到图像的双层表示。根据不同层次的各自特性,分别用空间结构对比与颜色对比两方面计算图像的显著性。通过实验进一步表明特征与图像表示之间的适应性,实验数据如图5。Precision为精确率,Recall为召回率。ES表示本文最终所采用的特征与图像表示之间的选择策

略,即, L_1 计算空间结构显著性, L_2 计算颜色显著性;ES_ L_1 是指两种分量显著性均在 L_1 中计算;ES_ L_2 表示两种分量显著性均在 L_2 中计算;ES_INV 表示在 L_1 中计算颜色显著性,在 L_2 中计算空间结构显著性。通过图 5 中的数据曲线不难发现,ES 效果最好。

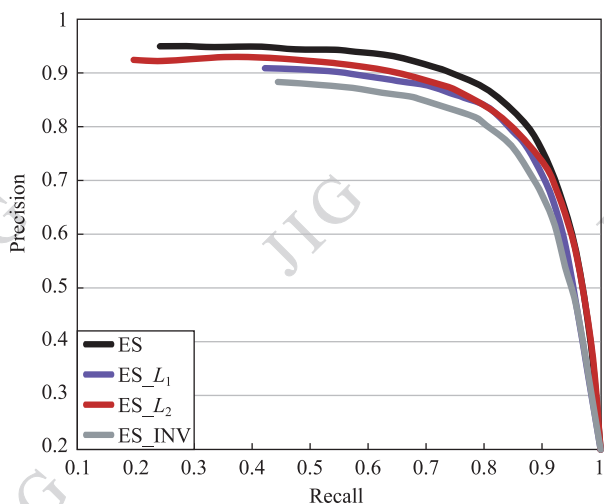


图 5 特征与聚类适应性

Fig. 5 The adaptability between the feature and the clusters

4 实验分析

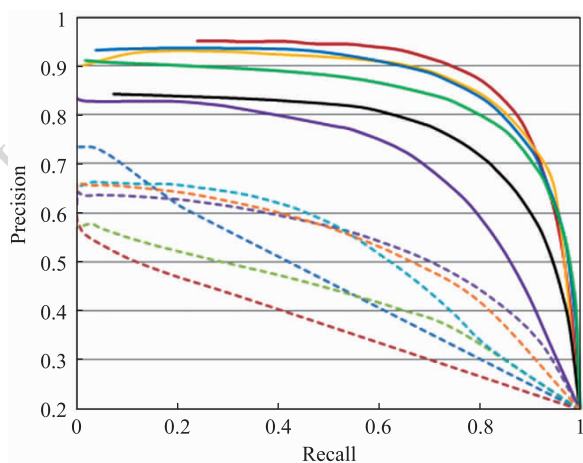
在包含 1 000 幅图像的 MSRA-1000 公开测试集上进行实验,该数据集是国际上最主流的图片显著性检测的标准数据集。文献[12]提供了该数据集人工标注的精确的二值化形式的显著性图像。

实验中,本文方法(ES)与多种优秀的显著性检测方法进行了对比,分别是:PCA^[16],SF^[9],RC^[3],HC^[3],FT^[12],MZ^[6],GB^[19],AC^[20],SR^[1],LC^[2],IT^[10]。在实验中,采用国际上主流的数据评价方式全面地评价本文方法。

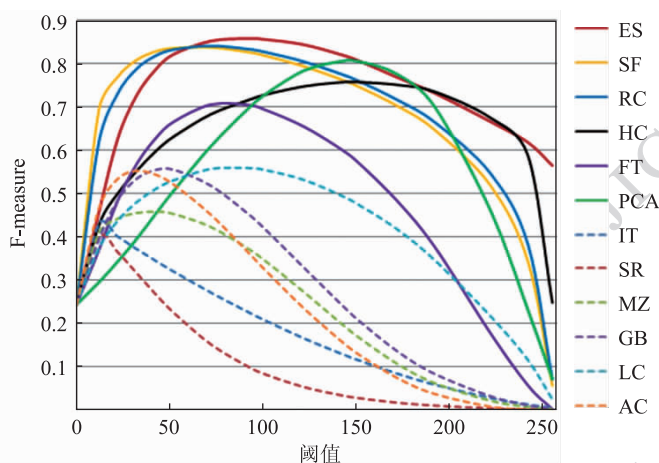
4.1 精确率和召回率

将显著图二值化后,与人工标记图像 Ground-truth(GT)进行比较,计算得到精确率与召回率。图 6(a)是固定阈值下的精确率-召回率(PR)数据对比曲线,从图 6(a)中可以看出本文方法是实验中最好的方法。参照文献[3,9],引入 F-measure 综合评价方法性能,图 6(b)是固定阈值下的 F-measure 曲线。

SF 与 RC 方法是目前国际上效果最好的方法之一,也是实验中与本文方法效果最接近的两种方法。从 PR 曲线图 6(a)中可以明显看出,本文方法的效果要明显优于其他方法。图 6(b)可以看出,在 F-measure 曲线的开始,虽然,本文方法要稍低于 SF 和 RC 方法,但是本文方法的 F-measure 最大值要高于其他方法。并且,在 F-measure 达到最大值之后,本文方法 F-measure 的下降速度要明显慢于其他方法,说明本文方法的稳定性较高。图 7(a)是在动态阈值下,本文方法与其他方法评价数据的对比图。本文方法虽在精确率上要稍差于 SF 方法,在召回率与 F-measure 是所有方法中最好的(本文方法精确率、召回率、F-measure 分别是 75.03%、89.39%、85.61%,SF 的是 70.44%、89.73%、84.40%)。



(a) 精确率—召回率曲线



(b) F-measure曲线

图 6 固定阈值数据对比

Fig. 6 Data comparison diagram of fixed threshold

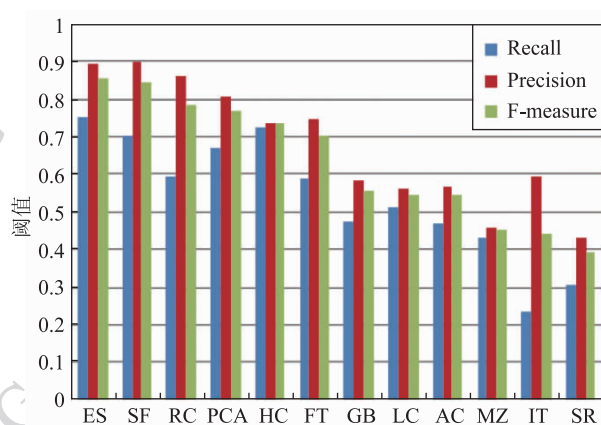
4.2 平均绝对误差(MAE)

MAE是近几年常被用于显著性检测结果评价的一种方式。与精确率、召回率不同,它是利用人工标记图像GT,对不经过二值化的显著图S直接进行评价的一种方法。根据文献[9],公式为

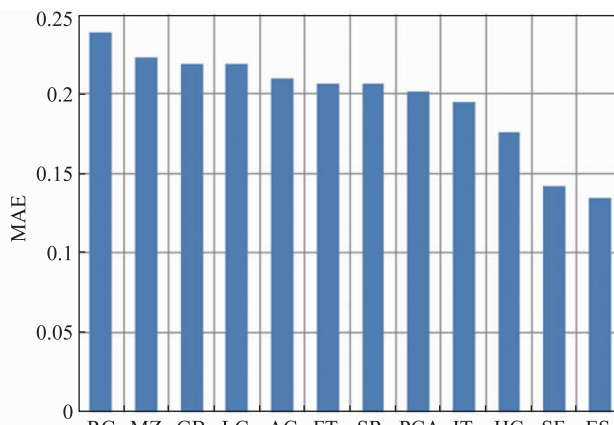
$$MAE = \frac{1}{W \times H} \sum_{y=1}^H \sum_{x=1}^W |S_{(x,y)} - GT_{(x,y)}| \quad (9)$$

值越小,说明方法结果越接近人工标记图像,效果越

好。图7(b)为1000幅图像在不同方法下的平均MAE数据对比图。用MAE进行评价,本文方法的MAE值最小,是实验中所有方法最好的。MAE对于显著与非显著的判断不如二值化的分割方法。但是在某些显著性的应用中,是将显著性值作为一种权重,如文献[21],这种情况下,显著值要比二值化的结果更加重要。图8为本文方法与其他几种优秀方法结果举例。



(a) 固定阈值数据对比数据柱状图



(b) MAE数据柱状图

图7 数据对比柱状图

Fig. 7 Histogram of the data contrast

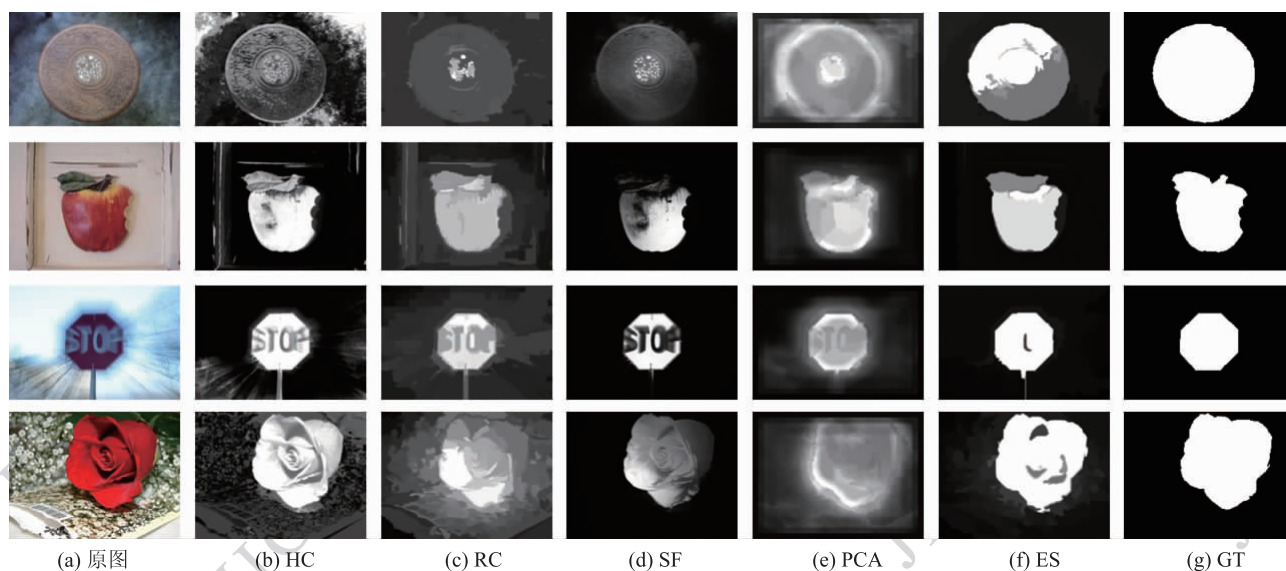


图8 显著性检测实验结果对比图

Fig. 8 Contrast test results of saliency detection

5 结论

本文提出一种多模态的显著性检测方法。首先,根据边缘、连通性等信息构建了图像的层次性表示。

然后,根据不同层次的特点,使用不同的特征,从颜色与空间结构等角度利用多种信息计算图像的显著性。同时,通过边界像素点引入背景先验,避免了之前方法背景先验知识指导显著性检测的绝对性导致的错误。最后,根据视觉系统对不同特征的敏感度,将不

同的显著性进行融合,形成图像最终的显著图。在目前国际上公开测试集上,本文方法在精确率、召回率和平均绝对误差上都有比较好的效果,并且计算速度较快,对纹理变化与噪声也具有抵抗作用。但是,本文方法仍然存在局限性。如,对于一些颜色变化很小、光照极不均匀的图像,利用颜色特征进行聚类,其结果会存在一定程度的错误,影响后续的显著性计算。未来的工作中将尝试从聚类特征上进行改进,寻找更具有区分力的特征,提高聚类的准确度。

参考文献 (References)

- [1] Hou X, Zhang L. Saliency detection: a spectral residual approach[C]//Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Miami: IEEE Press, 2007:1-8. [DOI: 10.1109/CVPR. 2007.383267]
- [2] Zhai Y, Shah M. Visual attention detection in video sequences using spatiotemporal cues[J]. ACM Multimedia, 2006:815-824. [DOI: 10.1145/1180639.1180824]
- [3] Cheng M M, Zhang G X, Mitra N J, et al. Global contrast based salient region detection[C]//Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Providence: IEEE Press, 2011: 409-416. [DOI: 10.1109/CVPR. 2011.5995344]
- [4] Liu T, Yuan Z, Sun J, et al. Learning to detect a salient object[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2011:1-8. [DOI: 10.1109/TPAMI. 2010.70]
- [5] Wei Y C, Wen F, Zhu W J, et al. Geodesic saliency using background priors[C]// Proceedings of 12th European Conference on Computer Vision. Florence: Springer, 2012:29-42. [DOI: 10.1.1.260.1388]
- [6] Ma Y F, Zhang H J. Contrast-based image attention analysis by using fuzzy growing[C]//Proceedings of 11th ACM International Conference on Multimedia. New York: ACM, 2003:374-381. [DOI: 10.1145/957013.957094]
- [7] Goferman S, Zelnik-Manor L, Tal A. Context-aware saliency detection[C]//Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. San Francisco: IEEE Press, 2010:2376-2383. [DOI:10.1109/CVPR.2010.5539929]
- [8] Shi K Y, Wang K Z, Lu J B, et al. PISA: pixelwise image saliency by aggregating complementary appearance contrast measures with spatial priors[C]// Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Portland: IEEE Press, 2013:2115-2122. [DOI: 10.1109/CVPR.2013.275]
- [9] Perazzi F, Krahenbuhl P, Pritch Y, et al. Saliency filters: contrast based filtering for salient region detection[C]// Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Providence: IEEE Press, 2012:733-740. [DOI: 10.1109/CVPR.2012.6247743]
- [10] Itti L, Koch C, Niebur E. A model of saliency-based visual attention for rapid scene analysis[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1998, 20(11): 1254-1259. [DOI: 10.1109/34.730558]
- [11] Koch C, Ullman S. Shifts in selective visual attention: towards the underlying neural circuitry[J]. Journal of Human Neurobiology, 1985, 4(4): 219-227. [DOI:10.1007/978-94-009-3833-5_5]
- [12] Achanta R, Hemami S, Estrada F, et al. Frequency-tuned salient region detection[C]// Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Miami: IEEE Press, 2009:1597-1604. [DOI:10.1109/CVPR. 2009.5206596]
- [13] Wang M, Konrad J, Ishwar P, et al. Image saliency: from intrinsic to extrinsic context[C]//Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Providence: IEEE Press, 2011: 417-424. [DOI: 10.1109/CVPR. 2011.5995743]
- [14] Felzenszwalb P, Huttenlocher D. Efficient graph-based image segmentation[J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 59(2):167-181. [DOI: 10.1023/B:VISI.0000022288.19776.77]
- [15] Achanta R, Shaji A, Smith K, et al. SLIC superpixels[R]. Switzerland: EPFL, 2010. [DOI: 10.1.1.165.8269]
- [16] Margolin R, Tal A, Zelnik-Manor L. What makes a patch distinct? [C]//Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Providence: IEEE Press, 2013, 733-740. [DOI:10.1109/CVPR.2013.151]
- [17] Guo Y C, Yuan H J, Wu P. Image saliency detection based on local and regional feature[J]. Acta Automatica Sinica, 2013, 39(8):1214-1224. [郭迎春, 袁浩杰, 吴鹏. 基于 Local 特征和 Regional 特征的图像显著性检测[J]. 自动化学报, 2013, 39(8):1214-1224.] [DOI: 10.3724/SP.J.1004.2013.01214]
- [18] Cheng M M, Warrell J, Lin M Y, et al. Efficient salient region detection with soft image abstraction[C]// Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Sydney: IEEE Press, 2013:1529-1536. [DOI: 10.1109/ICCV. 2013.193]
- [19] Harel J, Koch C, Perona P. Graph-based visual saliency[J]. Advances in Neural Information Processing Systems, 2007, 19: 545-552. [DOI: 10.1.1.70.2254]
- [20] Achanta R, Estrada F, Wils P, et al. Salient region detection and segmentation[C]//Proceedings of the 6th International Conference on Computer Vision Systems. Greece: Springer, 2008: 66-75. [DOI: 10.1007/978-3-540-79547-6_7]
- [21] Avidan S, Shamir A. Seam carving for content-aware image resizing[J]. ACM Transactions on Graphics, 2007, 26(3):10. [DOI: 10.1145/1276377.1276390]