



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

2014
12
VOL.19

ISSN1006-8961
CN11-3758/TB



图像色彩和谐变化 P1766



第19卷第12期（总第224期）

2014年12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@irsa.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@irsa.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

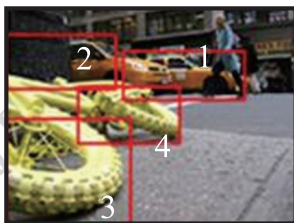
国外发行代号 M1406

国内邮发代号 82-831

国内定价 50.00元



改进鱼眼变换技术的图像适应(第1743页)



面向部件遮挡补偿的车辆检测模型(第1802页)



基于暗原色及入射光假设的单幅图像去雾(第1812页)

综述

视频摘要技术综述

王娟, 蒋兴浩, 孙铨锋 1685

局部二进制模式方法综述

刘丽, 谢毓湘, 魏迎梅, 老松杨 1696

图像处理和编码

2维全相位内插核的设计与实现

苏飞, 孙杰, 秦娟, 段宇翔 1721

改进的正则化模型在图像恢复中的应用

李旭超, 宋博 1730

改进鱼眼变换技术的图像适应

张丽霞, 区兆明, 宋鸿陟 1743

去除乘性噪声的分数阶变分模型及算法

田丹, 薛定宇, 陈大力 1751

丢包环境中H.264视频编码的快速模式判决

兰梦, 张远, 魏雨农 1759

图像分析和识别

偏度和峰度的图像色彩和谐变化

马云芳, 宋明黎, 卜佳俊 1766

结合稀疏表示和概率潜在语义的图像模糊度评价

张涛, 王新年, 梁德群 1775

Log-Gabor小波和分数阶多项式KPCA的火焰图像状态识别

宋昱, 吴一全 1785

加权局部二值模式的人脸特征提取

张洁玉, 武小川 1794

面向部件遮挡补偿的车辆检测模型

陈远, 谢昭, 吴克伟 1802

基于暗原色及入射光假设的单幅图像去雾

於敏杰, 张浩峰 1812

空间可变有限混合模型

申小虎, 吕导中, 万荣春 1820

遥感图像处理

高分辨率极化SAR图像水平集分割

邹鹏飞, 李震, 田帮森 1829

混合本征模型的多视SAR影像海冰密度检测

汪霄箭, 李玉, 赵泉华, 何晓军 1836

总目次

CONTENTS

JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS



Improved fisheye transformation for image retargeting (P1743)



Part-oriented occlusion compensate model for vehicle detection(P1802)



Single-image dehazing based on dark channel and incident light assumption(P1812)

Review

Review of video abstraction

Wang Juan, Jiang Xinghao, Sun Tanfeng 1685

Survey of Local Binary Pattern method

Liu Li, Xie Yuxiang, Wei Yingmei, Lao Songyang 1696

Image Processing and Coding

Design and implementation of 2D all-phase interpolation kernel

Su Fei, Sun Jie, Qin Juan, Duan Yuxiang 1721

Applying the improved regularization model to image restoration

Li Xuchao, Song Bo 1730

Improved fisheye transformation for image retargeting

Zhang Lixia, Ou Zhaoming, Song Hongzhi 1743

Fractional-order variation model and algorithm for multiplicative noise removal

Tian Dan, Xue Dingyu, Chen Dali 1751

Fast-mode decision for H.264 video coding in a packet-loss environment

Lan Meng, Zhang Yuan, Wei Yunong 1759

Image Analysis and Recognition

Image color harmonization algorithm using skewness and kurtosis

Ma Yunfang, Song Mingli, Bu Jiajun 1766

Image blur evaluation based on sparse representation and probabilistic latent semantic analysis

Zhang Tao, Wang Xinnian, Liang Dequn 1775

State identification of boiler combustion flame images via Log-Gabor wavelet and kernel principal component analysis with fractional power polynomial models

Song Yu, Wu Yiquan 1785

Feature extraction of faces based on a weighted local binary pattern

Zhang Jieyu, Wu Xiaochuan 1794

Part-oriented occlusion compensate model for vehicle detection

Chen Yuan, Xie Zhao, Wu Kewei 1802

Single-image dehazing based on dark channel and incident light assumption

Yu Minjie, Zhang Haofeng 1812

Spatially variant finite mixture model

Shen Xiaohu, Lyu Daozhong, Wan Rongchun 1820

Remote Sensing Image Processing

High-resolution PolSAR image level set segmentation

Zou Pengfei, Li Zhen, Tian Bangsen 1829

Intrinsic mixture model-based measurement of sea ice density from a multi-look SAR image

Wang Xiaojian, Li Yu, Zhao Quanhua, He Xiaojun 1836

中图法分类号: TN911.73 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2014)12-1775-10

论文引用格式: Zhang T, Wang X N, Liang D Q. Image blur evaluation based on sparse representation and probabilistic latent semantic analysis[J]. Journal of Image and Graphics, 2014, 19(12): 1775-1784. [张涛, 王新年, 梁德群. 结合稀疏表示和概率潜在语义的图像模糊度评价[J]. 中国图象图形学报, 2014, 19(12): 1775-1784.][DOI:10.11834/jig.20141209]

结合稀疏表示和概率潜在语义的图像模糊度评价

张涛^{1,2}, 王新年¹, 梁德群¹

1. 大连海事大学信息科学技术学院, 大连 116026; 2. 辽宁师范大学物理与电子技术学院, 大连 116029

摘要: 目的 图像的模糊度评价是客观图像质量评价的一种, 主要用来衡量图像信号经过成像系统或处理算法后的降质程度, 其在图像获取、传输、分析以及图像处理系统或算法评价等领域有着广泛的应用。针对目前图像模糊度评价方法没有考虑人类视觉系统的无监督学习和层次化特征提取的特性, 本文将图像稀疏表示和利用概率潜在语义提取图像主题相结合, 提出基于稀疏表示和概率潜在语义的图像模糊度评价算法。**方法** 该算法在图像稀疏表示的基础上, 通过概率潜在语义方法分别提取清晰训练图像和待测图像的主题, 以待测图像潜在主题与清晰图像平均潜在主题之间的相似性作为模糊度评价的依据。主要过程分为3个阶段: 词典构建阶段、训练学习阶段和模糊度评价阶段。词典构建阶段的目的是通过样本学习获得图像稀疏表示的词典; 训练学习阶段的目的是采用概率潜在语义的方法获得训练图像的平均主题; 模糊度评价阶段的目的是通过待测图像的潜在主题与训练图像的平均潜在主题的相关系数来计算图像的模糊程度。**结果** 在仿真图和公共测试数据库上与典型算法的比较实验表明: 本文算法在单调性、抗噪性以及视频质量专家组制定的5个评价指标上都取得了较好的效果, 其中 Pearson 相关系数和 Spearman 秩相关系数分别为 0.995 6 和 0.993 4。**结论** 本文根据人类视觉系统具有无监督学习和层次化特征提取的特点, 以待测图像潜在主题与清晰图像平均潜在主题之间的相似性作为模糊度评价的依据, 提出了一种新的基于稀疏表示和概率潜在语义的图像模糊度评价方法。实验结果表明该方法能够对图像的模糊度进行较准确的评价, 并且结果与人的主观评价结果一致。

关键词: 图像质量评价; 模糊度评价方法; 图像稀疏表示; 概率潜在语义; 人类视觉系统

Image blur evaluation based on sparse representation and probabilistic latent semantic analysis

Zhang Tao^{1,2}, Wang Xinnian¹, Liang Dequn¹

1. School of Information Science and Technology, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China;

2. School of Physics and Electronics, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China

Abstract: **Objective** Blur evaluation is an image quality assessment process used to estimate the perceived sharpness or blurriness of images that imaging systems or processing algorithms output. Blur evaluation has numerous uses in practical applications and plays a central role in shaping image acquisition, transmission, analysis algorithms and systems, as well as the implementation, optimization, and testing of these algorithms and systems. An image sparse representation and probabilistic latent semantic analysis (pLSA)-based blur evaluation method is proposed to incorporate the unsupervised learning

收稿日期: 2014-05-09; 修回日期: 2014-08-24

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)基金项目(2010AA **); 教育部博士点基金项目(20070151014); 中央高校基本科研业务费专项资金(2012JC038)

第一作者简介: 张涛(1976—), 女, 满族, 讲师, 大连海事大学通信与信息系统专业博士研究生, 主要研究方向为信号与数字图像处理。

E-mail: zt2941@sina.com

通信作者: 王新年, E-mail: wxn@dlmu.edu.cn

characteristic and the hierarchical feature abstraction model of the human visual system to the blur evaluation process.

Method The proposed method is based on the hypothesis that images possess latent characteristics that can be used to measure image quality and the fact that the human brain can learn in an unsupervised manner. The pLSA model is used to identify meaningful topics that are latent in the sparse codes of natural images and the test image. The similarity of the latent topics between training images and the test image is used to measure blurriness. The proposed method has three crucial stages, which are the dictionary construction, learning, and blur metric computation stages. The dictionary construction stage develops the dictionary from clear sample images. The learning stage extracts average topics from the sparse codes of clear training images by using pLSA. The blur metric computation stage calculates the blur metric according to the correlation coefficient between the latent topics of the test image and the average topics of the clear training images.

Result Experimental results on the synthetic images and public image quality databases show that the proposed method exhibits better performance than the state-of-the-art blur metrics in terms of monotonicity, anti-noise capability, and the suggested evaluation metrics of the Video Quality Experts Group. The Pearson correlation and Spearman rank-order correlation coefficients are approximately 0.995 6 and 0.993 4, respectively. **Conclusion** Based on the unsupervised learning characteristic and the hierarchical feature abstraction model of the human visual system, this study proposes a novel blur evaluation method. This method uses the similarity of latent topics between training images and the test image to measure blurriness. Experimental results show that the proposed blur evaluation method can evaluate the amount of blurriness in images with high accuracy, and it correlates well with the human visual system.

Key words: image quality assessment; blur evaluation method; image sparse representation; probabilistic latent semantic analysis; human visual system

0 引言

数字图像或视频的采集、压缩、存储、传输和重建的每一环节都会对图像的质量产生影响,如何客观评价图像质量已成为图像处理和计算机视觉领域的一个基本而又富有挑战性的问题。目前客观图像质量评价方法主要包括需要原始图像参考的全参考图像质量评价方法、需要原始图像某些特征的半参考图像质量评价方法和不需要原始图像信息的无参考图像质量评价方法^[1-3]。图像的模糊度评价是客观图像质量评价的一种,主要用来衡量图像(视频)信号经过成像系统或处理算法后的降质程度,其在图像获取、压缩、传输、显示、打印、恢复、增强、分析以及图像处理系统或算法评价等领域有着广泛的应用。本文主要研究的是无参考图像模糊度评价方法。

图像模糊在空域上表现为细节丢失,灰度变化较小;而在频域上表现为高频信息丢失,低频信息所占比重比清晰图像大。基于此,目前无参考图像模糊度评价的方法主要分为3类:基于空域的方法、基于变换域的方法和基于混合域的方法。基于空域的方法以空域内图像灰度变化的强弱为主要依据进行模糊度评价,典型的方法有:1)以文献[4-6]为代表的基于边缘检测的方法。该类方法的主要思想是:清晰图像的边缘比较陡,而模糊图像的边缘趋于平

滑,通过测量边缘的宽度来确定图像的模糊程度。特点是假设图像中至少有一条明显的边缘,并且要对边缘进行检测。2)以文献[7,8]为代表的基于像素差异的方法。该类方法认为清晰图像局部区域内的灰度方差或梯度幅度比较大,而模糊图像局部区域内的灰度方差或梯度幅度较小,以此为依据确定图像的模糊度。3)以文献[9-11]为代表的基于直方图统计的方法。该类方法根据清晰图像灰度分布比较均匀的特点,通过图像直方图曲线的有效范围和平滑性或图像的信息熵大小进行图像模糊度的评价。4)以文献[12]为代表的基于多个模糊副本差异的方法。该类方法根据清晰图像与其模糊副本之间的差要大于模糊图像与其模糊副本之间差的特点来评价图像的模糊度。基于变换域的方法主要是通过低频信息所占比重判断图像的模糊度。典型方法有:1)基于各频带系数统计的方法。如文献[13]将图像的功率谱与人类视觉系统的系统传递函数相结合来预测图像的清晰度;文献[14-15]通过计算离散余弦变换系数或傅里叶变换幅值的峰度对模糊度进行评估;文献[16]通过高频部分能量与低频部分能量的比值计算模糊度;文献[17]在图像进行小波分解后,将计算的各子带对数能量的加权和作为图像模糊度的估计。2)基于局部相位一致性的方法。如文献[18]在复数小波域通过计算相位一致性来预测图像质量,基于混合域的方法结合空域方法和

变换域方法的优点, 分别提取空域特征和变换域特征, 作为模糊度评价的依据; 文献[19]通过对原始图像的梯度幅值直方图采用支撑向量机的方法对图像质量进行粗估计, 然后采用小波分解后各层水平和垂直方向系数幅值的平均值对图像模糊度进行精估计; 文献[20]将利用现有典型方法计算的图像模糊度和各种低级视觉特征输入训练好的神经网络进行图像质量的评估, 取得了很好的效果; 文献[21]结合图像的空域和频谱特征实现对图像清晰度的评价。该方法将每一块频谱特征和空域特征度量的几何均值作为图像清晰度的估计, 其中频谱特征为幅值的斜率, 空域特征为图像块内各子块最大总变分值的 1/4。

人眼在观察一幅图像时, 即使在没有原始参考图像的情况下, 也很容易判断其是否清晰, 模糊程度如何。文献[22]将人类视觉系统的这个能力归结为适应能力, 即人脑中存在很多高质量的参考图像模型, 人类能够通过学习使用这些模型进行图像质量的评价; 文献[23]认为大脑对高质量参考图像的知识应该是基于统计的, 并且反映了自然场景的特性。目前文献中的方法主要是将提取的视觉感知特征与图像的模糊度建立了直接映射关系, 但这些方法没有考虑所提取的视觉感知特征背后隐含的关系(主题)对模糊度的影响, 即没有体现人类视觉系统感知的无监督学习特性和层次化特性。

本文在文献[24]提出的基于图像稀疏表示模糊度评价的基础上, 利用文献[25-27]提出的概率潜在语义的方法通过无监督学习方法提取中间语义特征——图像稀疏表示系数的主题, 将提取的待测图像的主题与清晰图像集训练的平均主题之间的相关性作为图像模糊度评价的依据。

1 基于稀疏表示和概率潜在语义的模糊度评价算法

1.1 图像的稀疏表示

图像的稀疏表示是指图像(块)可完全或近似地由非常少的一组原子(atom)图像(块)的线性组合来表示^[28], 其数学描述为

$$\mathbf{I} = \mathbf{D}\boldsymbol{\alpha} + \mathbf{v} \quad (1)$$

式中, $\mathbf{I}$ 表示图像或图像块的列向量形式; $\mathbf{D}$ 表示过完备词典矩阵, $\mathbf{D}$ 的每列称为原子或短语; $\boldsymbol{\alpha}$ 是列向量, 表示的是图像稀疏分解系数, $\boldsymbol{\alpha}$ 的每个值反映了图像块与词典中对应列所表示模式的相关程度, 其值越大, 图

像块就越具有该模式的特性; $\mathbf{v}$ 表示残留误差或噪声。

1.2 基于概率潜在语义的图像分析

潜在语义分析(LSA)的起初目的是要从文本中发现隐含的语义维度, 即主题(topic)或者概念(concept), 建立短语和文档之间的潜在关系。图像的潜在语义分析目的是从图像的低级可视特征中提取更高层的语义概念。

与文本的潜在语义分析类似, 假设有一组训练图像 $\mathbf{I} = \{\mathbf{I}_1, \mathbf{I}_2, \dots, \mathbf{I}_M\}$ 和由低级视觉特征构成的词汇表 $\mathbf{W} = \{\mathbf{w}_1, \mathbf{w}_2, \dots, \mathbf{w}_N\}$ 。用词汇表对每幅训练图像进行编码, 并统计各单词出现的频数, 形成大小为 $N \times M$ 的“视觉单词—图像”频数矩阵 $\mathbf{N}$, 矩阵中元素 $N_{ij} = n(I_i, \mathbf{w}_j)$ 表示视觉单词 $\mathbf{w}_j$ 在图像 $\mathbf{I}_i$ 中出现的次数。对矩阵 $\mathbf{N}$ 进行奇异值分解(SVD)得到 3 个矩阵 $\mathbf{U}, \mathbf{S}, \mathbf{V}$, 即 $\mathbf{N} = \mathbf{U}\mathbf{S}\mathbf{V}^T$ 。矩阵 $\mathbf{N}$ 可由奇异值中最大的 K 个和其对应的 $\mathbf{U}_K, \mathbf{V}_K$ 近似, 即 $\hat{\mathbf{N}}_K = \mathbf{U}_K \mathbf{S}_K \mathbf{V}_K^T$, 其中 $\mathbf{S}_K$ 表示由 K 个最大奇异值组成的对角阵, $\mathbf{U}_K$ 和 $\mathbf{V}_K$ 表示 $\mathbf{U}, \mathbf{V}$ 对应的 K 列特征向量构成的矩阵。将表示待测图像 $\mathbf{f}$ 中每个单词出现频数的向量 $\boldsymbol{\alpha}$ 转换成对应的潜在语义空间的方式为 $\boldsymbol{\alpha}^T \hat{\mathbf{N}}_K = (\boldsymbol{\alpha}^T \mathbf{U}_K) (\mathbf{S}_K \mathbf{V}_K^T)$, 从而将 N 维的 $\boldsymbol{\alpha}$ 转换成为 K 维的语义表示, 后续的图像分析与识别都在潜在语义空间进行。

奇异值分解在 LSA 上取得了一定的成功, 但是其缺乏严谨的数理统计基础, 而且奇异值分解非常耗时。文献[29]提出了基于概率统计的潜在语义分析方法(pLSA), 该方法认为在“视觉单词——图像”频数矩阵里隐含着一组称为主题的变量 $z \in \mathbf{Z} = \{z_1, z_2, \dots, z_K\}$, 其与视觉单词和图像的联合概率关系为

$$p(\mathbf{w}_j, \mathbf{I}_i) = p(\mathbf{I}_i) \sum_{k=1}^K p(\mathbf{w}_j | z_k) p(z_k | \mathbf{I}_i) = \sum_{k=1}^K p(z_k) p(\mathbf{I}_i | z_k) p(\mathbf{w}_j | z_k) \quad (2)$$

式中, $p(\mathbf{I}_i)$ 表示选中 $\mathbf{I}_i$ 的概率, $p(z_k | \mathbf{I}_i)$ 表示当前图像存在隐含主题 z_k 的概率, $p(\mathbf{w}_j | z_k)$ 表示主题 z_k 对应的视觉单词分布, $p(z_k)$ 表示主题 z_k 出现的概率。通过期望最大化算法(EM)可以求取 $p(z_k)$ 、 $p(\mathbf{w}_j | z_k)$ 、 $p(\mathbf{I}_i | z_k)$ 、 $p(z_k | \mathbf{I}_i, \mathbf{w}_j)$ 、 $p(z_k | \mathbf{I}_i)$ 。

应用 pLSA 模型进行图像分析主要分为 3 个阶段: 1) 词典构建阶段, 提取图像的低级视觉特征, 构建词典。2) 训练学习阶段, 利用构建的词典对每幅训练图像进行编码, 统计各视觉单词出现的频数, 构建频数矩阵 $\mathbf{N}$ 。通过学习得到 $p(\mathbf{w}_j | z_k)$, 并且计算

得到每幅训练图像的隐含主题 $p(z | I_{\text{train}})$ 和训练图像的平均主题 $\bar{p}(z | I_{\text{train}})$ 。3) 应用阶段, 通过训练得到的 $\bar{p}(z | I_{\text{train}})$, 采用期望最大化算法得到待测图像的隐含主题 $p(z | I_{\text{test}})$ 。计算待测图像的主题 $p(z | I_{\text{test}})$ 与训练图像的平均主题 $\bar{p}(z | I_{\text{train}})$ 的相关系数, 将相关系数作为进一步分析处理的输入。

图像的稀疏表示和图像的概率潜在语义分析都包括词典构建和编码, 不同之处在于编码的方式: 概率潜在语义分析编码方式采用类似矢量量化的方式, 采用相似度最高的视觉单词代替图像, 而稀疏表示编码将图像表示为几个视觉单词的加权和。本文以此为切入点, 将图像的稀疏表示和图像概率的潜在语义分析相结合, 从图像稀疏表示系数中提取清晰图像的平均主题, 将待测图像稀疏系数主题与清晰图像的平均主题进行比较, 从而评价图像的模糊度。

1.3 基于概率潜在语义和稀疏表示的模糊度评价

算法分为 3 个阶段: 词典构建阶段、训练学习阶段和模糊度评价阶段, 如图 1 所示。词典构建阶段的目的是根据 M 幅样本图像, 提取特征, 构建用于表征图像的视觉特征词典 $D = \{d_1, d_2, \dots, d_N\}$, 其中列向量 d_i 表示视觉单词 (短语), N 表示词典中视觉单词的数目; 训练学习阶段目的是对训练图像利用已构建的词典进行稀疏分解, 得到其稀疏表示系数, 在稀疏表示系数的基础上, 利用概率潜在语义分析的方法进行无监督学习, 获得每个主题的主题分布 $p(d | z)$ 和每幅训练图像的主题分布 $p(z | I_{\text{train}})$; 模糊度评价阶段的目的是根据训练学习获得的 $p(d | z)$, 计算待测图像的主题分布 $p(z | I_{\text{test}})$, 从而根据待测图像的主题分布与训练图像的主题分布的相似性, 计算待测图像的模糊度。

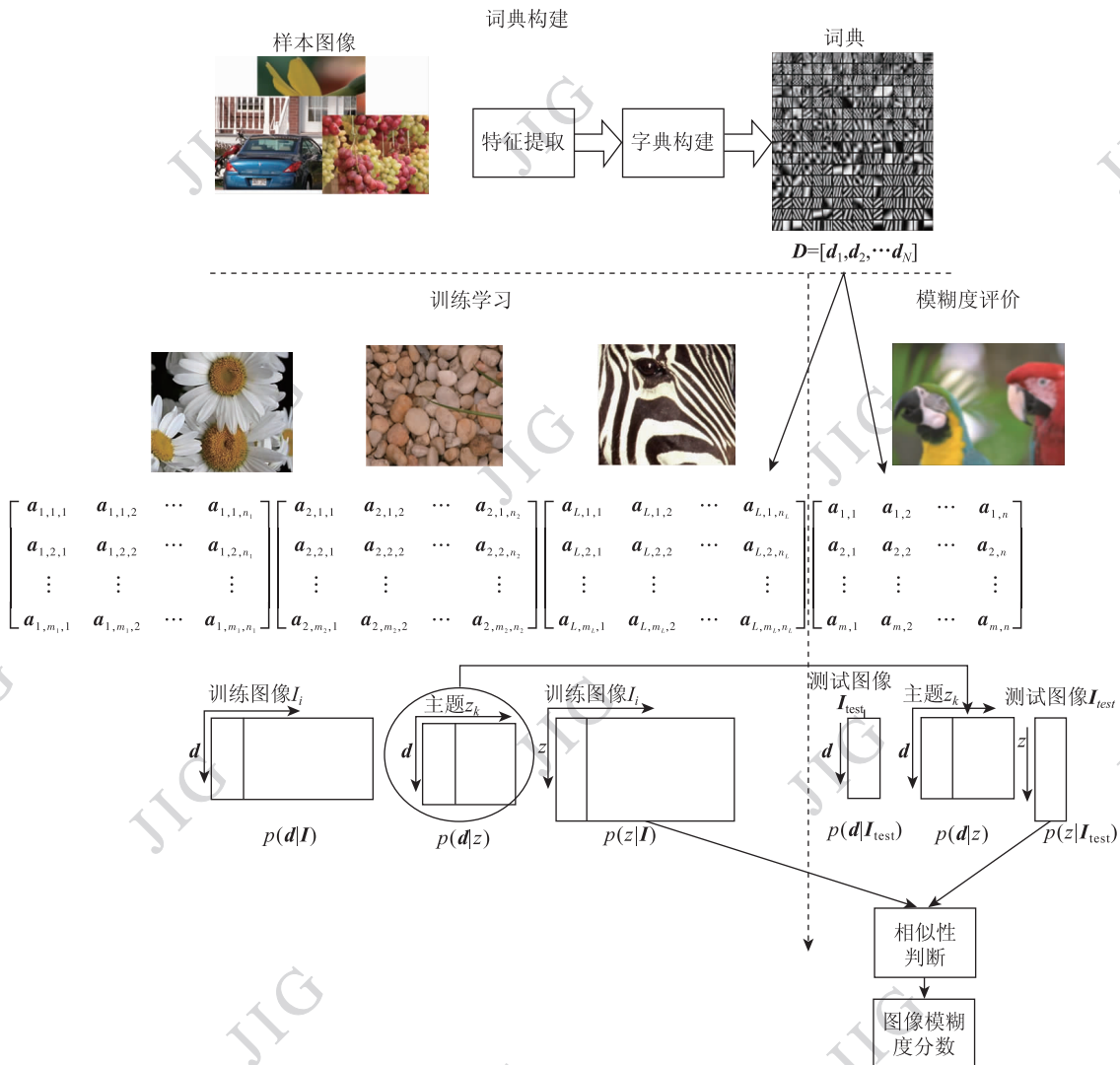


图 1 基于稀疏表示和 pLSA 的模糊度评价方法总体结构图

Fig. 1 Overview schematic of blur evaluation method based on sparse representation and pLSA model

1.3.1 词典构建

词典构建的目的是根据 M 幅样本图像的提取特征, 构建用于表征图像的视觉特征词典 $D = \{d_1, d_2, \dots, d_N\}$, 其中列向量 d_i 表示视觉单词, 其数学描述可以表示为

$$[D_{\text{opt}}, a_{\text{opt}}] = \min_{D, \{a_i\}_1^M} \sum_{r=1}^{m_i} \sum_{c=1}^{n_i} \|a_{i,r,c}\|_0$$

$$\text{s. t. } \sum_{i=1}^M \sum_{r=1}^{m_i} \sum_{c=1}^{n_i} \|b_{i,r,c} - Da_{i,r,c}\|_2^2 \leq \varepsilon \quad (3)$$

式中, D_{opt} 和 a_{opt} 分别表示求取的视觉特征词典及样本图像对应的稀疏系数, ε 表示模型误差, M 表示样本总数, i 表示样本图像编号, m_i 和 n_i 表示样本图像行方向和列方向的总块数, (r, c) 表示图像块编号, $b_{i,r,c}$ 表示样本库中的第 i 幅图像的第 (r, c) 块提取特征后形成的列向量, $a_{i,r,c}$ 表示 $b_{i,r,c}$ 对应的稀疏分解系数向量。

目前典型的词典学习方法有3种, 分别为 MOD 方法^[30]、K-SVD 方法^[31] 和 SimCO 方法^[32], 其中 MOD 方法的特点是在固定稀疏系数情况下, 采用 Moore-Penrose 伪逆的方法求取词典; K-SVD 方法的特点是一次只更新1个短语及其对应的稀疏系数, 其他短语和系数不变; SimCO 方法是前2种方法的扩展, 每次可同时更新多个短语及其对应的系数。本文采用 K-SVD 的方法训练词典。

1.3.2 训练学习

训练学习阶段的目的是利用已构建的词典对训练图像进行稀疏分解, 利用概率潜在语义的分析方法进行无监督学习, 获得每个主题的视觉单词分布 $p(d|z)$ 和训练图像的主题分布 $p(z|I_{\text{train}})$ 。训练学习阶段的主要过程如下:

1) 输入训练图像 $I = \{I_1, I_2, \dots, I_L\}$, ε 和样本图像个数 L 。

2) 计算每幅图像 I_i 的稀疏分解矩阵 a_i , 过程为:

- (1) 对输入的每幅图像分块和块有效性判定;
- (2) 对合格的图像块, 提取特征;
- (3) 对提取的特征, 根据式 $a_{\text{opt}} = \min_{\alpha} \|a\|_0$

s. t. $\|I - Da\|_2^2 \leq \varepsilon$ 进行分解, 得到每块的稀疏分解系数向量 $a_{i,r,c}$, 其中 i, r, c 分别表示图像索引、图像块的行和列索引;

(4) 每块的稀疏系数向量 $a_{i,r,c}$ 构成训练图像 I_i 的稀疏分解矩阵 a_i 。

3) 计算每幅图像各短语的分布概率 $p(d, I_i) =$

$[p(d_1, I_i), p(d_2, I_i), \dots, p(d_L, I_i)]^T$, 即词典中每个短语在图像 I_i 中出现的概率。

为说明方便, 假设词典 D 为正交阵, x 为图像块特征的列向量, a 为稀疏分解系数向量, 则有 $a = D^{-1}x = D^T x$, $a(k) = d_k^T x = \|d_k\|_2^{1/2} \|x\|_2^{1/2} \cos \theta$, 其中 k 表示 a 的分量索引, θ 表示两个向量之间的夹角, 因此在归一化前提下, $a(k)$ 的大小表明 x 与词典中第 k 个短语的相似程度。由此类推, 图像块稀疏分解系数向量 $a_{i,r,c}$ 的每个分量大小表明图像块与词典中对应短语的相关性, 相关性越大, 则对应的短语出现的概率越大, 因此在本文中, 将图像 I_i 中短语 d_k 出现的概率 $p(d_k, I_i)$ 定义为每块稀疏分解系数 $a_{i,r,c}$ 的第 k 个分量 $a_{i,r,c}(k)$ 的函数, 即

$$p(d_k, I_i) = g(a_{i,r,c}(k)) \quad (4)$$

$$r = 1, 2, \dots, m_i; c = 1, 2, \dots, n_i$$

式中, $g(\cdot)$ 表示图像 I_i 中短语 d_k 出现的概率与图像中各块稀疏分解系数之间的关系函数, 要求该函数与 $|a_{i,r,c}(k)|$ 的单调性一致, 非负, 其简单形式为各块 $|a_{i,r,c}(k)|$ 的均值, 即 $p(d_k, I_i) =$

$$\frac{1}{m_i n_i} \sum_{r=1}^{m_i} \sum_{c=1}^{n_i} |a_{i,r,c}(k)|。$$

4) 采用 EM 方法计算每幅训练图像的主题分布和每个主题的视觉单词分布 $p(z|I_i)$, 即

$$p(z_k | I_i, d_j) = \frac{p(d_j | z_k) p(z_k | I_i)}{\sum_{l=1}^K p(d_j | z_l) p(z_l | I_i)} \quad (5)$$

$$p(d_j | z_k) = \frac{\sum_{i=1}^L p(d_j | I_i) p(z_k | I_i, d_j)}{\sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^L p(d_n | I_i) p(z_k | I_i, d_n)} \quad (6)$$

$$p(z_k | I_i) = \frac{\sum_{j=1}^N p(d_j, I_i) p(z_k | I_i, d_j)}{\sum_{n=1}^N p(d_n, I_i)} \quad (7)$$

$$p(z_k) = \frac{\sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^N p(d_j, I_i) p(z_k | I_i, d_j)}{\sum_{i=1}^L \sum_{n=1}^N p(d_n, I_i)} \quad (8)$$

5) 计算训练图像的平均主题, 即

$$\bar{p}(z_k | I_{\text{train}}) = \frac{\sum_{i=1}^L p(z_k | I_i)}{L} \quad (9)$$

1.3.3 模糊度评价

模糊度评价阶段的目的是根据训练学习阶段所

获得主题的主题分布 $p(\mathbf{d} | \mathbf{z})$ 计算待测图像的主题分布 $p(\mathbf{d}, \mathbf{I}_{\text{test}})$; 根据待测图像和训练图像主题分布的相似性计算待测图像的模糊度, 具体过程如下:

1) 输入待测图像、训练图像主题的主题分布 $p(\mathbf{d} | \mathbf{z})$ 和平均主题分布 $\bar{p}(\mathbf{z} | \mathbf{I}_{\text{train}}) = [\bar{p}(z_1 | \mathbf{I}_{\text{train}}), \dots, \bar{p}(z_K | \mathbf{I}_{\text{train}})]$;

2) 对待测图像按 1.3.2 节步骤 2) 进行稀疏分解, 得到待测图像的稀疏分解矩阵 $\mathbf{a}_{\text{test}}$;

3) 按式 (4) 计算待测图像的主题分布 $p(\mathbf{d}, \mathbf{I}_{\text{test}})$;

4) 根据式 (7) 计算待测图像的主题分布 $p(\mathbf{z} | \mathbf{I}_{\text{test}}) = [p(z_1 | \mathbf{I}_{\text{test}}), \dots, p(z_K | \mathbf{I}_{\text{test}})]$;

5) 根据式 (10) 计算待测图像的主题分布和训练图像的平均主题分布的相似性, 从而计算图像的模糊测度。

$$SM = \frac{\bar{p}(\mathbf{z} | \mathbf{I}_{\text{train}}) p(\mathbf{z} | \mathbf{I}_{\text{test}})^T}{|\bar{p}(\mathbf{z} | \mathbf{I}_{\text{train}})| |p(\mathbf{z} | \mathbf{I}_{\text{test}})|} \quad (10)$$

式中, SM 表示图像的模糊测度, $|\cdot|$ 表示向量的模。

2 实验

为验证所提算法的有效性, 进行了 3 组实验: 第 1 组实验验证算法相对于图像模糊程度的单调性, 即算法计算的模糊度应随着图像的实际模糊程度的增减而增减; 第 2 组实验验证算法具有抗噪性, 即验证模糊度算法的单调性是否受噪声影响发生改变。在一定信噪比情况下, 一个好的图像模糊度算法的单调性应该受噪声影响较小, 即在给定信噪比范围内, 若图像 1 的模糊程度大/小于图像 2 的模糊程度, 则根据图像 1 计算的模糊度也应该大/小于根据图像 2 计算的模糊度; 第 3 组实验验证所提算法结果与人类视觉系统主观评价结果的一致性, 一个好的图像模糊度算法计算的模糊度应该与主观评价一致, 本文采用国际电信联盟视频质量专家组 (VQEG) 制定的客观模型评价准则中规定的 Pearson 相关系数、Spearman 秩相关系数、均方误差、平均绝对误差和离出率评价图像模糊度预测算法的主客观一致性^[33], 其中前 2 个指标越接近 1 越好, 后 3 个指标越小越好。

如引言中所述, 文献[6, 8, 12]所提出的无参考图像模糊评价算法是目前比较典型的算法, 本文分

别简称为 CPBD 算法、Q1 算法和 Crete 算法, 这 3 种算法源程序由作者网站提供^[34-36]。由于本文算法是基于作者提出的基于稀疏表示的图像模糊度评价算法基础上的, 本文将文献[24]也列为比较算法, 简称为 SBM。为便于标识, 本文算法简称为 SPBM。

实验中, 算法各项参数分别为: $\varepsilon = 100, \beta = 1, \gamma = 2, \sigma = 5\ 000, \sigma_a$ 为图像宽度的 1/6, 块大小为 10×10 , 词典 $\mathbf{D}$ 构建及稀疏分解算法采用文献[37]提供的源程序, 算法性能指标计算程序来源于 CPBD 源程序网站^[34]。

词典构建和训练学习阶段的样本图像和训练图像应是涵盖风景、车辆、建筑物、动植物等类别的清晰自然图像, 本文在这两个阶段采用的是文献[37]提供的 67 幅自然图像。

本文测试数据来源于文献[38—40], 其中单调性和抗噪性测试数据来源于文献[38]的 IVC 数据库和文献[39]的 SIPI 数据库, 主客观评价一致性数据来源于文献[40]的 LIVE 数据库。

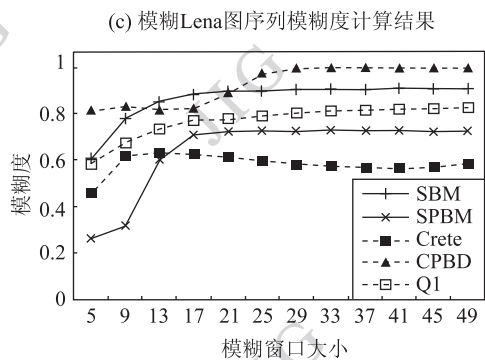
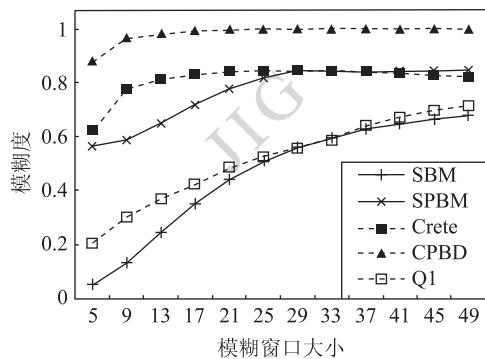
2.1 实验 1 模糊度单调性验证

从测试数据集^[38-39]中, 分类别各选一幅图像通过不同截止频率(或窗口大小)的滤波器产生不同类别仿真模糊图像序列, 图像的类别包括人物、动物、航拍和景物图像等。限于篇幅, 图 2 只给出 Lena 图和 Texture 图均值模糊序列的测试结果。窗口越大, 图像的模糊程度越大。实验中也使用高斯模糊和散焦模糊滤波器分别仿真生成测试序列进行实验, 结论是一样的, 这里不一一列出。

从图 2 的实验结果可以看出:

1) 本文算法计算的模糊度随着模糊窗口大小的增加而增加, 即计算的模糊度相对于图像模糊程度是单调的, 如图 2(c)(d) 中斜十字叉标记的曲线所示。

2) 典型比较算法计算的模糊度整体上相对于模糊程度是单调的。SBM 算法和 Q1 算法是单调的, 但 CPBD 算法计算的模糊度在模糊程度较大时, 值变化较小, 接近固定不变。当待测图像是纹理丰富图像时, CPBD 算法会出现轻微振荡, 而 Crete 算法单调性会发生改变。如图 2(d) 中三角形所标记的 CPBD 算法计算的模糊度曲线在窗口大小超过 5 时开始出现振荡, 而方形标记的 Crete 算法计算的模糊度曲线在窗口大小超过 11 时单调性发生了改变。



(c) 模糊Lena图序列模糊度计算结果
(d) 模糊Texture图序列模糊度计算结果
图 2 各算法模糊度计算结果

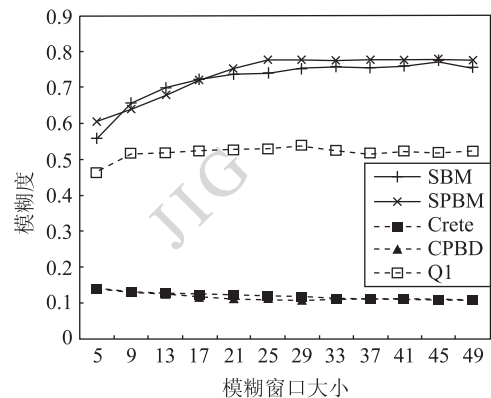
Fig. 2 Blur metrics of images with increasing amount of blur

2.2 实验 2 模糊度抗噪性验证

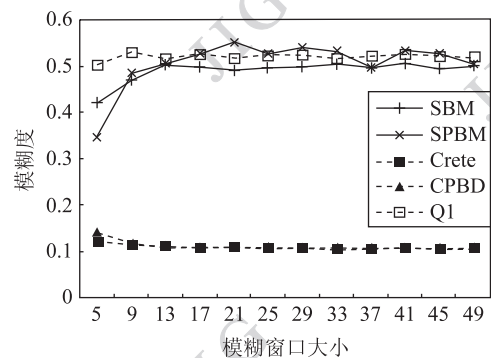
实验的目的是验证模糊度算法的单调性是否受噪声影响而发生改变。在单调性验证获得的模糊测试序列上,分别加入方差为 25.5 的高斯噪声和强度为 0.05 的椒盐噪声,得到 2 个包含噪声的模糊图像序列作为抗噪性验证的测试数据,用本文算法和其他 4 种典型比较方法计算序列图像的模糊测度,测试结果如图 3 和图 4 所示。由实验结果分析可知:

1) 本文算法的单调性受高斯噪声影响较小,效果明显好于 Q1 算法、CPBD 算法和 Crete 算法。图 3 (a) (b) 中用三角形的 CPBD 算法计算的模糊度曲线和用实方形标记的 Crete 算法计算的模糊度曲线的单调性都发生了改变;Q1 算法的单调性在模糊度

程度稍大时出现振荡,并且在图像清晰和很模糊时计算的模糊度相差很小。如图 3 中空方形标记的曲线在均值窗口尺寸大于 9 时,曲线出现振荡,并且模糊度随着模糊程度的增加变化较小;而用斜十字叉标记的本文算法和十字叉标记的 SBM 算法计算模糊度曲线总体上是单调的。



(a) 加高斯噪声的模糊Lena图序列模糊度计算结果



(b) Texture(1.5.07)图高斯噪声计算结果

图 3 高斯噪声对模糊度算法的影响结果

Fig. 3 Blur metrics of blurred images with Gaussian noises

2) 本文算法的单调性受椒盐噪声影响较小,而 Q1 算法、CPBD 算法和 Crete 算法的单调性受椒盐噪声影响较大,单调性发生改变。Q1 算法的单调性在模糊度程度稍大时出现振荡,并且在图像清晰和很模糊时计算的模糊度相差很小。如图 4 中空方形标记的曲线在均值窗口尺寸大于 9 时,曲线出现振荡,并且模糊度随模糊程度的增加变化较小;CPBD 算法在模糊程度较轻时,受椒盐噪声影响较小,但在模糊程度较大时,其单调性发生改变,如图 4 (a) (b) 所示;对于纹理丰富的 Texture 图,CPBD 算法的单调性在均值滤波窗口大小超过 9 时就发生了改变;椒盐噪声对 Crete 算法的单调性影响很大,如图 4 中实方形标记的 Crete 算法曲线单调性发生了改变。

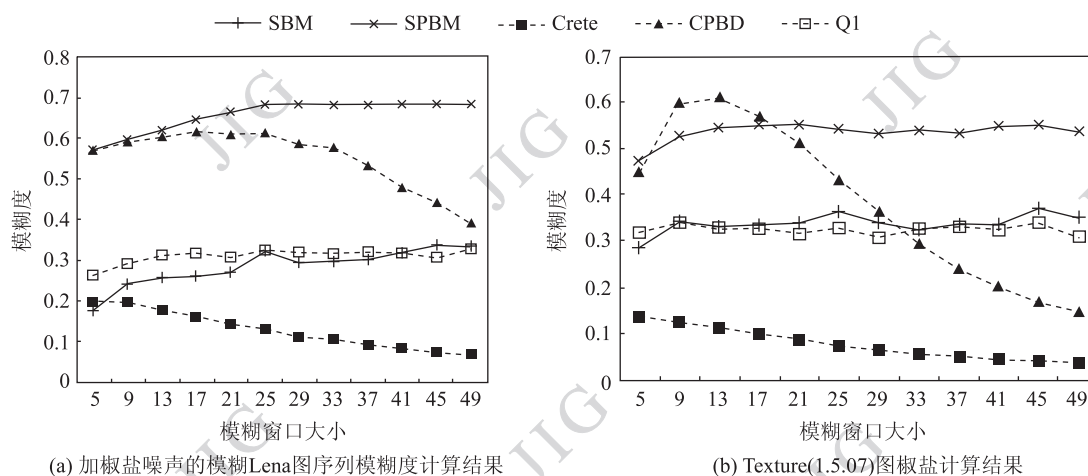


图4 椒盐噪声对模糊度算法的影响结果

Fig. 4 Blur metrics of blurred images with salt & pepper noises

3) 对于纹理较强的图,在模糊程度较高时,若两幅输入图像的模糊程度差别不大,则本文算法出现轻微振荡,如图3(b)和图4(b)所示。原因在于:

(1) 当模糊程度较高时,图像自身信息丢失很多,图

像主要由噪声占主导;(2) 在纹理丰富的图像中,当纹理的周期大于模糊窗口大小时,图像可能呈现模糊状态,但当模糊窗口稍大于纹理周期时,会将纹理条纹合并,此时图像呈现清晰状态,因此纹理图像可能存在随着模糊程度的增加出现清晰和模糊交错的现象,从而导致模糊度出现轻微振荡,如图5所示。在图5的前4幅图像中,纹理周期大于模糊窗口大小,模糊程度逐渐增大,图像越来越模糊;在后4幅图像中,模糊窗口大于1个纹理周期,相当于在2个纹理周期内加权平均,模糊窗口越大,图像越模糊。依此类推,当模糊窗口大于3个纹理周期时,也会出现随着窗口的增大,图像由清晰到模糊的现象。因此对于纹理丰富的图像,会出现随着模糊窗口增大,模糊度出现振荡的现象。

2.3 实验3 模糊度与主观评价一致性验证

本文主要使用得克萨斯州大学奥斯汀分校图像与视频工程实验室(LIVE)提供的LIVE数据库作为VQEG的5个评价指标的测试数据。该数据库包含了145幅高斯模糊图像及其对应的主观评价分值(MOS和DMOS)。本文算法和比较算法的5个性能指标如表1所示。5个指标中Pearson相关系数和Spearman秩相关系数分别表示算法结果与主观评价结果的相关性和单调性,其值越接近1,说明算法的结果与主观评价越一致;均方误差(RMSE)、平均绝对误差(MAE)和离出率(OR)表示算法结果与主观评价结果的误差,其值越接近0,说明算法的结果与主观评价结果越一致。从表1中可以看出:在上述5个指标中,本文算法在表征主客观相关性和模型单调性方面2个指标上更接近1,说明其在这

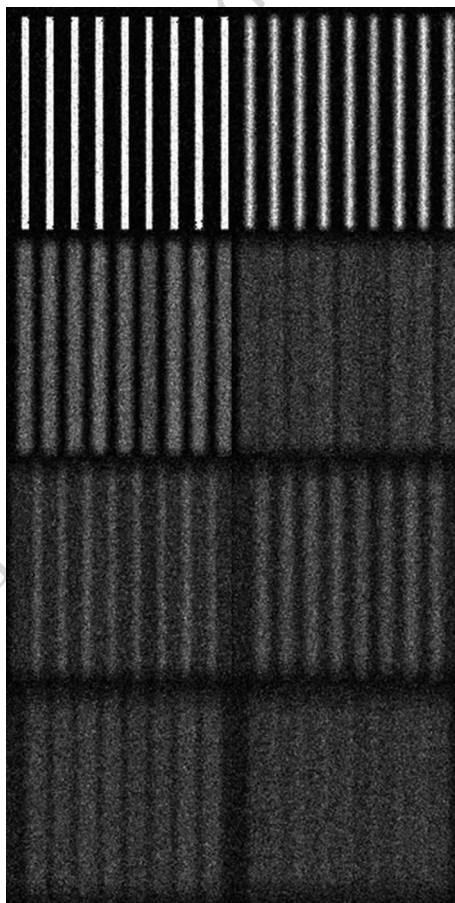


图5 模糊窗口大小对纹理图像的影响
(从左至右,从上至下,模糊窗口逐渐增大)

Fig. 5 Blurring results with increasing size of average filtering mask

两个指标上优于比较的其他4种算法;但在表示模型准确性的3个指标上,本文算法只没有比Q1算法更接近0,说明本文算法在这3个指标上稍劣于Q1算法,但强于其他3种算法。

表1 LIVE数据库上各算法性能比较

Table 1 Algorithm performance comparisons on the LIVE IQA database with VQEG evaluation metrics

测度	Pearson	Spearman	RMSE	MAE	OR
Crete	0.992 4	0.988 6	0.045 5	1.560 9	1.251 4
SBM	0.994 42	0.990 58	0.030 3	1.489 2	1.228
Q1	0.997 1	0.991 2	0	1.062 8	0.858 3
CPBD	0.988 8	0.992 5	0.083 3	2.071 5	1.699 6
SPBM	0.995 6	0.994 3	0.028 7	1.482 6	1.272 8

综合实验1、实验2和实验3,可以得出如下结论:

- 1) 本文基于稀疏表示和概率潜在语义的模糊度评价算法在主客观评价一致性上要优于只是基于稀疏表示的模糊度评价算法;
- 2) 本文算法在单调性、抗噪性和主客观评价一致性上要整体优于用于CPBD算法、Crete算法、Q1算法和SBM算法。

3 结 论

本文根据人类视觉系统具有无监督学习和层次化特征提取的特点,利用概率潜在语义的方法从图像稀疏表示系数中提取主题,将待测图像的主题与清晰图像的平均主题之间的相关性作为图像模糊度评价的依据,尝试弥补图像质量好坏的语义特征与图像底层特征之间的语义鸿沟。在仿真图和公共测试数据库上与典型算法的比较实验表明,本文算法在VQEG制定的5个评价指标以及单调性和抗噪性上都取得了较好的效果。进一步地将在样本图像对算法的影响、参数自适应设置以及提高算法效率等方面展开研究。

参考文献 (References)

- [1] Lin W S, Kuo C C J. Perceptual visual quality metrics: a survey [J]. J. Vis. Commun., 2011, 22(4): 297-312.
- [2] Wei Z G, Yuan J H, Cai Y L. The history, status and future of image quality evaluation [J]. Journal of Image and Graphics,

- 1998, 3(5): 386-389. [魏政刚, 袁杰辉, 蔡元龙. 图像质量评价方法的历史、现状和未来 [J]. 中国图象图形学报, 1998, 3(5): 386-389.] [DOI:10.11834/jig.199805119]
- [3] Zhou J C, Dai R W, Xiao B H. Overview of image quality assessment research [J]. Computer Science, 2008, 35(7): 1-4. [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.]
- [4] Ong E, Lin W, Lu Z, et al. A no-reference quality metric for measuring image blurs [C]//IEEE International Symposium on Signal Processing and Its Applications. Paris, France: IEEE Press, 2003: 469-472.
- [5] Ferzli R, Karam L J. A no-reference objective image sharpness metric based on the notion of just noticeable blur (JNB) [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2009, 18(4): 717-728.
- [6] Ferzli R, Karam L J. A no-reference image blur metric based on the cumulative probability of blur detection [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2011, 20(9): 2678-2683.
- [7] Batten C F. Auto-focusing and astigmatism correction in the scanning electron microscope [D]. Cambridge: Cambridge Univ., 2000.
- [8] Zhu X, Milanfar P. Automatic parameter selection for denoising algorithms using a no-reference measure of image content [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2010, 19(12): 3116-3132.
- [9] Firestone L, Cook K, Talsania N, et al. Comparison of autofocus methods for automated microscopy [J]. Cytometry, 1991, 12(3): 195-206.
- [10] KuangChern N, Ang N P, Jr M H. Practical issues in pixel-based auto focusing for machine vision [C]// Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation. Seoul, Korea: IEEE Press, 2001: 2791-2796.
- [11] Marichal X, Ma W Y, Zhang H J. Blur determination in the compressed domain using DCT information [C]//IEEE International Conference on Image Processing. Kobe, Japan: IEEE Press, 1999: 386-390.
- [12] Crete F, Dolmiere T, Ladret P, et al. The blur effect: perception and estimation with a new no-reference perceptual blur metric [C]//Proceedings of SPIE Conference on Human Vision and Electronic Imaging, California, USA: SPIE, 2007, 6492: 1-11.
- [13] Nill B, Bouzas B H. Objective image quality measure derived from digital image power spectra [J]. Optical Engineering, 1992, 31(4): 813-825.
- [14] Caviedes J, Gurbuz S. No-reference sharpness metric based on local edge kurtosis [C]// Proceedings of International Conference on Image Processing. Rochester, New York: IEEE Press, 2002: 53-56.
- [15] Zhang N, Vldar A, Postek M, et al. A kurtosis based statistical measure for two-dimensional processes and its application to image sharpness [C]//Proceedings of the Physical and Engineering Sciences. Alexandria, Va: American Statistical Association,

- 2003:4730-4736.
- [16] Shaked D, Tasl I. Sharpness measure: towards automatic image enhancement [C]//Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing. Genoa, Italy: IEEE Press, 2005: 937-940.
 - [17] Vu P, Chandler D. A fast wavelet-based algorithm for global and local image sharpness estimation [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2012, 19(7): 423-426.
 - [18] Hassen R, Wang Z, Salama M. No-reference image sharpness assessment based on local phase coherence measurement [C]//Proceedings of IEEE International Conference on Acoustics Speech and Signal Processing. Dallas, TX: IEEE Press, 2010: 2434-2437.
 - [19] Chen M J, Bovik A C. No-reference image blur assessment using multiscale gradient [C]//Proceedings of International Workshop on Quality of Multimedia Experience. San Diego, CA: Springer International Publishing AG, 2009: 70-74.
 - [20] Ciancio A, Da Costa, Da Silva, et al. No-reference blur assessment of digital pictures based on multifeature classifiers [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2011, 20(1): 64-75. [DOI: 10.1109/TIP.2010.2053549]
 - [21] Vu C, Phan T, Chandler D. S3: a spectral and spatial measure of local perceived sharpness in natural images [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2012, 21(3): 934-945.
 - [22] Linde I, Rajashekar U, Bovik A C, et al. Visual memory for fixated regions of natural scenes dissociates attraction and recognition [J]. Perception, 2009, 38(8): 1152-1171.
 - [23] Wang Z, Bovik A C. Reduced and no reference visual quality assessment -The natural scene statistic model approach [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2011, 29(6): 29-40.
 - [24] Zhang T, Liang D Q, Wang X N. Image fuzzy degree assessment method based on sparse representation [J]. Computer Engineering, 2013, 39(4): 267-271. [张涛, 梁德群, 王新年. 基于稀疏表示的图像模糊度评价方法 [J]. 计算机工程, 2013, 39(4): 267-271.]
 - [25] Mittal A, Muralidhar G S, Ghosh J, et al. Blind image quality assessment without human training using latent quality factors [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2012, 19(2): 75-78.
 - [26] Shi Q. No-reference image quality assessment based on PLSA [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2012. [石倩. 基于PLSA的无参考图像质量评价 [D]. 大连: 大连海事大学, 2012.]
 - [27] Lu Z H. Analysis and assessment of image quality with latent semantic [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2013. [卢中华. 图像质量的潜在语义分析及评价 [D]. 大连: 大连海事大学, 2013.]
 - [28] Olshausen B A, Field D J. Emergence of simple-cell receptive field properties by learning a sparse code for natural images [J]. Nature, 1996, 381: 607-609.
 - [29] Hofmann T. Unsupervised learning by probabilistic latent semantic analysis [J]. Machine Learning, 2001, 42: 177-19. [DOI: 10.1023/A:1007617005950]
 - [30] Engan K, Aase S O, Hakon H J. Method of optimal directions for frame design [C]//Proceedings of IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. Phoenix, AZ: IEEE Press, 1999, 5: 2443-2446.
 - [31] Aharon M, Elad M, Bruckstein A. K-SVD: algorithms for designing overcomplete dictionaries for sparse representation [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2006, 54(11): 4311-4322.
 - [32] Dai W, Xu T, Wang W. Simultaneous code word optimization (SimCO) for dictionary update and learning [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2012, 60(12): 6340-6353.
 - [33] VQEG. Final report from the video quality experts group on the validation of objective models of video quality assessment [EB/OL]. [2013-11-3]. <http://www.vqeg.org/>.
 - [34] Karam L. CPBD (Better than JNBM) [EB/OL]. [2013-11-3]. <https://ivulab.asu.edu/software/quality/cpbd>.
 - [35] Zhu X, Milanfar P. Automatic parameter selection for denoising algorithms using a no-reference measure of image content [EB/OL]. [2013-11-3]. <http://users.soe.ucsc.edu/~xzhu/doc/metricq.html>.
 - [36] Bao D Q. Image Blur Metric [EB/OL]. 2009-7-9 [2013-11-3]. <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/24676-image-blur-metric>.
 - [37] Yang J, Wright J, Huang T. Image super-resolution via sparse representation [J]. IEEE Trans. on Image Process., 2010, 19(11): 2861-2873.
 - [38] Le Callet P, Autrusseau F. Subjective quality assessment IRCyN/IVC database [EB/OL]. [2013-11-3]. <http://www.irc-cyn.ecnantes.fr/ivcdb/>.
 - [39] USC-SIPI. USC-SIPI image database [EB/OL]. [2013-11-12]. <http://sipi.usc.edu/database/database.php>.
 - [40] Sheikh H R, Bovik A C, Cormack L. LIVE image quality assessment database [EB/OL]. [2013-11-12]. <http://live.ece.utexas.edu/research/quality>.