

图像拼接质量评价方法

万国挺, 王俊平, 李锦, 曹洪花, 汪松, 王乐, 李亚宁, 韦蓉

(西安电子科技大学 通信工程学院, 陕西 西安 710071)

摘要: 在现有图像质量评价方法相关原理基础上, 提出了一种基于图像边缘信息的拼接质量评价新方法。该方法针对图像拼接结果的特点, 先对待评价图像进行边缘提取, 然后利用拼接前后图像的边缘轮廓信息, 综合图像像素误差信息和结构信息, 根据其均值和方差等统计信息与影响图像拼接质量的主要因素(拼接错位和亮度突变)之间的关系, 对拼接图像进行评价。该评价方法得出的评价结果更加符合人眼视觉对图像拼接质量的主观评价感受, 较准确地反映了拼接图像的真实质量和所使用图像拼接算法的性能。

关键词: 图像拼接; 质量评价; 差分边缘谱; 边缘检测

中图分类号: TP391.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2013)08-0076-06

Method for quality assessment of image mosaic

WAN Guo-ting, WANG Jun-ping, LI Jin, CAO Hong-hua, WANG Song, WANG Le, LI YA-ning, WEI Rong

(School of Communication Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: On the basis of the theory of existing methods for image quality assessment, a novel method for quality assessment of mosaicked image based on the information of image edge was presented. The method was in accordance with the features of mosaicked image. Firstly, the edges of image were detected. Then according to the information of image edges, the information of pixel error and structure was considered. The mean value and variance of the difference of edge map were related with the misplacement and the brightness mutation, which influenced the quality of mosaicked image. Lastly, the evaluate procedure was done based on the relationship. The new method was more consistent with the subjective feeling to the mosaicked image quality. This method accurately reflects the real quality of mosaicked image and the performance of the algorithm of image mosaic.

Key words: image mosaic; quality assessment; difference of edge map; edge detection

1 引言

人们获取的信息中约 80% 来自视觉, 而随着社会信息化的不断深入, 这一比例也越来越高。无论数码产品如何发展, 通过它们获取的图像和视频等多媒体信息最终都将服务于人, 因此, 图像处理技术的发展归根结底上需要与人的主观视觉感受为基准。图像质量评价技术^[1,2]正是为了对各种图像处理技术的性能进行衡量, 从而促进相关技术的发展。同样地, 图像拼接质量评价是改进图像拼接算法的关键, 是衡量图像拼接结果是否与人眼视觉主

观评价相一致的重要手段。

图像质量评价方法的研究经过了很长时间的的发展, 也一直是图像处理领域的热点之一, 国内外有很多专家和学者在这方面做了大量的研究工作^[3-7]。图像质量评价分为主观评价和客观评价^[8], 此外, 还有正在发展的无参考图像评价方法^[9,10]。由于图像质量的好坏在很大程度上取决于人眼获取图像信息后大脑的主观反应, 属于偏主观的一个概念, 因此主观评价一直占据着绝对主流地位, 也是客观评价方法的努力方向, 例如德克萨斯大学的主观图像质量评价数据库^[11]、美国的 NIIRS^[12] (national

收稿日期: 2013-03-25; 修回日期: 2013-07-10

基金项目: 西安市科技计划基金资助项目 (CX1248⑤); 国家自然科学基金资助项目 (61173088); 111 工程基金资助项目 (B08038)

Foundation Items: The Science & Technology Program of Xi'an (CX1248⑤); The National Natural Science Foundation of China (61173088); 111 Project (B08038)

imagery interpretability rating scale)等。但是人的主观性过强,由人力进行的主观评价方法所需人力消耗太大,效率太低,并且评价结果较难准确量化,整个评价过程成本过高,耗时过长。以上种种因素导致人工主观评价难以胜任海量图像的大规模评定,也不利于图像质量评价的模块化、自动化实现。目前具有代表性较为成熟的客观图像质量评价方法主要有基于像素误差信息的 PSNR^[13]和基于结构相似度的 SSIM^[14]方法。这 2 种方法各有各的优点和不足之处,PSNR 由于计算简单和硬件实现在相关的领域得到了一定的应用,SSIM 评价得到的结果相比 PSNR 评价的结果更加符合人眼视觉的主观评价,且该计算方法较其他部分参考评价方法也相对简单,因此得到了更加广泛的应用。但是由于图像拼接结果的特殊性,对图像拼接质量的评价不需要对噪声和高斯模糊等失真因素敏感,而是注重于图像拼接部位是否有错位以及边界过渡是否平滑等角度,因此现有的图像质量评价方法并不适用于图像拼接质量的评价。

本文针对图像拼接的特点,提出一种边缘差分谱评价法(DoEM, difference of edge map),实现了对图像拼接结果的质量评价,通过与代表性的经典单幅图像评价方法 PSNR 和 SSIM 的比较,表明了本文方法的有效性。该方法旨在通过对图像拼接结果做出针对性的质量评价,从而反过来为促进图像拼接技术的改进提供参考,同时为实际生产中图像拼接产品输出评估提供技术手段。

2 DoEM 边缘差分谱评价法

现有的图像评价方法都是以同一场景为对象,对其进行相似度评价的,且评价大多从图像噪声、模糊、降质等角度展开。由于图像拼接结果的特殊性,对图像拼接质量的评价不需要对噪声和高斯模糊等失真因素过于敏感,而是注重于图像拼接部位是否有错位以及边界过渡是否平滑等角度,因此现有的图像质量评价方法并不适用于图像拼接质量的评价。

2.1 DoEM 评价法基本思想

根据图像拼接质量的主观评价经验,对图像拼接质量的评价首先注重图像拼接是否存在错位,其次是拼接后图像重叠区域是否平滑过渡。这 2 种影响因素在图像的边缘轮廓上都有所体现,因此 DoEM 结合图像像素信息统计和结构信息相似性原理,利用图像边

缘轮廓图像,对其差分谱信息进行统计,进而对图像拼接质量进行评价。综合考虑各种边缘检测算子的特点和图像拼接质量的评价因素,DoEM 不需对噪声敏感,且边缘定位精度要求不高,因此采用 Sobel 边缘检测算子进行边缘提取^[15]。

DoEM 的基本思想是:首先对待检测图像进行边缘检测,分别得到原始图像和拼接后图像的边缘信息,对边缘谱进行一定尺度的高斯平滑,然后对两图的边缘谱进行差分计算,之后对得到的差分谱按照一定规则进行加权,对加权后的差分谱进行统计分析,最后根据统计信息计算评分。

2.2 DoEM 评价法步骤

DoEM 评价法大致上可分为 3 个步骤。

1) 图像边缘检测

首先对待评价图像和未经变换的原始图像进行灰度化,使用 Sobel 边缘检测算子分别进行边缘提取,得到边缘图像。

2) 图像边缘差分谱构建

边缘差分谱就是对图像的边缘图进行差分得到的谱图,先对图像分别进行边缘检测,再将两幅边缘图像进行差分运算,得到图像对应的边缘差分谱。DoEM 对边缘谱进行差分计算之前先进行高斯平滑。经过高斯平滑后的边缘谱不仅能够抑制脉冲噪声的影响,更主要的目的在于能够使不同程度的错位图像对应的边缘差分谱呈梯度变化,从而更好地进行量化评分。

差分谱原理如图 1 所示,错位和亮度差异导致的差分信息各不相同,亮度差异得到的衰减边缘差分较平缓,方差很小,且一般均值也较小;而错位导致的边缘差分方差较大,且随着错位程度的不同方差也不同,错位越严重均值和方差同时都越大。

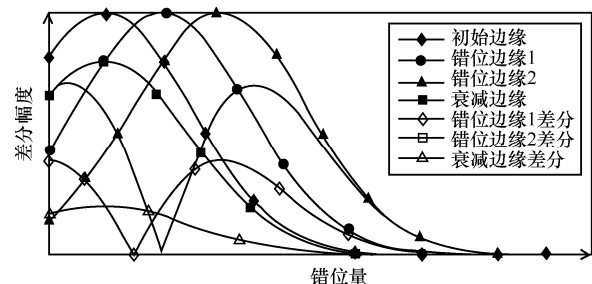


图 1 高斯差分梯度变化原理示意

由主观评价经验可知,图像拼接质量的优劣受拼接后图像中两图交界区域的拼接效果影响较大。因此需要对所得到的边缘差分谱中不同区域的信

息分别处理才能更好地模拟视觉上对图像拼接质量的判断效果。DoEM 引入权值矩阵，在得到边缘差分谱之后，使用权值矩阵对差分谱进行加权。权值矩阵元素取值范围为 0~1，越靠近拼接图像重叠区域的边界取值越大。

3) 统计差分谱信息并计算评分

决定图像拼接质量的两大要素：是否存在错位和亮度过渡，平滑在边缘差分谱上表现的形式不同。拼接错位具体表现为差分谱整体轮廓重影，而亮度突变则表现为边界区域边缘差分谱有明显线状或条状亮区，而其他区域为暗或者很低亮度，且方差非常小。综合来说，边缘差分谱的均值和方差与决定图像拼接质量的两大因素的关系如表 1 所示。DoEM 检测边界区域差分谱的亮度均值，将其与整体均值相比，通过其比值来判定亮暗突变是否占据质量评价的主导地位，本文将该比值作为亮暗突变系数加入评分计算中，实现两大要素对图像拼接质量评价占比的灵活变动。

表 1 影响评价的两大因素与统计数据的关系

评价因素	μ	σ_2
错位程度	↑↑	↑↑↑
亮度差异	↑↑	↑

注：向上箭头表示正相关关系，箭头数量表示影响程度。

经验表明，当方差较大时，图像拼接质量主要由错位程度决定，而方差较小时，则可能同时存在亮度突变和较小的错位，因此 DoEM 在计算评分时，亮度突变和错位因素的评价所占比重随着差分谱的方差变化动态调整。如将要在第 3 节提到的，主观评价曲线形状应该呈现墨西哥草帽型，经过曲线函数模拟以及大量仿真修正，得到具体计算公式如下：

$$DoEM = e^{-\frac{\sigma^2}{c_4}} \left(\frac{\mu_e e^{-\frac{\mu_e}{c_1}} + \mu_a e^{-\frac{\mu_a}{c_1}}}{\mu_e + \mu_a} \right) + (1 - e^{-\frac{\sigma^2}{c_4}}) e^{-\frac{\sigma^2}{c_3}} \quad (1)$$

其中， μ_e 为边缘差分谱过渡区域边界区均值， μ_a 为过渡区域整体均值， σ^2 为过渡区域整体方差。 C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 分别为 4 个常量，其中， C_1 、 C_2 根据评分随边缘差分谱均值变化的相关程度确定； C_3 、 C_4 所在项为类正态分布曲线，根据 3σ 准则选取并修正确定。本文经过大量实验采用并建议 $C_1=80$ ， $C_2=50$ ， $C_3=600$ ， $C_4=256$ 。

定义评分因素比重为

$$ratio = e^{-\frac{\sigma^2}{c_4}} \quad (2)$$

σ^2 越大则 $ratio$ 越小，错位评分所占比重相应越大，则有

$$DoEM = ratio \left(\frac{\mu_e e^{-\frac{\mu_e}{c_1}} + \mu_a e^{-\frac{\mu_a}{c_1}}}{\mu_e + \mu_a} \right) + (1 + ratio) e^{-\frac{\sigma^2}{c_3}} \quad (3)$$

以上公式通过对实际主观评价趋势曲线进行拟合得到，其中，式 (1) 中参数根据 3σ 准则选取后再经过实验修正确定。

3 实验结果对比及分析

为了验证 DoEM 边缘差分谱评价法的评价效果，本文在 Matlab 平台下分别用 PSNR、SSIM 和 DoEM 方法对标准 lena 测试图以及一些实拍图像拼接后的结果进行评价仿真，并根据仿真结果对评价方法性能进行分析。

峰值信噪比(PSNR)评价方法以图像的峰值信噪比作为评价图像质量的衡量指标。PSNR 评价法是典型的基于像素误差的图像质量评价方法，峰值信噪比反映的是待评价图像的逼真度。峰值信噪比的计算首先需要计算图像的均方误差，假设 2 张大小为 $M \times N$ 的图像 $I(i, j)$ ， $K(i, j)$ ，定义的数学计算公式如下：

$$\begin{cases} MSE = \frac{1}{MN} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} (I(i, j) - K(i, j))^2 \\ PSNR = 10 \lg \left(\frac{(2^n - 1)^2}{MSE} \right) \end{cases} \quad (4)$$

其中， n 为图像位深。PSNR 值越大则说明图像逼真度越高，质量越好。PSNR 评价法计算复杂度小，易于实现，已经在图像处理领域得到了广泛的应用。

SSIM 方法采用图像间的结构相似度决定图像感知质量^[4]，而不是此前普遍采用的误差可见度。SSIM 主要针对结构相似度对待评价图像进行评价。SSIM 评分结果由亮度相似度评价、对比度相似度评价和结构相似度评价 3 个要素组成。设 2 张图像的平均强度分别记为 μ_x 、 μ_y ，标准差记为 σ_x 、 σ_y ，两图像之间的互相关系数为 σ_{xy} ，则 SSIM 评分由下式给出

$$SSIM(x,y) = \frac{(2\mu_x\mu_y + C_1)(2\sigma_{xy} + C_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1)(\sigma_x + \sigma_y + C_2)} \quad (5)$$

SSIM 评价法从另一个较高层次模拟了 HVS 的主要功能，从图像中提取结构信息并用对结构信息的度量作为图像感知质量的近似，算法在一定程度上模拟了人眼对图像的感知原理，因此评价效果相比 MSE、PSNR 等方法更符合主观评价。此外，SSIM 算法计算也相对较简单，从而受到了国内外图像质量评价领域学者和组织的广泛关注，得到了一定的应用。SSIM 评价方法虽然考虑了亮度对比度的相似度，但是经过实验表明，SSIM 方法对于亮度差异相对来说并不敏感，且在图像失真、降质程度较为严重时，SSIM 评价结果与主观评价结果不符，准确性急剧下降。SSIM 在高层次模拟了 HVS 的视觉特性，而主观视觉结构信息的处理非常复杂，SSIM 只是进行了较为简单的线性建模处理，因而在准确性上与主观评价存在一定的偏差，而且 SSIM 主要着眼于结构信息的相似度度量，从而一定程度上忽略了更丰富的图像底层信息的差别。

本文采用的主观评价准则为国际无线电咨询委员会制订的 CCIR500-1 主观评价标准，如表 2 所示。

表 2 CCIR500-1 主观评价 5 级标准

等级	质量准则	妨碍准则
5	非常好	丝毫看不出图像质量变坏
4	好	能看出图像质量变坏，但不妨碍观看
3	一般	清楚看出图像质量变坏，对观看稍有妨碍
2	差	妨碍观看
1	非常差	非常严重妨碍观看

基于 PSNR、SSIM 和 DoEM 评价方法，首先对存在不同程度错位现象的标准 lena 拼接图像进行评价。实验中将拼接后图像以准确拼接图像为中心，横纵坐标各自分别向正负方向错位 1~12 像素得到一系列一共 25 张错位拼接图像，并分别用 3 种评价方法对这 25 张图像进行评价。其中，SSIM 和 DoEM 评分法 0~1 分分别对应 CCIR500-1 5 级标准的 1~5 级。

主观评价实际感受对于错位的反应有一定的规律：图像拼接存在微量错位的情况下不太影响视觉感知；一定程度范围的错位会开始导致明显的视觉出错，因此主观评价会出现明显变差的阶段；当错位达到一定程度范围以上时，主观上认为拼接质量已经非常差，因此评价结果应该趋于平缓。所以

评价曲线应该呈现墨西哥草帽型。本文使用 3 种评价方法分别对上述 25 张不同程度的错位图像评价，得到结果如图 2 所示。

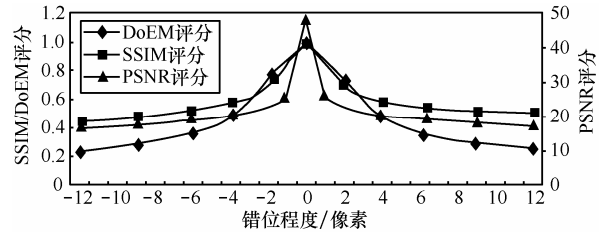


图 2 不同错位程度下评价结果对比

评价中 DoEM 方法的高斯模板窗口采取和 SSIM 一样的尺寸，大小为 11×11，标准差为 1.5。从图 2 可以看出，PSNR 评价结果在无错位时有一个峰值，而对不同程度的错位，该方法得到的评分范围很小，与实际主观感受较不相符；SSIM 评价结果则是在错位 0~2 像素以内评分，随着错位量的增加而急剧下降，错位 2 像素以上评分结果与 PSNR 相似，基本趋于不再变化；DoEM 评价结果显示，错位 1 像素以内时，评分曲线有一小段平缓期，在错位量为 1~5 像素时，评分下降较为明显，而错位 5 像素以上评分再次呈现逐渐趋于平稳下降的趋势，该结果与主观评价的墨西哥草帽型更加接近。综上所述，相对来说 DoEM 评价结果更加符合人眼主观评价趋势，较好地模拟了人眼视觉的实际感受。评价效果真实程度 DoEM>SSIM>PSNR。

对于影响图像拼接质量的另一大因素亮度突变，本文采取同样方法进行仿真评价。评价对象以标准拼接结果为中心，亮度突变量以 10%为步长，分别改变至±70%（共 15 张图像）。

与错位对主观感受的影响不同，视觉对亮度差异的反应的规律为：亮度差异越大，视觉感受越差，当亮度差异不太大的时候对主观感受影响不大，随着亮度差异的增大，主观评价下降越来越严重，评价曲线应该呈类似抛物线状。本文使用 3 种评价方法分别对上述 15 张图像进行评价，结果如图 3 所示。

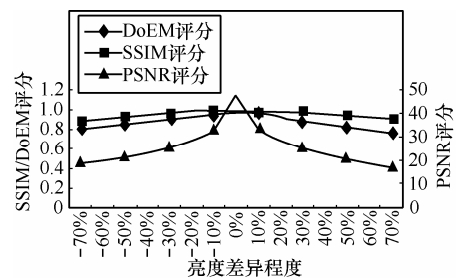
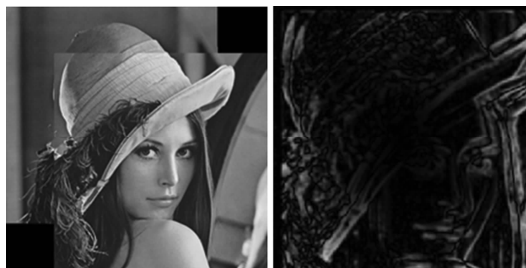


图 3 不同亮度差异下评价结果对比

评价结果显示, PSNR 评价结果的趋势与主观感受趋势截然相反, 完全不符合主观感受。SSIM 和 DoEM 评价结果都较符合主观评价趋势, 但是 SSIM 评价结果全部都是很高的分数, 几乎所有评分都保持在 0.9 分以上, 最低 2 个评分也在 0.88 和 0.89 以上。这样的评价显然不太符合客观评价等级和主观评价的对应关系, 主观评价中亮度差异在达到一定程度以后会相对较为明显地影响视觉效果, 相对来说, DoEM 评价结果更加符合主观视觉的感受。总体结果为 DoEM 略好于 SSIM, 而这两者都远远比 PSNR 更为客观。

从以上不同角度的 2 组实验结果可以看出, DoEM 无论是在错位程度还是亮度差异角度的评价, 都能更好地体现主观评价的趋势和程度, 综合上述 2 种要素, DoEM 能够更加真实地体现主观评价结果。

综合错位和亮度差异这 2 种影响图像拼接质量的因素, 本文以错位 12 像素, 亮度差异为 40% 的拼接图像为例, 分别用 3 种评价方法进行评价。从图 4 中可以感受到, 图像已经明显错位, 严重影响了主观感受, 属于拼接有误的结果。边缘差分谱示意图也显示出较多的差异信息。3 种客观评价方法对该图分别的评价结果如表 3 所示。



(a) 拼接图像 (b) 边缘差分图
图 4 存在较大错位和亮度差异情况下结果

表 3 图 4 中 lena 拼接图像评价结果

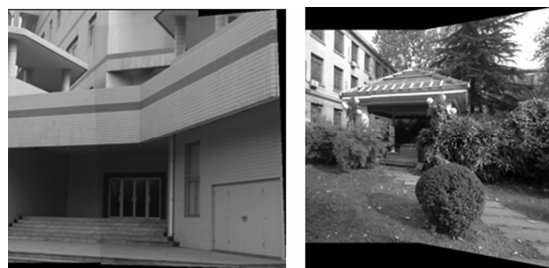
评价方法	评价结果/dB
PSNR	15.589 539
SSIM	0.491 789
DoEM	0.228 463

表 3 的评价结果显示, PSNR 由于没有评分上限, 因此无法直观表达评价效果, 只能根据 PSNR 评价经验, 该结果属于中等偏差质量; SSIM 仍然给出了一个较高的评分; DoEM 得到了一个较低分数。与实际情况相比较, DoEM 的评价结果显然更

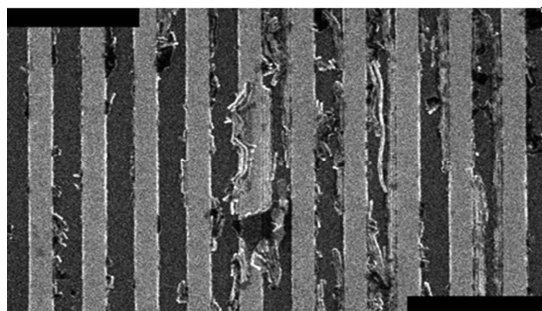
加符合实际。

为了测试 DoEM 评价方法在实际评价中的效果, 下面以校园实际拍摄照片以及版图缺陷照片样张的拼接结果为例进行评价。

图 5(a)基本无错位, 有少量亮度差异; 图 5(b)整体存在少量错位, 有一定程度亮度和色调差异; 图 5(c)为版图的不同部位拼接结果, 基本无错位和亮度差异, 但存在少量噪声差异。客观评价结果如表 4 所示。



(a) 教学楼照片拼接结果 (b) 花园照片拼接结果



(c) 版图照片拼接结果

图 5 待评价照片拼接结果

表 4 实拍校园照片拼接图像评价结果

待评价图像	PSNR/dB	SSIM/dB	DoEM/dB
图 5(a)	29.841 716	0.925 038	0.877 413
图 5(b)	20.905 100	0.766 055	0.689 941
图 5(c)	36.623 175	0.997 253	0.959 147

对照表 4 中数据可以得出, 在实际图像的评价测试中, DoEM 同样得到了较好的结果, 相对更好地体现出实际主观感受。

4 结束语

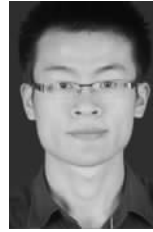
本文针对图像拼接结果的特点和特殊性, 提出一种根据边缘差分谱结合像素信息和边缘信息对图像拼接的质量进行评价的部分参考评价方法, 即 DoEM 评价法。经过对比实验表明 DoEM 评价法的评价结果比 PSNR 和 SSIM 评价法的评价结果更

加符合人眼实际主观评价标准, 因此 DoEM 更加适合作为对图像拼接质量的评价方案, 有一定的实用意义。

参考文献:

- [1] 蒋刚毅, 黄大江, 王旭等. 图像质量评价方法研究进展[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(1):219-226.
JIANG G Y, HUANG D J, WANG X, *et al.* Overview on image quality assessment methods[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2010, 32(1):219-226.
- [2] HOPKINS H H. Modern methods of image assessment[A]. Proceedings of the SPIE-The International Society for Optical Engineering, Reading[C]. 1981. 2-11.
- [3] 路文. 基于视觉感知的影像质量评价方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2009.
LU W. Image Quality Evaluation Method Base on Visual Perception[D]. Xi'an: Xidian University, 2009.
- [4] 张桦. 基于视觉感知的图像质量评价[D]. 浙江: 浙江大学, 2009.
ZHANG H. Image Quality Evaluation Base on Visual Perception [D]. Zhejiang: Zhejiang University, 2009.
- [5] 蒋铭, 马兆丰, 辛宇等. 基于 DWT 和视觉加权的图像质量评价方法研究[J]. 通信学报, 2011,32(9):129-136.
JIANG M, MA Z F, XIN Y, *et al.* Image quality evaluation method base on digital wavelet transform and vision weighted[J]. Journal on Communications, 2011, 32(9):129-136.
- [6] BLASCH E P, GAO J B, TUNG W W. Chaos-based image assessment for THz imagery[A]. 2012 11th International Conference on Information Sciences, Signal Processing and their Applications[C]. Montreal, QC, Canada, 2012. 360-365.
- [7] SAAD M A, BOVIK ALAN C. *et al.* Blind image quality assessment: a natural scene statistics approach in the DCT domain[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2012,21(8):3339-3352.
- [8] 周景超, 戴汝为, 肖柏华. 图像质量评价研究综述[J]. 计算机科学, 2008, 35(7):1-4.
ZHOU J C, DAI R W, XIAO B H. Overview of image quality assessment [J]. Journal of Computer Science, 2008, 35(7):1-4.
- [9] MITTAL A, *et al.* No-reference image quality assement in the spatial domain[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2012, 21(12): 4695-4708.
- [10] DIMITRIEVSKI M D, IVANOVSKI Z A. No-reference image visual quality assement using nonlinear regression[A]. Third International Workshop on Quality of Multimedia Experience[C]. 2011. 78-83.
- [11] BOVIK A C. Subjective image quality assessment-live image quality assessment database[EB/OL]. <http://live.ece.utexas.edu/research/quality/subjective.htm>. 2011.10.
- [12] LEACHTENAUERL J. National imagery interpretability rating scales overview and product description[A]. ASPRS/ACSM[C]. 1996. 262-272.
- [13] HUYNH-THU Q, GHANBARI M. Scope of validity of PSNR in image/video quality assessment[J]. Electronics Letters, 2008, 44(13): 800-801.
- [14] WANG Z H R, BOVIK A, SHEIKH C. Image quality assessment: From error visibility to structural similarity[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2004, 13(4):600-612.
- [15] ZHANG X G, YANG, L *et al.* Improved sobel edge detection[A]. IEEE International Conference Computer Science and Information Technology[C]. 2010. 67-71.

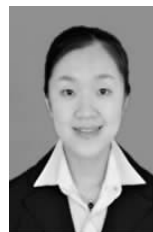
作者简介:



万国挺(1988-), 男, 浙江台州人, 西安电子科技大学硕士生, 主要研究方向为多媒体技术、模式识别、计算机视觉等。



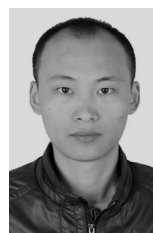
王俊平(1964-), 女, 陕西渭南人, 西安电子科技大学教授, 主要研究方向为多媒体通信、图像/视频处理及应用、DFM 及 SOC 等。



李锦(1987-), 女, 河北廊坊人, 西安电子科技大学硕士生, 主要研究方向为多媒体通信和图像处理。



曹洪花(1989-), 女, 山东德州人, 西安电子科技大学硕士生, 主要研究方向为多媒体通信和图像处理。



汪松(1986-), 男, 安徽宿州人, 西安电子科技大学硕士生, 主要研究方向为多媒体技术、模式识别、计算机视觉等。

王乐(1986-), 男, 河南南阳人, 西安电子科技大学硕士生, 主要研究方向为多媒体通信和图像处理。

李亚宁(1988-), 女, 河北沧州人, 西安电子科技大学硕士生, 主要研究方向为多媒体通信和图像处理。

韦蓉(1989-), 女, 陕西西安人, 西安电子科技大学硕士生, 主要研究方向为多媒体通信和图像处理。