

基于对比敏感度的小波域图像显著性检测

郭迎春, 冯艳红, 阎刚, 于明

(河北工业大学 计算机科学与软件学院, 天津 300401)

摘要: 为了提高显著图的分辨率, 提出了一种基于对比敏感度函数和小波分析的高分辨率图像显著性检测算法。将图像在 YCbCr 空间进行对比敏感度滤波, 用以模拟人眼所能分辨的对比度; 进而在 Y、Cb 和 Cr 的单通道上进行小波分解, 分别提取并合并低频和高频特征图得到单通道显著图, 融合三通道得到图像的全分辨率显著图。实验结果表明得到的显著图目标清晰、显著物体整体突出且运算速度快。

关键词: 显著性检测; 对比敏感度滤波; 小波域分解; 全分辨率

中图分类号: TP391.4

文献标识码: A

Image saliency detection in wavelet domain based on the contrast sensitivity function

GUO Ying-chun, FENG Yan-hong, YAN Gang, YU Ming

(School of Computer Science and Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

Abstract: A method of high definition saliency detection based on contrast sensitive function and wavelet analysis was proposed in order to improve the resolution of saliency maps. Original image was filtered by contrast sensitive function in YCbCr space, which could simulate the contrast of human eyes; then wavelet decomposition was carried out in Y, Cb, and Cr three channels individually, low frequency and high frequency feature saliency maps were extracted and further combined to obtain saliency map in single channel; finally saliency maps in three channels were fused to the high resolution saliency map. Experiments result show that the saliency images have high resolution, well-defined boundaries, and whole highlight salient objects.

Key words: saliency detection; CSF filtering; wavelet domain; low-pass coefficients

1 引言

视觉显著性(visual saliency)是人们主观地关注图像的某一区域, 而该区域因为与周边区域存在差异而引起人们注意, 人类的这种特性叫做视觉注意机制。将这种机制引入到图像分析领域, 即图像显著性检测。图像显著性检测能够缓和图像内容理解与底层特征之间的隔阂, 从而给后续的处理带来便利。现如今图像显著性检测的应用非常多, 比如路面裂缝检测^[1]、行人检测^[2]、内容感知的图像分类^[3]和图像压缩^[4]等。

根据图像显著性检测算法处理域的不同, 可分为 2 类: 基于空间域的算法和基于频域的算法。基于空域的算法中最具有代表性的是 1998 年 Itti 等^[5]提出的基于生物模型和特征整合理论的 IT 算法, 该算法提取底层特征如颜色、亮度和方向, 利用图像多尺度特征和中心-周边差原则计算显著值, 得到低分辨率的显著图; 2006 年 Harel 等^[6]提出基于图论的 GB 算法, 继承了 IT 算法的特征提取和中央-周边差原则, 利用马尔科夫链进行特征显著图规格化合成; 2008 年 Achanta 等^[7]提出基于图像不同尺度对比度的 AC 算法, 计算不同尺度的局部区域

收稿日期: 2014-11-03; 修回日期: 2015-05-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60302018); 天津市科技计划基金资助项目(14RCJFJX00845); 河北省自然科学基金资助项目(F2015202239)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (60302018); Tianjin Science and Technology Plan Projects (14RCJFJX00845); The Natural Science Foundation of Hebei Province (F2015202239)

与其周边区域在亮度和色度上的对比度；2012 年 Goferman 等^[8]提出基于上下文 CA 算法，比较不同块在不同尺度、不同位置以及注意力的焦点等方面的差异，能够检测代表场景的显著区域而不只是显著目标。在频域检测算法中，2007 年，Hou 和 Zhang 等^[9]提出谱残差 (SR, spectral residual approach) 算法，该算法将图像从空域转换到频域，计算图像 \log 振幅谱与平均 \log 振幅谱的差作为显著部分载频域信息，而谱残差并非对应于图像的显著区域，且该方法存在低分辨特性；2009 年，Achanta 等^[10]提出频率调谐 (FT, frequency-tuned) 算法，通过叠加多个高斯带通滤波器和计算平均值得到全分辨率显著图，但是显著区域与背景差异不够大，因此在 2010 年，Achanta 等^[11]对 FT 算法进行改进，提出最大对称环绕 (MSS, maximum symmetric surround) 算法，该算法根据像素点与图像边缘的距离，改变中央周边带宽，从而用给定像素点的最大可能对称环绕区域均值代替 FT 算法中计算整体图像平均特征向量均值，MSS 算法降低了背景的显著性；同年，Ngau 等^[12]提出基于小波变换域的自底向上的显著图 (BUSM, bottom-up saliency map) 通过小波滤波器提取图像的低频子带色彩偏差来表征图像显著区域，该算法运算速度快，但是由于只采用低频信息而忽略高频信息对显著图边缘变化的影响导致得到显著图不准确；2013 年，İmamoğlu 等^[13]提出在小波域中利用底层特征进行显著性检测 (ADM, saliency detection model using low-level features based on wavelet transform) 的算法，该算法使用小波变换创建多尺度特征图进行局部显著性检测，同时考虑全局特征提取，得到的显著图能够突出显著物体，该算法没有利用小波分解的低频信息，显著目标分辨率不高。

目前，大多数显著性检测算法得到的显著图分辨率低、边缘不清或者计算复杂。有些算法只在显著目标边缘处具有很高的显著值，而目标内部显著值分布不均匀造成空洞。上述算法中 IT、GB 和 SR 算法得到的显著图分辨率较低；IT 和 GB 算法显著图边界不清晰；CA、SR 和 ADM 算法显著目标的边界较突出，但整体不均匀；AC、FT、MSS 和 BUSM 算法中显著区域和背景区域对比度不够高；MSS 算法当图像中的显著物体不完整时容易将其当成背景处理。而显著目标整体突出、分辨率高且计算相对简单对图像的后续处理非常重要，比如目标分割^[10]。

FT 算法是一个全分辨率显著目标检测算法，核心是利用高斯核来抑制高频分量(噪声和失真)从而得到模糊的原始图像，强调最大的显著物体，整体突出，边缘完整，能够抑制由纹理、噪声和方块化失真引起的高频，但是显著图与背景对比度不高。BUSM 和 ADM 算法是小波域显著性检测算法。BUSM 算法通过离散小波滤波器提取图像低频子带计算显著值，ADM 算法使用小波变换提取多尺度高频子带进行显著性检测。BUSM 算法仅考虑了小波变换后得到的低频子带，导致得到的显著图边界不明显，显著区域和背景的对比度差异小。ADM 算法仅考虑了高频子带，得到的显著图高亮边界部分，整体不突出，虽然算法经过高斯低频滤波，但是并没有解决高频子带中的噪声影响。

根据以上分析，本文拟采用小波代替 FT 算法中的高斯核，利用小波分解得到的低频和高频分量估计显著特征。综合考虑小波变换后的低频和高频子带信息，既保留低频子带信息中的整体一致性，也保留高频子带中重要的边界特征。在小波变换之前用对比敏感度函数 (CSF, contrast sensitivity function) 对输入图像进行滤波，可以更好地模拟人眼视觉在视网膜不同位置上对相同的明暗刺激产生不同相应的情况，突出显著性目标与周围背景的对比度。

本文算法的流程是：首先将图像转换到 YCbCr 颜色空间，在该空间对三通道进行 CSF 滤波，在小波域中提取图像的低频和高频显著特征并融合得到单通道显著图，合并三通道得到最终显著图。

2 基于对比敏感度的特征提取

在用底层特征计算视觉显著度时，往往利用亮度、颜色红—绿和黄—蓝、纹理、方向等对比来描述显著物体。人眼视觉系统 (HVS, human visual system) 对刺激信号的响应不是取决于信号绝对亮度，而是取决于信号对于背景亮度或平均亮度的局部变化，即对比度。人眼对亮度差别达到一定的对比度阈值时才能感觉到，这个阈值被称为对比度阈值。HVS 在照度低时，空间分辨率降低且不易辨别出颜色；当照度太强时，空间分辨率不会增加，反而降低，这种非线性滤波效果，使对比度阈值随刺激信号空间频率的不同而变化，它的倒数定义为 CSF 在空间频率值。用 CSF 对图像进行滤波可以有效地抑制图像外围信息在视觉注意显著图形成过程中的活跃性。

CSF 受到对比度、空间频率、刺激野、可视距离和方向等影响, Nadenau 等^[14]通过研究指出, 亮度 CSF 具有带通特性, 而色度 CSF 具有低通特性, 在构造相应的公式时, 设亮度 CSF 是由 2 个指数和构成, 而色度 CSF 是单指数函数。通过一系列实验确定基于 YCbCr 空间的 CSF 检测在图像压缩后质量达到最好, 图像压缩实际上是对人眼关注度低的内容进行有损压缩, 本质上与视觉注意模型中检测显著特征抑制非显著特征类似。YCbCr 空间中 Y 描述图像的亮度, Cb 和 Cr 分别描述蓝—黄和红—绿色度通道, 这与大多数视觉注意模型在提取视觉显著度的时候采用亮—暗、红—绿和黄—蓝的视觉对比是一致的^[5~7]。

因此, 本文采用 YCbCr 颜色空间上 CSF 的实验结果, YCbCr 各通道表达式的归一化形式如下

$$CSF_Y(f) = 0.997 f^2 \exp(-0.970 f^{0.781}) + 0.221 \exp(-0.800 f^{1.999}) \quad (1)$$

$$CSF_{Cb}(f) = \exp(-0.204 1 f^{0.900}) \quad (2)$$

$$CSF_{Cr}(f) = \exp(-0.152 1 f^{0.893}) \quad (3)$$

其中, f 表示图像的空间频率(周/度)。利用式(1)~式(3)即可在 YCbCr 颜色空间实现 CSF 滤波。

3 基于对比敏感度分析的小波域图像显著性检测

CSF 的频带宽度近似为倍频程, 各频段加权系数不同, 同一级的敏感度值相差不大, 不同方向的敏感度不同, 水平与垂直方向对称分布, 对角方向较难感知。HVS 的 CSF 倍频程特征和方向选择性与二维小波具有高度的一致性, 因此在 CSF 滤波后对各通道进行小波变换, 提取低频和高频显著特征通道, 重构的图像能够体现 HVS 对显著目标的理解。本文在 YCbCr 空间的 3 个分量引入 CSF, 然后对每个通道进行小波域显著图提取, 具体的流程如图 1 所示。

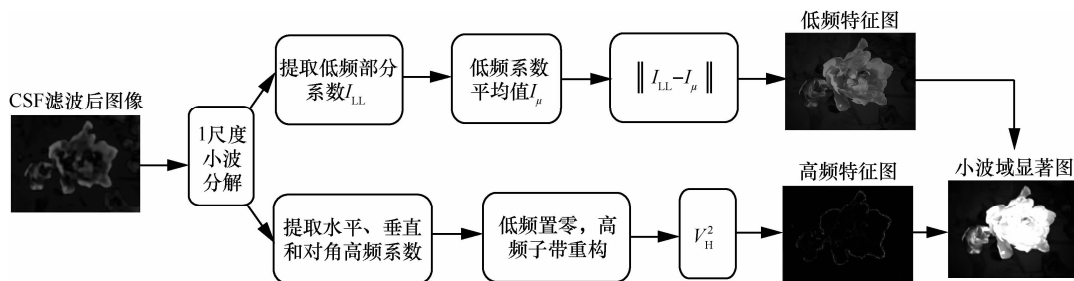


图 1 单通道小波域显著区域检测算法

本文的小波域显著区域检测算法是融合 FT、BUSM 和 ADM 的思想, 并利用抛物线对显著图进行非线性校正, 降低背景的显著度, 同时增强显著区域的显著度, 以亮度通道 Y 为例具体算法如下。

首先, 对 CSF 滤波后的单通道图像进行 1 尺度小波分解, 选择 1 尺度是考虑到分解尺度过多会带来 2 个缺点: 1) 每增加一层分解, 运算量就会增大一些; 2) 实验中显著图结果并不随小波分解层数的增加变得越来越好, 分解层数越大显著图变得越来越模糊(如图 2(c)和图 2(d)所示)。

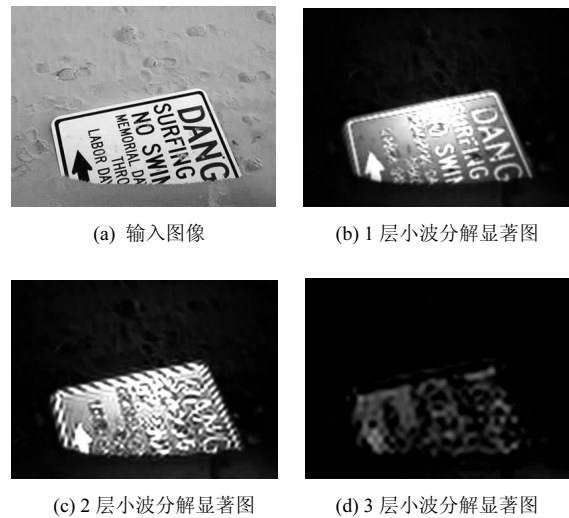


图 2 小波域显著图

其次, 对小波分解得到的低频系数计算其与平均值之间欧氏距离得到显著值, 公式如下

$$V_{YL} = \| I_{YL}(x, y) - I_{Y\mu} \| \quad (4)$$

其中, $I_{YL}(x, y)$ 是 Y 通道中提取的低频特征分量, $I_{Y\mu}$ 是相应低频系数的平均特征值, $\| \|$ 是欧氏距离。

场景中的显著物体通常不会在边缘部分, 需要更加突出图像的中间部分。在使用欧氏距离计算对比度时添加权重, 公式如下

$$W(x, y) = \frac{\sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}}{\sqrt{x_0^2 + y_0^2}} \quad (5)$$

其中, (x_0, y_0) 为低频子带图像的中心位置。计算得到的低频部分新的系数公式如下

$$S_{YL}(x, y) = V_{YL}(x, y)(1 - W(x, y)) \quad (6)$$

此时忽略高频子带系数影响, 将新得到的低频系数进行小波反变换重构到空域, 得到其低频系数特征图 S_L (这里 L 代表低频)。

接着对于高频分量, 忽略低频子带系数影响, 对水平、垂直和对角 3 个高频子带进行小波反变换重构得到高频系数特征图 V_H (这里 H 代表高频), 为了突出高频细节抑制噪声, 对 V_{YH} 进行乘方运算, 如式(8), 并归一化到 $[0, 255]$ 得到高频系数特征图 S_{YH} 。

$$S_{YH} = V_{YH}^2 \quad (7)$$

将得到的低频和高频特征图进行融合得到小波域的显著图, 如下

$$S_Y = S_{YL} + S_{YH} \quad (8)$$

低频特征图中保持了低频子带信息, 为了增强低频特征图中显著区域的边界信息, 将高频子带显著特征与其融合, 这样得到的图像存在噪声影响, 使用 5×5 的高斯滤波能够平滑去噪

$$\hat{S}_Y = S_Y G_{5 \times 5} \quad (9)$$

其中, $G_{5 \times 5}$ 为高斯滤波器, \hat{S}_Y 为平滑后的图像, 即为 Y 通道的最终特征图, 对于 Cb 和 Cr 通道做同样的处理, 分别得到各自的特征图 \hat{S}_{Cb} 和 \hat{S}_{Cr} 。将 3 个通道显著图正规化到 $[0, 1]$ 得到 S_{Y_norm} 、 S_{Cb_norm} 和 S_{Cr_norm} , 得到融合的初始显著图如下

$$S_0 = \frac{S_{Y_norm} + S_{Cb_norm} + S_{Cr_norm}}{3} \quad (10)$$

为了进一步降低背景的显著度, 同时增强显著区域的显著度, 利用抛物线对显著图 S_0 进行非线性校正, 如式(11)所示

$$S = \frac{1}{2p} S_0^2 (p > 0) \quad (11)$$

抛物线的走势形状如图 3 所示, 抛物线是凹下去的, 如果横坐标表示未校正的显著图显著度, 纵坐标为经抛物线增强校正后显著图显著度, 那么当输入的显著度较低时可以进一步降低显著度, 而在

输入的显著度较高时可以进一步提升显著度, 以此来达到增强显著度的目的。经过实验的验证, 选择 $2p$ 的值为初始显著图像素的平均值。

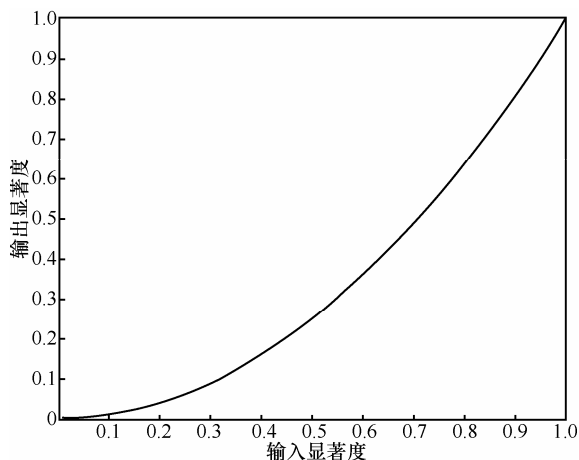


图 3 抛物线曲线

最终得到本文算法的显著图 S (如图 4 所示)。图 4 是目前流行的几种图像显著性检测算法的显著图, 包括空域算法 (IT、AC、GB、CA) 和频域算法 (SR、FT、MSS、BUSM、ADM, 其中, BUSM 和 ADM 同时属于小波域算法) 和本文算法, 从图中可以看到本文算法能够完整检测显著物体, 边缘清晰, 整体突出且分辨率高。

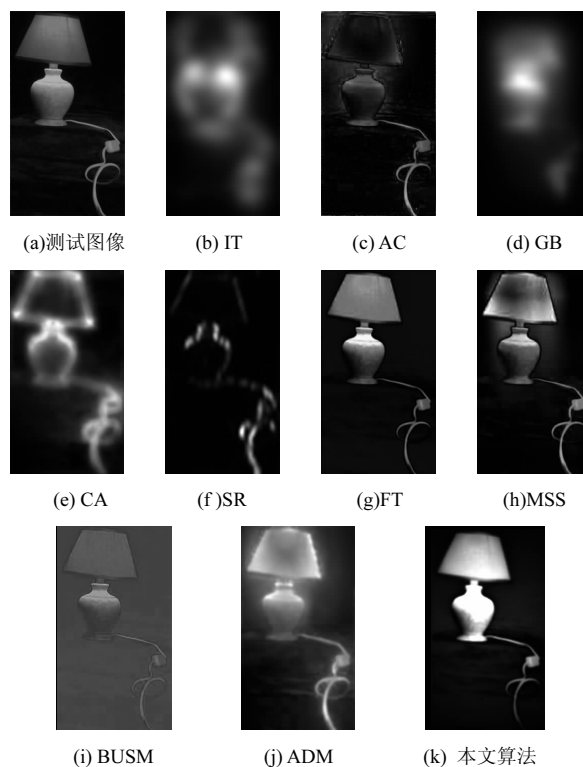


图 4 显著图比较

4 实验结果和分析

本文在 Achanta 等提供的公开数据集上测试本文算法。Achanta 数据集由人工精确标注出显著区域。将本文算法同几种流行的显著性检测算法进行了对比, 算法的结果图均是在同一个环境下得出。

比较分主观和客观, 在主观评价中做了 2 个对比分类(如图 5 和图 6 所示), 将本文算法同 IT^[5]、AC^[7]、GB^[6]、FT^[10]、MSS^[11]、BUSM^[12]和 ADM^[13]算法进行比较。IT 是生物模型算法, AC 是纯计算算法, GB 是混合模型算法, 由 FT 推得本文算法, MSS 是对 FT 的改进, BUSM 和 ADM 同本文算法有相似之处。

2 个分类是: 第 1 种分类(如图 5 所示)为图像背景依次从简单到复杂的对比; 第 2 种分类(如图 6 所示)包含显著目标周围有很多重复的干扰物, 显著目标的边缘信息很多, 存在多个显著物体 3 种情况。

在其中进行了二值图的比较, 显著图中像素的灰度值大于某一阈值时, 取 1, 反之取 0, 这样就得到二值图。阈值的选取采用 FT 算法的自适应阈值, 为显著图的平均像素值的 2 倍, 公式定义如下

$$T_a = \frac{2}{WH} \sum_{x=0}^{W-1} \sum_{y=0}^{H-1} S(x, y) \quad (12)$$

其中, W 和 H 分别是显著图的像素宽度和高度。 $S(x, y)$ 是显著图在 (x, y) 位置上的像素值。

4.1 主观评价

第 1 种分类部分实验结果显示在图 5 中, 从左到右的背景依次越来越复杂。由图 5 看出 IT 和 GB 得到的显著图边缘部分突出, 显著区域不均匀。AC 在简单背景下能够有效检测出显著物体, 但在背景复杂时显著区域显著度不高, 如图 5 中第 2 幅和第 3 幅显著图, 从相应的二值图中可以更加直观清晰地看出。FT、MSS 和 BUSM 的显著图中显著区域整体统一突出, 但当背景复杂时, 显著区域显著度同样不够高, 图 5 中第 3 幅图的二值图中可以看到背景噪声比较多。ADM 显著图边缘部分比较突出, 清晰度较 IT 和 GB 算法要好。本文算法检测到的显著图的显著区域均匀突出、分辨率高, 边界清晰, 同时显著区域的背景区域的对比度也提高了。从图 5 中也可以看出进行二值化后背景噪音影响很小,

同时显著物体整体突出。第 2 种分类部分实验结果如图 6 所示。图 6 中第 1 幅显著目标周围有很多重复的干扰物, IT 和 GB 此时可以抑制干扰物的影响, 但是检测到的显著目标不完整。而 AC, FT、MSS、BUSM 和 ADM 显著图中背景噪声严重。本文算法对于这种噪声的抑制效果很好, 检测到的显著目标也比较均匀完整。第 2 幅图是显著目标的边缘信息很多。从图中可以看到 FT、BUSM 和本文算法对于显著区域的边缘信息检测效果要好于其他 3 种, 且本文算法显著区域的均匀突出的优点再一次表现出来。从前 2 幅的结果可以看到本文算法对于不必要的边缘噪声可以进行抑制, 而对于必要的边缘信息也可以很好的保存。第 3 幅图是存在多个显著物体, FT、MSS 和本文算法检测都比较完整, 且本文算法要优于 FT。

4.2 客观评估

下面从定量的角度进行客观的评估。

第一种是 ROC(receiver operating characteristic) 曲线。ROC 曲线纵坐标为检测率(TPR, true positive rate), 横坐标为误检率(FPR, false positive rate)。

$$TPR = \frac{TP}{TP + FN} \quad (13)$$

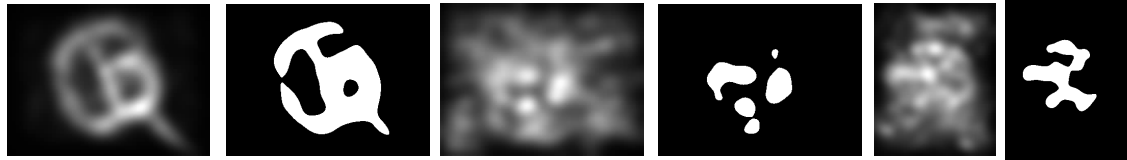
$$FPR = \frac{FP}{TP + FN} \quad (14)$$

其中, TP 为正确识别为正例的个数, FP 为负例误识为正例的个数, FN 为正例误识别为负例的个数。ROC 曲线法简单、直观, 通过图示可观察分析算法的性能, 当错误命中率较小而正确命中率较大时算法的效果最好。几种算法的 ROC 曲线如图 7 所示。图 7(a)是空间域算法的比较, 图 7(b)是频率域算法的比较, 可以看到本文算法在错误命中率较小时所拥有的正确命中率要高于其他算法。

第 2 种评估方法是采用式(12)计算自适应阈值分割图像, 计算分割准确率 P 和分割完全率 R 。分割准确率对应于分割出的区域包含的像素确实属于显著区域的比率, 分割完全率对应于分割出的区域中属于显著区域的像素与分割出的区域像素的比率。一个好的分割算法会同时具有俱佳的分割准确率和分割完全率, 但是不完美的分割, 提高分割完全率会导致分割准确率下降, 反之也是, 所以需要同时考虑两者。一般使用 F (F-measure)度量



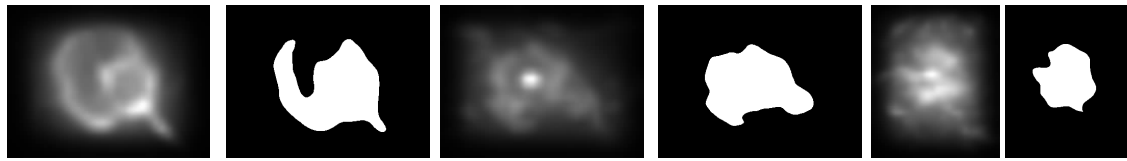
(a) 原图及显著目标模板



(b) IT 算法的显著图及二值图



(c) AC 算法的显著图及二值图



(d) GB 算法的显著图及二值图



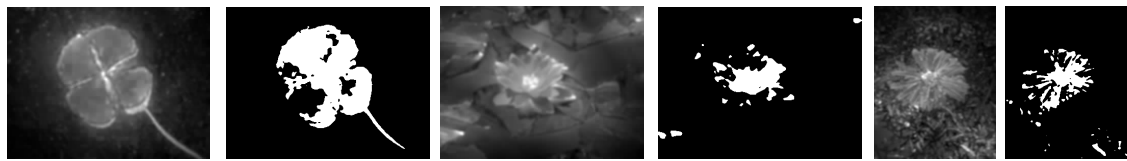
(e) FT 算法的显著图及二值图



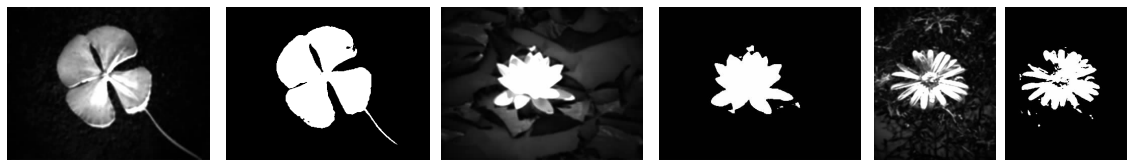
(f) MSS 算法的显著图及二值图



(g) BUSM 算法的显著图及二值图



(h) ADM 算法的显著图及二值图

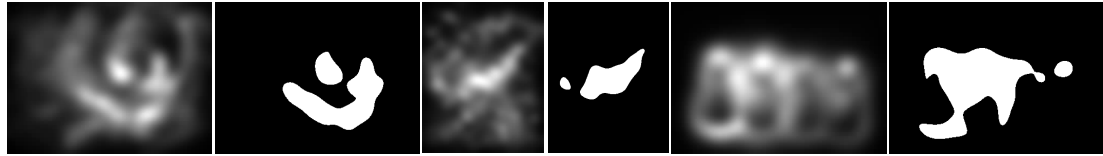


(i) 本文算法的显著图及二值图

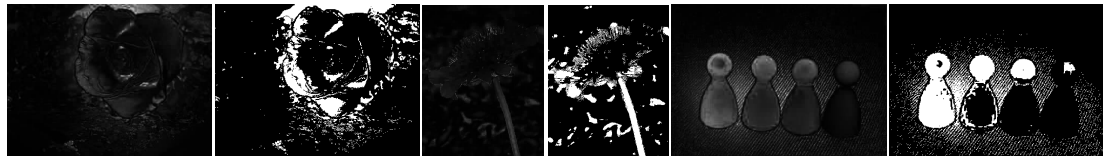
图 5 第 1 类图像产生的显著图



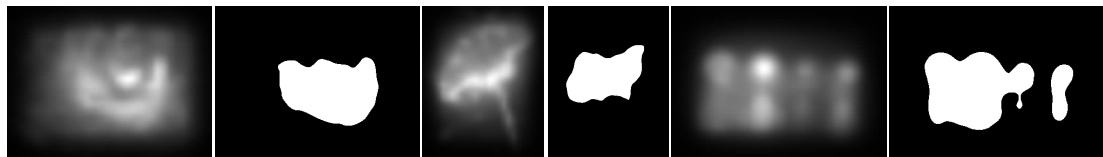
(a) 原图及显著目标模板



(b) IT 算法的显著图及二值图



(c) AC 算法的显著图及二值图



(d) GB 算法的显著图及二值图



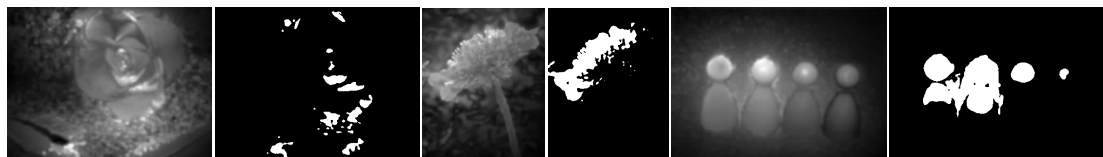
(e) FT 算法的显著图及二值图



(f) MSS 算法的显著图及二值图



(g) BUSM 算法的显著图及二值图

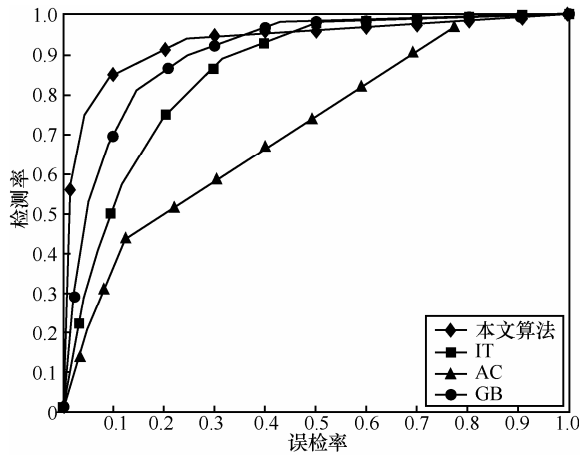


(h) ADM 算法的显著图及二值图

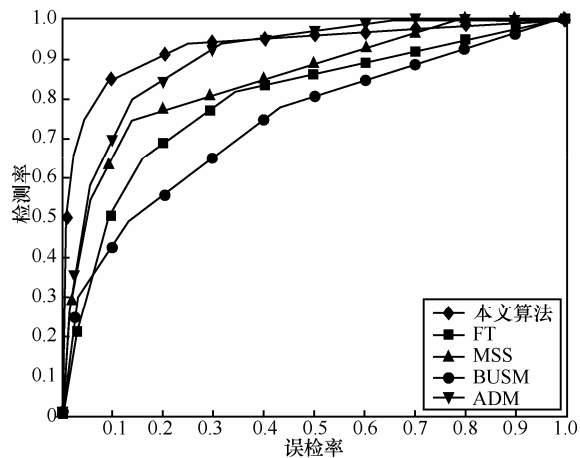


(i) 本文算法的显著图及二值图

图 6 第 2 类图像产生的显著图



(a) 空间域算法的 ROC 曲线比较



(b) 频率域算法的 ROC 曲线比较

图 7 ROC 曲线

$$F_{\beta} = \frac{(1 + \beta)PR}{\beta P + R} \quad (15)$$

其中, β 控制着分割准确率和分割完全率的权重, 这里选择 $\beta=0.3$, 这是一个常用的选择^[10]。P、R 和 F 的值越大说明显著性检测算法产生的显著图越接近于标准的显著图。图 8 为几种算法的分割准确率和分割完全率柱形图, 本文算法的分割准确率和分割完全率表现都优于其他算法。

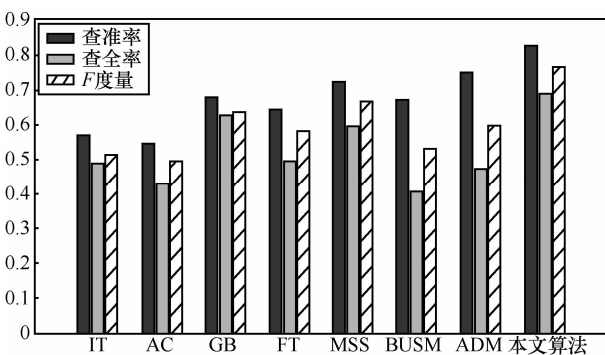


图 8 显著图二值化的分割准确率、分割完全率柱形图

算法运行的环境是 Windows 7, 内存 4 GB, CPU 为 i3-2 350 M, 主频为 3 GHz。IT、AC、GB、FT、MSS、BUSM、ADM 及本文算法的 Matlab 源码计算产生一幅显著图的平均耗时对比如表 1 所示。

表 1 每种算法产生一幅显著图所需时间

算法	时间/s
IT	0.363
AC	89.361
GB	1.793
FT	0.240
MSS	1.562
BUSM	0.164
ADM	7.521
本文算法	0.847

从表 1 中看出 BUSM 算法用时最短, 本文算法运行时间虽不是最小的, 但是要小于空间域中表现最好的 GB 算法和频率域中表现最好的 ADM 算法, 且本文算法的时间控制在秒以内, 具有实用性。因此综合各项性能指标, 本文算法从主观和客观上均有良好的表现。

5 结束语

本文借鉴 HVS 对刺激信号的反应, 在分析 FT、BUSM 和 ADM 算法的基础上提出利用 CSF 滤波和小波变换进行图像显著性检测算法。该算法首先进行颜色空间的转换, 再进行 CSF 滤波和小波分解, 利用图像的亮度和颜色特征提取计算显著值。实验表明, 本文的算法能够有效地抑制背景噪声, 获得完整的显著物体, 与目前公认的显著检测较好的算法相比, 本文算法运算时间较短, 显著物体检测结果与人的主观感觉一致。

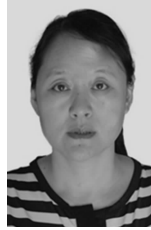
本文算法虽然在图像的显著性检测中取得了良好的结果, 但是仍然存在一些问题需要解决。本文算法对于纹理多的图像检测效果不理想, 这个与 CSF 模型有关, 在 HVS 中具有多种 CSF 模型, 如何更好地利用该模型, 以及更充分地利用小波进行显著性检测是今后工作研究的方向。

参考文献:

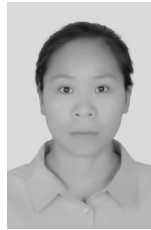
[1] 徐威, 唐振民, 吕建勇. 基于图像显著性的路面裂缝检测[J]. 中国图象图形学报, 2013, 18(1): 69-77.
XU W, TANG Z M, LV J Y. Pavement crack detection based on

- image saliency [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2013, 18(1): 69-77.
- [2] 肖德贵, 辛晨, 张婷, 等. 显著性纹理结构特征及车载环境下的行人检测[J]. *软件学报*, 2014, 25(3):675-689.
XIAO D G, XIN C, ZHANG T *et al.* Saliency texture structure descriptor and its application in pedestrian detection [J]. *Journal of Software*, 2014, 25(3): 675-689.
- [3] 韩冰, 杨辰, 高新波. 融合显著信息的 LDA 极光图像分类[J]. *软件学报*, 2013, 24(11): 2758-2766.
HAN B, YANG C, GAO X B. Aurora image classification based on LDA combining with saliency information [J]. *Journal of Software*, 2013, 24(11):2758-2766.
- [4] 杨柏林, 金剑秋, 江照意, 等. 基于三维几何视觉重要性的纹理图像选择压缩算法[J]. *自动化学报*, 2013, 39(6): 826-833.
YANG B L, JIN J Q, JIANG Z Y, *et al.* Selective compression for texture map image based on visual importance from 3D geometry [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2013, 39(6): 826-833.
- [5] ITTI L, KOCH C, NIEBUR E. A model of saliency-based visual attention for rapid scene analysis [J]. *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1998, 20(11): 1254-1259.
- [6] HAREL J, KOCH C, PERONA P. Graph-based visual saliency[A]. *Advances in Neural Information Processing Systems*[C]. Vancouver, B.C., Canada, 2006. 545-552.
- [7] ACHANTA R, ESTRADA F, WILSON P *et al.* Salient Region Detection and Segmentation *Computer Vision Systems*[M]. Springer Berlin Heidelberg, 2008: 66-75.
- [8] GOFERMAN S, ZELNIK-MANOR L, TAL A. Context-aware saliency detection[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2012, 34(10): 1915-1926.
- [9] HOU X, ZHANG L. Saliency detection: a spectral residual approach[A]. *Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2007)*[C]. Los Angeles, USA, 2007. 1-8.
- [10] ACHANTA R, HEMAMI S, ESTRADA F, *et al.* Frequency-tuned salient region detection[A]. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2009)*[C]. Miami Beach, USA, 2009. 1597-1604.
- [11] ACHANTA R, SUSSTRUNK S. Saliency detection using maximum symmetric surround[A]. *IEEE International Conference on Image Processing (ICIP, 2010)*[C]. Hongkong, China, 2010. 2653-2656.
- [12] NGAU C W H, ANG L M, SENG K P. Bottom-up visual saliency map using wavelet transform domain[A]. *Computer Science and Information Technology (ICCSIT)*[C]. Chengdu, China, 2010. 692-695.
- [13] IMAMOGLU N, LIN W, FANG Y. A saliency detection model using low-level features based on wavelet transform[J]. *IEEE Transactions on Multimedia*, 2013, 15(1): 96-105.
- [14] NADENAU M. Integration of Human Color Vision Models into High Quality Image Compression[D]. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule, Aachen, 2000.
- [15] CHEN T. Digital Camera System Simulator and Applications[D]. Stanford University, CA, 2003.
- [16] LIU T, YUAN Z, SUN J, *et al.* Learning to detect a salient object[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2011, 33(2): 353-367.

作者简介:



郭迎春 (1970-), 女, 河北张家口人, 河北工业大学副教授, 主要研究方向为数字图像处理、模式识别和计算机视觉等。



冯艳红 (1989-), 女, 河北石家庄人, 河北工业大学硕士生, 主要研究方向为图像处理和模式识别。



阎刚 (1977-), 男, 河北唐山人, 河北工业大学副教授, 主要研究方向为图像处理和智能交通。



于明 (1964-), 男, 河北秦皇岛人, 河北工业大学教授、博士生导师, 主要研究方向为图像处理、模式识别和计算机视觉及应用。