

基于 DCT 域视觉显著性检测的图像缩放算法*

罗雅丹, 唐振华[†], 覃团发

(广西大学 计算机与电子信息学院, 南宁 530004)

摘要: 为适应不同终端显示多样化的要求,需对接收到的图像进行缩放调整。针对现有的基于内容感知(content-aware)的图像缩放方法中视觉内容的连贯性易被破坏而出现失真的问题,提出了一个基于离散余弦变换(discrete cosine transform, DCT)域的视觉显著性检测的图像缩放算法。该算法利用 DCT 域的视觉显著性检测模型获取视觉显著图,然后结合视觉显著图和能量分布图进行线裁剪(seam carving),实现了图像的缩放。实验结果表明,该算法与现有的基于内容感知的图像缩放方法相比,不仅保护了视觉显著内容,还保证了图像内容的连贯性,算法质量指数也获得明显的提高。

关键词: 图像缩放; 线裁剪; 视觉显著性检测; 离散余弦变换域

中图分类号: TP391.41; TP301.6

文献标志码: A

文章编号: 1001-3695(2016)01-0296-04

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2016.01.068

Image resizing algorithm based on visual saliency detection in DCT domain

Luo Yadan, Tang Zhenhua[†], Qin Tuanfa

(School of Computer & Electronic Information, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: In order to meet the requirements of different terminals for various display resolution, the received image need to be resized. However, the coherence of visual contents is easy to be broken among the existing image resizing methods based on content-aware. To address this problem, this paper proposed an image resizing algorithm based on visual saliency detection in discrete cosine transform (DCT) domain. This method utilized a saliency detection model in DCT domain to obtain the saliency map. Then employed the saliency map and the energy map to implement seam carving (SC). The experimental results show that the proposed algorithm can not only protect the important contents, but also guarantee the integrity of visual contents, and obtains higher quality index of images by using the proposed method compared with the other content-aware image resizing methods.

Key words: image resizing; seam carving; visual saliency detection; discrete cosine transform (DCT) domain

0 引言

随着信息技术的不断发展,移动终端设备(如智能手机和平板电脑等)的显示尺寸日益多样化。为了不失真地在不同的设备上显示图像,需要对图像进行有效缩放。传统的缩放方法有最邻近插值、双线性插值以及裁剪等,但是这些方法没有考虑图像在不同纵横比和分辨率下的调整,容易造成视觉显著内容的损失或变形失真。因此,Avidan 等人^[1]提出基于内容感知的图像缩放方法——线裁剪技术,线裁剪算法是在图像能量图上通过动态规划的方法找到最优裁剪线的路径,通过插入或移除线改变图像大小。在此基础上,Rubinstein 等人^[2]提出了线裁剪、缩放和传统裁剪的融合算法,结合线裁剪和比例缩放。文献[3]利用双向相似度函数、颜色相似性和线能量变化确定线裁剪的最佳数目。为了降低线裁剪的计算复杂度,Silveira 等人^[4]在线裁剪中添加最小能量窗的概念。文献[5]则利用语义信息检测内容的边界再进行线裁剪。但是这些方法并没有考虑对图像中视觉显著性信息进行保护,在进行线裁剪

的时候容易造成重要信息的丢失,从而导致图像的失真。

将视觉显著性检测与图像缩放有机结合是解决上述问题的有效方法之一^[6,7]。但是,现有的典型视觉显著性检测算法均是在非离散余弦变换(discrete cosine transform, DCT)域中实现的,如模拟人类视觉注意力体系算法^[8]、基于局部和全局角度的内容感知对比算法^[9]、四元相位谱算法^[10],以及基于相位谱和调谐幅度谱的算法^[11]。目前互联网上传输和存储的图像码流是采用联合图像专家组(joint photographic experts group, JPEG)标准进行压缩,若用上述检测算法需将 JPEG 图像完全解压到像素域,不仅消耗终端的能量,而且会增加处理的时间。因而,基于 DCT 域的视觉显著性检测算法^[12,13]应运而生。Fang 等人^[12,14]提出将基于 DCT 域的视觉显著性检测模型用于图像的自适应缩放中。该方法将 JPEG 位流部分解码后,在 DCT 域的基础上提取视觉显著性特征,最后结合线裁剪实现图像缩放。但该方法并没有对视觉内容采取完善的保护,经过线裁剪之后视觉内容的连贯性容易被破坏。

本文借鉴文献[12]中将 DCT 域视觉显著性检测与线裁剪

收稿日期: 2014-11-28; **修回日期:** 2015-01-13 **基金项目:** 国家自然科学基金项目(61461006,61261023); 广西自然科学基金项目(2013GXNSFBA019271); 广西教育厅科研项目(201106LX016)

作者简介: 罗雅丹(1992-),女,硕士研究生,主要研究方向为基于内容的图像、视频缩放;唐振华(1979-),男(通信作者),副教授,硕导,博士,主要研究方向为基于内容的图像/视频缩放、分布式视频编码(tangedward@126.com);覃团发(1966-),男,教授,博导,博士,主要研究方向为无线多媒体通信、网络编码。

算法结合的思想,提出了基于 DCT 域视觉显著性检测的自适应图像缩放算法,该算法在 DCT 域中进行视觉显著性检测,并结合视觉显著图和能量分布图作为新的累积能量图,在此基础上对图像进行线裁剪和微调,最终得到所需的缩放图像。本文算法与文献[12]的区别在于,本文算法在线裁剪之前提取出视觉显著区域并对之添加权重系数,并根据视觉显著图和能量分布图确定最佳能量裁剪路径,不仅保护了视觉显著内容,同时还保证了图像内容的连贯性。

1 算法框架

图 1 为基于 DCT 域的视觉显著性检测的图像缩放算法框图。在本文算法中主要完成两部分的操作:建立视觉显著性检测模型和实现图像缩放。对于建立视觉显著性模型而言:a)将 JPEG 图像部分解码至 DCT 域,利用 DCT 系数提取亮度、颜色和纹理等特征;b)计算这些特征的差异并建立 DCT 块的高斯模型;c)采用归一化的融合方法建立图像的视觉显著性模型。在实现图像缩放的部分中:a)利用阈值分割得到基于 8×8 DCT 块的能量空间分布图;b)计算需删除的裁剪线数目;c)根据视觉显著图和能量分布图确定最佳能量裁剪路径,并根据需删除裁剪线数目进行基于 DCT 块的线裁剪操作;d)根据用户端的分辨率采用传统的比例缩放方法进行微调操作,获得满足用户端的尺寸需求的图像输出。

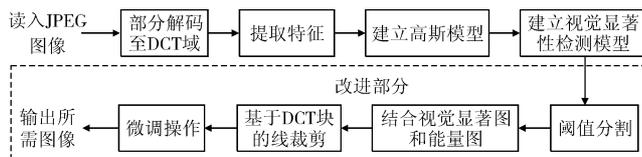


图 1 基于 DCT 域的视觉显著性检测的图像缩放算法框图

2 算法描述

2.1 JPEG 部分解码

系统首先对输入的 JPEG 压缩码流进行部分解码^[15],即令码流经熵解码和反量化后获得对应的 DCT 系数。设 JPEG 编码图像采用 YCrCb 的 4:2:0 分量采样格式,即一个最小编码单元由四个 8×8 亮度块和两个 8×8 色度块组成。

2.2 DCT 域的视觉显著性检测

a)提取图像的颜色、亮度和纹理特征。本文采用文献[12]的方法,利用 8×8 的 DCT 块中的 DC 系数来提取亮度特征 I 以及颜色特征 C_{rg} 和 C_{by} ,用 AC 系数获取纹理特征 T 。

b)计算颜色、强度和纹理特征差异。对于两个 8×8 块而言,计算其颜色和亮度特征的差异,即计算两个块对应的亮度或者颜色特征值之差;而计算其纹理特征的差异,则利用范数获取块与块之间的差异度,即块 i 和块 j 之间的纹理特征差异 $D_{ij} = \|t_i - t_j\|_2$,其中, $t_j \in T_j, t_i \in T_i, T_i$ 和 T_j 分别为块 i 和块 j 的纹理特征矩阵 T 。

c)获得视觉显著性检测模型。采用基于 DCT 块间的欧氏距离的高斯模型来定义块差异的加权,结合强度、颜色和纹理特征差异矩阵,获得四个特征映射图 $S^k (k=1,2,3,4)$,最后用以归一化为基础的融合方法结合四个特征映射图得到最终的视觉显著图 S 。

2.3 图像缩放

文献[12]在 DCT 域的视觉显著图基础上采用线裁剪^[16]

进行图像缩放,并根据纹理的均匀性确定消除裁剪线的数量,然而这种方法仅仅是根据视觉显著图计算前向累积能量图,在寻找能量最小路径时,路径可能会波动较大而产生锯齿状变形,破坏物体的连贯性。为了解决上述问题,本文算法针对视觉显著内容添加了保护措施,并根据视觉显著图和能量分布图确定最佳能量裁剪路径,保证了图像内容的连贯性。

2.3.1 获取能量图

为了提取视觉显著区域,需要对视觉显著图进行阈值分割,以获得视觉显著区域和非显著区域。本文采用阈值自适应确定方法——最大类间方差法(OTSU)^[17]选取阈值 T_0 。对视觉显著图进行 OTSU 阈值分割后的空间能量分布图包括能量点(视觉显著内容,能量值为 1)和非能量点(非视觉显著内容,能量值为 0)。设输入的视觉显著图为 $S(x,y)$,输出的空间能量分布图为 $E_m(x,y)$,则

$$E_m(x,y) = \begin{cases} 1 & S(x,y) \geq T_0 \\ 0 & S(x,y) < T_0 \end{cases} \quad (1)$$

2.3.2 提取视觉显著区域

以孔雀图像为例,视觉显著区域的提取流程如图 2 所示。

a)原始图像经视觉显著性检测得到视觉显著图,视觉显著图经过 OTSU 阈值分割后获得空间能量分布图。

b)以空间能量分布图中心点为圆心,图像的最短边的 γ ($\gamma \leq 1$) 倍为直径做一个圆作为视觉显著内容的搜索区域。其中,考虑到很多名画、雕塑、摄影作品的主题大多在画面的 0.618 即黄金分割点处^[18],而且 0.618 被公认为最具有审美意义的比例数字,本文中设置 $\gamma = 0.618$ 。

c)在该圆内遍历并统计能量点分布位置,根据能量点集中分布的位置锁定在能量点区域上的圆弧。

d)在该段圆弧上随机选择一个能量点,采用八邻接寻找法进行发散式检索,检索的规则是:只要八个邻接点的其中一个点是能量点(能量值为 1),则满足条件并归为受保护能量点(设置能量值为 255)。完成发散式检索后,除了能量值为 255 的其他点都设置为非能量点(能量值为 0),能量值为 255 的所有点集构成视觉显著区域。

e)在视觉显著区域内找到最高点、最低点、最左点和最右点四个极值点,以这四个点作为保护框的上下左右边界线上的点,从而确定保护框的大小和位置。

f)为了避免线裁剪把保护框内的一些非能量点删除而影响图像的视觉连贯性,将保护框内的点全部设置为能量点,得到保护框能量分布图。

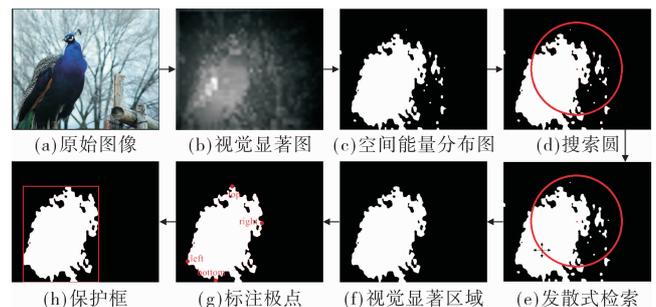


图 2 视觉显著区域提取流程图

2.3.3 对能量分布图加权

获得能量图的保护框之后,对能量分布图添加相应的权重系数:

$$P_m = p_1 P_b + p_2 E_m + p_3 S \quad (2)$$

其中: P_b 是保护框能量分布图; E_m 是空间能量分布图; S 是视觉显著图; P_m 是受保护的图像能量分布图; $p_i (i = 1, 2, 3)$ 是保护系数, 并且 $p_1 + p_2 + p_3 = 1$ 。由于两种能量分布图和视觉显著图对寻找最佳裁剪路径的贡献是一样的, 所以这三种图的权重系数平均分配, 即 $p_1 = p_2 = p_3 = 1/3$ 。

2.3.4 计算需要删除的裁剪线数目

为了完整地保护视觉显著内容, 根据能量分布图的保护框大小可确定可删除的裁剪线数目。保护框尺寸越小, 可删除的裁剪线越多; 反之, 则可删除的裁剪线越少。设 B_t 、 B_b 、 B_l 和 B_r 分别为保护框的上下左右边界点, o_h 和 o_w 分别为原始图像的高度和宽度, 可删除的基于块的裁剪线数目可利用式(3)~(6)进行计算:

$$p_h = B_b - B_t \quad (3)$$

$$n_h = \frac{1}{8}(o_h - p_h) \quad (4)$$

$$p_w = B_r - B_l \quad (5)$$

$$n_w = \frac{1}{8}(o_w - p_w) \quad (6)$$

其中: p_h 和 p_w 分别为需保护的高度和宽度的数目, n_h 和 n_w 分别表示在水平和垂直方向上可删除的基于块的裁剪线数目。本文算法是基于 8×8 的 DCT 块的, 所以式(4)和(6)中需要乘以因子 $1/8$ 来计算可删除的线数目。

假设已知用户端屏幕的高度为 u_h , 结合在水平方向上可删除的裁剪线数目 n_h , 可得到在水平方向上需要删除的裁剪线的数目:

$$n_d = \begin{cases} n_h & \Delta n = o_h - u_h \geq n_h \\ \Delta n & \Delta n = o_h - u_h < n_h \end{cases} \quad (7)$$

其中: Δn 为原始图像高度与用户端屏幕高度之差; n_d 表示在水平方向上需要删除的线数目。

采用类似的方法可获得在垂直方向上需要删除裁剪线的数目。

2.3.5 基于块的线裁剪操作

本文是在 8×8 块的级别上进行操作的, 因此, 在线裁剪中每一条线表示连接的块, 而不是像素。本文基于块的线裁剪方法采用 Rubinstein 等人^[16] 的前向累积能量动态规划技术, 以确定最佳的块裁剪路径。具体操作如下:

a) 根据受保护的图像能量分布图 P_m 计算出各个块的删除成本:

$$\begin{cases} C_U(x, y) = |P_m(x, y+1) - P_m(x, y-1)| \\ C_L(x, y) = |P_m(x-1, y) - P_m(x, y-1)| + C_U(x, y) \\ C_R(x, y) = |P_m(x-1, y) - P_m(x, y+1)| + C_U(x, y) \end{cases} \quad (8)$$

其中: C_U 、 C_L 和 C_R 分别是所在块的上方、左边和右边三个相邻块的删除成本。

b) 采用如下动态规划技术确定需要进行线裁剪的图像 I 的前向累积能量图 M :

$$M(x, y) = P_m(x, y) + \min \begin{cases} M(x-1, y-1) + C_L(x, y) \\ M(x-1, y) + C_U(x, y) \\ M(x-1, y+1) + C_R(x, y) \end{cases} \quad (9)$$

其中: $M(x, y)$ 表示基于块的最佳裁剪线的位置点。

c) 从前向累积能量图 M 最后一行中找出最小能量值的位置点 (x, y) , 并以此为入口自下往上搜索, 每次取上一行中相邻三点中累积能量最小的那个点作为该条裁剪路线在该行的

点, 即:

$$\text{seam}(x-1) = \min\{(x-1, y-1), (x-1, y), (x-1, y+1)\} \quad (10)$$

按此规则一直搜索到第一行即可确定整个路线, 获取当前的最佳垂直裁剪路径。类似的规则, 从左到右搜索可以获取当前的最佳水平裁剪路径。根据需要删除的线数目, 交替进行垂直和水平方向上的最佳线裁剪的路径搜索并删除该路径上的所有点, 重复该步骤, 直至删除的线数目与所需要删除的线数目一致, 得到新图像。

2.3.6 图像大小微调操作

由于线裁剪删除的线是 DCT 块, 所删除的块包含的像素点数目不一定与最终需要删除的像素点数目刚好一致, 所以在线裁剪之后还需要对图像的大小进行细微的调整, 以满足用户端的尺寸需求。设 Δn_h 为原始图像高度与用户端屏幕高度之差, n_d 为在水平方向上需要删除的线数目, ε_h 为水平方向上经过线裁剪的图像高度与用户端屏幕高度之间相差的像素点, 则 Δn_h 和 ε_h 的关系如下:

$$\Delta n_h = 8 \times n_d + \varepsilon_h \quad 0 \leq \varepsilon_h < 8 \quad (11)$$

同理计算出垂直方向上经过线裁剪的图像宽度与用户端屏幕宽度之间相差的像素点 ε_w 。当 ε_h 或 ε_w 不等于 0 时, 用传统的比例缩放方法即最近邻插值法对线裁剪之后的图像进行细微的调整使得新图像高度/宽度与用户端屏幕高度/宽度一致, 即可获得匹配用户端尺寸的图像。

3 实验结果与分析

本文采用专门针对图像缩放的公共图像数据库^[19] 进行实验测试。实验的硬件和软件环境如下: 处理器 Intel Pentium G2010 2.8 GHz, 内存容量 4 GB, 软件版本 MATLAB R2012b。实验采用的图像分辨率有 267×400 、 384×256 和 400×480 等。为了衡量算法的性能, 本文从图像主观效果和图像客观缩放质量两方面分别对本文的算法和文献[12]算法进行了性能的比较。

3.1 主观结果比较

图 3~6 是原始分辨率和目标分辨率均不相同的四幅图像的缩放结果比较。其中, 图 3 和 4 中缩放后的图像在高度上与原始图像一致, 宽度变为原来的 75%; 图 5 和 6 中缩放后的图像在宽度上与原始图像一致, 高度变为原来的 75%。图 3~6 中采用文献[12]算法缩放后的图像均出现不同程度的失真, 失真内容已在各个图中用黄色方框标注出来。例如, 图 3(b) 孔雀的尾巴以及右侧的木头和树枝均出现明显的锯齿状失真; 图 4(b) 房子最右侧的两个窗户的状态发生了变化(由打开变成闭合); 图 5(b) 女士帽子边缘和帽子下方的头发产生了明显的锯齿状变形; 图 6(b) 铃铛的摇棒顶端和铃铛整体形状均发生了弯曲和变形。这主要是因为文献[12]算法仅仅是根据视觉显著图 S 计算前向累积能量图 M 进行线裁剪操作, 在寻找能量最小路径的时候, 可能路径波动较大而产生锯齿状变形, 破坏物体的连贯性。而本文算法结合视觉显著图 S 、空间能量分布图 E_m 和保护框能量分布图 P_b 作为确定最佳裁剪路径的能量图, 因此保证了显著内容的数值较大而没有成为线裁剪的路径; 不显著的内容则因为三种图的加权而区分出哪些内容是更为不显著的部分, 从而使得寻找的能量最小路径不会有太大的波动。上述分析表明, 采用本文算法重建图像的主观效果比文献[12]更好。



图 3 原始分辨率为 400×326 , 目标分辨率为 300×326 的图像缩放效果比较

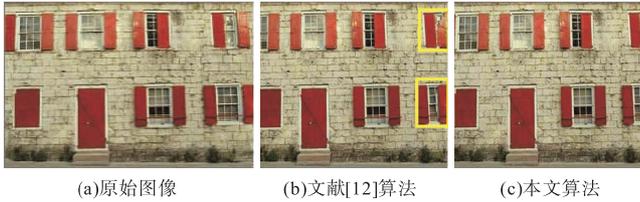


图 4 原始分辨率为 384×256 , 目标分辨率为 288×256 的图像缩放效果比较

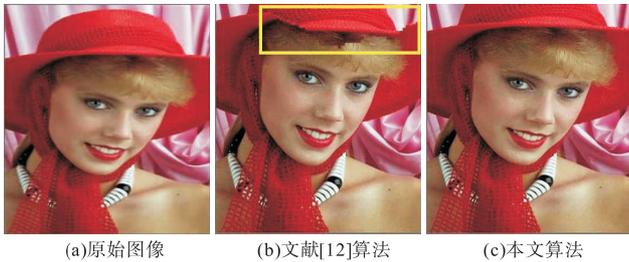


图 5 原始分辨率为 320×480 , 目标分辨率为 320×360 的图像缩放效果比较



图 6 原始分辨率为 400×400 , 目标分辨率为 400×300 的图像缩放效果比较

3.2 客观结果比较

本文采用文献[20]提出的图像缩放质量评价标准对本文算法的性能进行客观评价:该评价标准通过遍历原始图像和缩放图像在不同尺度空间的相关性得到图像质量评价的质量指数,该质量指数是 $[0, 1]$,数值越大说明两幅图像的匹配度越高,即缩放图像的质量越好。图像质量指数比较如表 1 所示。

在该实验测试中,孩子、孔雀、房子和格子这几幅图像保持高度不变,宽度缩小至原图的 75%;鹿、摇铃和红帽子这三幅图像保持宽度不变,高度缩小至原图的 75%;鸟、硬币和黑衣人的高度缩小至原图的 75%,宽度缩小至原图的 75%;情侣^①、情侣^②和情侣^③的高度均不变,宽度分别缩小至原图宽 80%、60%和 50%。

由表 1 可看出:本文算法的质量指数均高于文献[12]算法的质量指数,相对增量从 0.17% 到 24.76% 不等,平均的相对增量为 8.99%。上述结果表明,采用本文算法缩放后的图像质量明显优于采用文献[12]算法获得的图像,这主要是由于本文算法结合视觉显著图 S 、空间能量分布图 E_m 和保护框能量分布图 P_b 作为确定最佳裁剪路径的能量图,从而使得最佳能量路径优于文献[12]的路径,这样不仅能够有效地保护视觉显著内容,还保证了其他内容的连贯性。

表 1 图像质量指数比较

图名	文献[12]	本文	相对增量/%
孩子	0.692	0.726	4.9
孔雀	0.619	0.68	9.83
房子	0.645	0.713	10.46
格子	0.712	0.716	0.56
鹿	0.75	0.751	0.17
摇铃	0.633	0.725	14.58
红帽子	0.739	0.922	24.76
鸟	0.661	0.668	1.09
硬币	0.525	0.575	9.55
黑衣人	0.622	0.662	6.44
情侣 ^①	0.715	0.871	21.76
情侣 ^②	0.645	0.698	8.26
情侣 ^③	0.624	0.646	3.63
平均值	0.66	0.72	8.99

注:相对增量(%) = (本文算法的质量指数 - 文献[12]算法的质量指数) / 文献[12]算法的质量指数。

3.3 算法复杂度比较

为了对上述两种算法的计算复杂度进行比较,本文将算法运行时间予以比较,结果如表 2 所示。在表 2 中,通过对比两种算法运行程序的时间,本文算法运行所需时间比文献[12]算法运行时间增加的幅度在 0.043 ~ 0.089 s,平均的相对增量为 0.48%,尚未达到 1%,可见本文算法复杂度的增加在可承受的范围內。

表 2 算法运行时间比较

图名	文献[12]/s	本文/s	Δ/s	相对增量/%
孩子	14.835	14.893	0.058	0.39
孔雀	12.863	12.952	0.089	0.69
房子	8.059	8.111	0.052	0.64
格子	9.97	10.054	0.084	0.84
鹿	12.583	12.633	0.05	0.4
摇铃	18.046	18.111	0.065	0.36
红帽子	15.656	15.719	0.063	0.4
鸟	10.441	10.484	0.043	0.41
硬币	12.893	12.943	0.05	0.39
黑衣人	9.903	9.949	0.046	0.46
情侣 ^①	10.962	11.014	0.052	0.47
情侣 ^②	10.699	10.751	0.052	0.48
情侣 ^③	10.574	10.624	0.05	0.47
平均值	12.114	12.172	0.058	0.48

注: Δ/s = 本文算法运行时间 - 文献[12]算法运行时间;相对增量(%) = (Δ / 文献[12]算法运行时间)。

4 结束语

本文提出了基于 DCT 域视觉显著性检测的自适应图像缩放算法,该算法在 DCT 域中进行视觉显著性检测,并特别结合视觉显著图和能量分布图作为新的累积能量图,在此基础上进行线裁剪和微调得到所需的缩放图像。由于本文算法结合了视觉显著图和能量分布图确定最佳裁剪路径,使得寻找的能量路径不会经过显著区域,角度也不会有太大的波动,保护视觉显著内容的同时还能够保证其他内容的连贯性。实验结果表明,本文算法不仅整体主观效果明显比文献[12]算法的主观效果好,而且质量指数的平均值比文献[12]算法指数的平均值提高了 8.99%。该算法不仅可以用于云端 JPEG 图像发送到移动设备端前的缩放操作当中,还可以用于现流行的视频编码技术的缩放操作当中。

(上接第 299 页)

参考文献:

- [1] Avidan S, Shamir A. Seam carving for content-aware image resizing [J]. *ACM Trans on Graphics*, 2007, 26(3): 10.
- [2] Rubinstein M, Shamir A, Avidan S. Multi-operator media retargeting [J]. *ACM Trans on Graphics*, 2009, 28(3): 23.
- [3] Dong Weiming, Zhou Ning, Paul J C, *et al.* Optimized image resizing using seam carving and scaling [J]. *ACM Trans on Graphics*, 2009, 28(5): 125.
- [4] Silveira C L B, Mierlo F D O, Luiz G J, *et al.* Faster seam carving with minimum energy windows [C]//Proc of the 29th Annual ACM Symposium on Applied Computing. 2014.
- [5] Wu Lifang, Gong Yu, Yuan Xingdi, *et al.* Semantic aware sport image resizing jointly using seam carving and warping [J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2014, 70(2): 721-739.
- [6] Battiato S, Farinella G M, Puglisi G, *et al.* Saliency-based selection of gradient vector flow paths for content aware image resizing [J]. *IEEE Trans on Image Processing*, 2014, 23(5): 2081-2095.
- [7] Yan Bo, Yuan Binhang, Yang Bo. Effective video retargeting with jittery assessment [J]. *IEEE Trans on Multimedia*, 2013, 16(1): 272-277.
- [8] Itti L, Koch C, Niebur E. A model of saliency-based visual attention for rapid scene analysis [J]. *IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1998, 20(11): 1254-1259.
- [9] Goferman S, Zelnik-manor L, Tal A. Context-aware saliency detection [J]. *IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2012, 34(10): 1915-1926.
- [10] Guo Chenlei, Zhang Liming. A novel multiresolution spatiotemporal saliency detection model and its applications in image and video compression [J]. *IEEE Trans on Image Processing*, 2010, 19(1): 185-198.
- [11] 李崇飞, 高颖慧, 卢凯, 等. 基于相位谱和调谐幅度谱的显著性检测方法[J]. *中国图象图形学报*, 2012, 17(7): 821-827.
- [12] Fang Yuming, Chen Zhenzhong, Lin Weisi, *et al.* Saliency detection in the compressed domain for adaptive image retargeting [J]. *IEEE Trans on Image Processing*, 2012, 21(9): 3888-3901.
- [13] Zhang Jiangyang, Li Shangwen, Kuo C C J. Compressed-domain video retargeting [J]. *IEEE Trans on Image Processing*, 2014, 23(2): 797-809.
- [14] Fang Yuming, Lin Weisi, Chen Zhenzhong, *et al.* A video saliency detection model in compressed domain [J]. *IEEE Trans on Circuits and Systems for Video Technology*, 2013, 24(1): 27-38.
- [15] Wallace G K. The JPEG still picture compression standard [J]. *Communications of the ACM*, 1991, 34(4): 30-44.
- [16] Rubinstein M, Shamir A, Avidan S. Improved seam carving for video retargeting [J]. *ACM Trans on Graphics*, 2008, 27(3): 16.
- [17] Otsu N. Threshold selection method from gray-level histograms [J]. *IEEE Trans on Systems, Man and Cybernetics*, 1979, 9(1): 62-66.
- [18] http://en.wikipedia.org/wiki/Golden_ratio [EB/OL].
- [19] http://ivrg.epfl.ch/supplementary_material/RK_CVPR09/index.html [EB/OL].
- [20] Liu Yongjin, Luo Xi, Xuan Yuming, *et al.* Image retargeting quality assessment [J]. *Computer Graphics Forum*, 2011, 30(2): 583-592.