

基于视觉加权的奇异值分解压缩图像质量评价测度

张飞艳^① 谢伟^② 陈荣元^③ 秦前清^③

^①(武汉大学电子信息学院 武汉 430079)

^②(武汉大学国家多媒体软件工程技术研究中心 武汉 430079)

^③(武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室 武汉 430079)

摘要: 以像素值为基础的传统图像质量评价方法有其固有局限性, 如对图像结构的忽视及对完全参考图像的需求等。为解决这些问题, 该文研究了图像的奇异值向量对图像结构的表征能力, 提出了基于视觉权重的奇异值分解和均值偏差率的部分参考图像质量评价方法 BWSVD(Block Weighted Singular Value Decomposition)。首先, 将图像分成 8×8 大小的图像块, 再利用其奇异值向量差值和均值偏差来定量描述图像畸变程度, 并结合人眼视觉敏感性为每个图像块赋予一个视觉权重。最后, 利用 the Live Image Quality Assessment Database, Release2005 中的 227 幅不同压缩倍率的 JPEG2000 降质图像进行实验, 并与 PSNR, RMSE, UQI, MSSIM, MSVD 等算法进行了对比, 实验表明, 该文算法对压缩图像质量评价具有更好的稳定性, 同时体现了更好的主客观评价一致性。

关键词: 图像质量评价; 奇异值分解; 均值偏差; 视觉加权; 主客观一致性

中图分类号: TN911.73

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)05-1061-05

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2009.00577

Compression Image Quality Assessment Based on Human Visual Weight and Singular Value Decomposition

Zhang Fei-yan^① Xie Wei^② Chen Rong-yuan^③ Qin Qian-qing^③

^①(Electronic Information School of Wuhan University, Wuhan 430079, China)

^②(National Engineering Research Center for Multimedia Software, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

^③(State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

Abstract: The traditional image quality assessment methods based on pixels have their own limitations, such as the lack of consideration of the image structure, or the need of a complete reference image. To avoid these problems, this paper presented a new image quality assessment method based on Block Weighted Singular Value Decomposition (BWSVD). First, the images are divided into blocks at size 8×8 , then, the singular value vector difference and the mean bias between the original image blocks and the distorted image blocks are considered to evaluate the distortion degree. Beside this, the Human Visual Sensibility (HVS) is considered to determine the weight of each block. Many tests are conducted to evaluate the performance; the 227 testing images are coming from the Live Image Quality Assessment Database, Release 2005. Compared with the PSNR, RMSE, UQI, MSSIM, MSVD algorithms, the presented method shows a great improvement in both the consistency with the DMOS (Differential Mean Opinion Score, DMOS) and the stability when it is applied to different compression rates.

Key words: Image quality assessment; Singular Value Decomposition (SVD); Mean bias; Human visual weight; Consistence between subjective and objective evaluations

1 引言

图像质量评价是图像处理领域的重要内容之一, 其评价方法一般来说可分为主观质量评价 (Mean Opinion Score, MOS) 方法和客观质量评价

方法。主观评价是指把多个观察者对待评价图像的质量进行主观打分来进行加权平均的综合评价, 也称为平均评定得分法。因其速度慢、成本高, 在实际应用中受到很大限制。对于客观质量评价方法, 目前人们最常用的指标是均方误差 (Mean Square Error, MSE) 和峰值信噪比 (Peak Signal Noise Ratio, PSNR), 它们都是基于统计特性的客观图像质量评价方法。MSE 和 PSNR 的计算比较直观、严格、简单, 这使得它们一直得到广泛使用。但是由于这两

2009-04-19 收到, 2009-09-28 改回

国家 863 计划重点项目 (2006AA12Z132), 国家自然科学基金 (40601055) 和湖南省教育厅科研项目 (09C567) 资助课题

通信作者: 张飞艳 fifi012@sina.com

种方法都是独立地基于逐像素点比较图像差别,把图像中所有像素点同样对待,因此它们只能近似地反映图像质量。文献[1]提出一种基于结构相似度的图像质量评价指标,畸变模型包括 3 个因素:相关性损失、亮度畸变和对比度畸变。这种方法不仅算法复杂,而且在通常的图像畸变情况下,并没有比 PSNR 和 MSE 表现出明显的优越性^[2,3]。以上方法都是基于对应像素灰度误差的评价框架,有其固有缺陷,而且需要原始图像和压缩重建图像尺寸完全相同,这对于实际应用来说是一个很大的负担。因此,为了将客观评价与主观评价相结合,同时满足应用需求,本文提出了一种基于视觉权重和奇异值分解的部分参考图像质量评价测度。

2 基于视觉加权的奇异值分解压缩图像质量评价

根据人眼视觉感知特性,本文提出了一种基于奇异值分解的图像质量评价方法。利用奇异值分解对图像特征的提取能力对参考图像和压缩重建图像进行分块分析,获得每块图像的奇异值向量差,通过对每块图像赋予相应的视觉权重对其进行视觉加权,得到一种新的部分参考图像质量评价指标。在此,参考图像定义为未经压缩的,可用来与压缩重建图像做对比的标准图像。

2.1 人眼视觉加权

对人类视觉系统(HVS)的研究发现,HVS 对刺激信号的反应不是取决于信号的绝对亮度,而是取决于信号相对背景亮度(信号平均亮度)的刺激度。用于图像处理领域,可理解为人眼对图像不同区域的关注度取决于该区域的细节信息量。在此基础上,根据图像不同区域细节信息的丰富程度,本文将图像分为不同的区域进行加权评价,而有别于传统评价方法对所有像素的一视同仁。

视觉加权算法如下:

(1)运用 canny 算子将待评价图像进行边缘提

取,获取其细节信息图。

(2)将(1)中所获取的细节图分成 8×8 的图像区域,统计每个 8×8 块中像素不为 0 的个数。其值越大,表明此 8×8 区域中细节信息越丰富。

(3)依据(2)中统计值将全部 8×8 图像区域分为 4 个等级,通过反复实验及近似取值,确定阈值如下:完全平滑区为统计值为 0 的图像区域;较平滑区为统计值小于 10 的图像区域;细节较丰富区为统计值大于 10 小于 20 的图像区域;若统计值大于 20,则认为该图像区域细节丰富。对此 4 种图像区域分别赋予权重 $hw = \{0,1,2,3\}$ 。(图像区域划分等级越多,计算越精确,但是算法越复杂,因此,综合考虑下,将图像区域的视觉敏感度划分为 4 个等级)。

2.2 奇异值分解

矩阵的奇异值分解定义为:设 \mathbf{A} 为 $m \times n$ 阶实矩阵,则存在 m 阶正交矩阵 \mathbf{U} 和 n 阶正交矩阵 \mathbf{V} ,使得

$$\mathbf{A} = \mathbf{U} \cdot \mathbf{S} \cdot \mathbf{V}^T \quad (1)$$

其中 $\text{diag}(\mathbf{S}) = (\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \dots, \sigma_k)$, $\sigma_k > 0$, $k = \text{rank}(\mathbf{A})$ 。 \mathbf{S} 的元素从大到小排列,在数值上成指数递减的变化趋势, \mathbf{S} 特征向量中的前几个分量包含了图像代数属性的主要信息。 \mathbf{U} , \mathbf{V} 的元素 u_i, v_i 称为左右奇异值向量元素, \mathbf{S} 的 k 个不为 0 的对角元素称为 \mathbf{A} 的奇异值,构成了 \mathbf{A} 的奇异值向量。

2.3 图像的奇异值向量和均值偏差率

图像的奇异值向量可以很好地表征图像的结构信息,如图 1 所示,对一幅图像,如图 1(a)做奇异值分解,重构时,将奇异值向量替换为同样大小的单位对角矩阵,得出图 1(b)^[4,5]。

由图 1 所示,剥除奇异值向量后,图像的结构信息几乎完全被屏蔽,由此可见,图像的奇异值向量包含了图像的绝大部分结构信息,在图像处理领域引入奇异值分解概念是对图像特征提取的一大应用,这也是本文算法的理论基础。

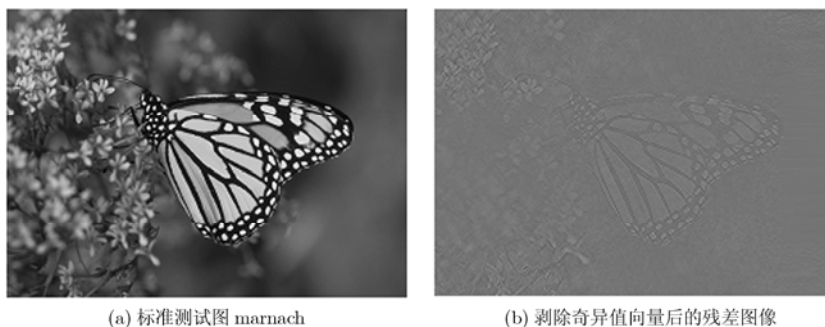


图 1

上述过程可用公式表示如下：

$$\begin{aligned} \mathbf{I}_{\text{org}} &= \mathbf{U}_{\text{org}} \cdot \mathbf{S}_{\text{org}} \cdot \mathbf{V}_{\text{org}}^{\text{T}} \\ \mathbf{I}_{\text{dis}} &= \mathbf{U}_{\text{dis}} \cdot \mathbf{S}_{\text{dis}} \cdot \mathbf{V}_{\text{dis}}^{\text{T}} \end{aligned} \quad (2)$$

其中 \mathbf{I}_{org} 为参考图像矩阵, \mathbf{S}_{org} 为参考图像的奇异值向量, \mathbf{U}_{org} , \mathbf{V}_{org} 分别为其左右奇异值向量矩阵; \mathbf{I}_{dis} 为压缩重建图像矩阵, \mathbf{S}_{dis} 为压缩重建图像的奇异值向量, \mathbf{U}_{dis} , \mathbf{V}_{dis} 分别为其左右奇异值向量矩阵。

设 \mathbf{A} 为与标准图像同大小的单位矩阵, 则用 \mathbf{A} 替换奇异值向量 \mathbf{S} , 得到

$$\begin{aligned} \mathbf{I}_{\text{org}\mathbf{A}} &= \mathbf{U}_{\text{org}} \cdot \mathbf{A} \cdot \mathbf{V}_{\text{org}}^{\text{T}} \\ \mathbf{I}_{\text{dis}\mathbf{A}} &= \mathbf{U}_{\text{dis}} \cdot \mathbf{A} \cdot \mathbf{V}_{\text{dis}}^{\text{T}} \end{aligned} \quad (3)$$

其中 $\mathbf{I}_{\text{org}\mathbf{A}}$, $\mathbf{I}_{\text{dis}\mathbf{A}}$ 分别表示用单位矩阵替换奇异值向量后的参考图像和压缩重建图像。

为了更好地表征图像, 本文提出均值偏差的概念, 用以表述剔除奇异值信息之外的图像残余信息, 定义均值偏差率为

$$D_u = \frac{|u_{\mathbf{I}_{\text{org}\mathbf{A}}} - u_{\mathbf{I}_{\text{dis}\mathbf{A}}}|}{u_{\mathbf{I}_{\text{org}\mathbf{A}}}} \quad (4)$$

其中 $u_{\mathbf{I}_{\text{org}\mathbf{A}}}$, $u_{\mathbf{I}_{\text{dis}\mathbf{A}}}$ 分别表示 $\mathbf{I}_{\text{org}\mathbf{A}}$, $\mathbf{I}_{\text{dis}\mathbf{A}}$ 的均值。

2.4 奇异值差值向量及权重

利用奇异值分解公式(1), 分别求取标准参考图像与压缩重建图像的奇异值向量, 定义奇异值差值向量 \mathbf{D} 如下:

$$\mathbf{D}_s = \mathbf{S}_{\text{org}} - \mathbf{S}_{\text{dis}} \quad (5)$$

$$\mathbf{D}_s = \{d_i\}, \quad i = 1, 2, \dots, k \quad (6)$$

其中 \mathbf{D}_s 表示参考图像和压缩重建图像的奇异值差值向量, d_i 表示 \mathbf{D}_s 中的元素, i 表示奇异值向量的第 i 个元素。

分析矩阵的奇异值向量可知, 向量的前几个元素值即较大奇异值包含较多的图像结构信息, 因而我们提出奇异值权重向量的概念, 其定义即计算公式如下:

$$\mathbf{W} = \{w_i\} \quad (7)$$

$$w_i = \frac{s_i}{\sum_{i=1}^k s_i}, \quad i = 1, 2, \dots, k \quad (8)$$

其中 s_i 表示奇异值向量 \mathbf{S}_{org} 的第 i 个元素。

2.5 基于奇异值分解的质量评价指标

定义基于权重奇异值分解的质量评价测度 W_SVD 如下:

$$W_SVD = \frac{512 \cdot \left(\sum_{i=1}^k w_i \cdot |d_i| \right)}{\sum_{i=1}^k s_i} + D_u \quad (9)$$

由式(9)可知, 本文提出的 W_SVD 图像质量评

价算法只需要标准参考图像和压缩重建图像的奇异值向量和均值偏差, 与需要完全参考图像的 MSSIM 算法相比, 使用更方便, 更具有实用价值。 d_i 越小, 得出的 W_SVD 值越小, 表示两幅图像差别越小, 即所测试压缩重建图像质量越好。

2.6 基于视觉加权的奇异值分解质量评价指标

将参考图像和压缩重建图像分成 8×8 的块, 利用 2.1 节中方法将参考图像块分为 4 个等级, 并对其做不同处理:

(1)对完全平滑图像块, 认为它不含图像结构信息, 不对其进行 SVD 分解, 求对应两个 8×8 区域的均值差作为其质量指标;

(2)对非完全平滑图像块, 求取对应块图像的 W_SVD 值, 引入 2.1 节中所得权重。

则基于奇异值分解和视觉加权的图像质量评价指标可用式(10)表示。

对每个 8×8 图像块, 有

$$B_SVD = \begin{cases} hw \cdot W_SVD, & hw \neq 0 \\ \mu_{\text{ref}} - \mu_{\text{dis}}, & hw = 0 \end{cases} \quad (10)$$

则对一幅待评价图像, 其质量评价测度 BWSVD 定义如下:

$$BWSVD = \sum_{j=1}^n B_SVD_j / n \quad (11)$$

其中 μ_{ref} , μ_{dis} 分别表示参考图像和压缩重建图像对应块的均值, n 为图像分块数, B_SVD_j 为第 j 个图像块的 B_SVD 值。

3 实验及分析

为了验证本文算法的有效性, 稳定性, 实验采用了 the Live Image Quality Assessment Database, Release 2005^[6] 图像库中的 227 幅 JPEG2000 压缩图像进行测试, 利用 Rohaly 等人在 2000 年发表的 Final Report from the Video Quality Experts Groupon^[7] 中提出的非线性映射公式建立客观指标 BWSVD 与主观评价 DMOS 的映射关系, 并利用 MATLAB 中的曲线拟合工具箱进行拟合^[8], 采用同样方式对 PSNR, MSE, UQI, MSSIM 及 MSVD 客观评价指标分别与 DMOS 进行拟合, 拟合结果如图(2)所示。

如图 2 所示, 对大量不同压缩倍率的图像, 本文算法与主观评价的拟合度明显高于其它几种算法。利用 MATLAB 曲线拟合工具箱计算生成的拟合效果评价指标 R-square 和 RMSE 值对拟合效果进行定量评价, 如表 1 所示。

实验表明, 与传统 PSNR, MSE, UQI 等基于像素的图像质量评价方法和最近提出的基于结构

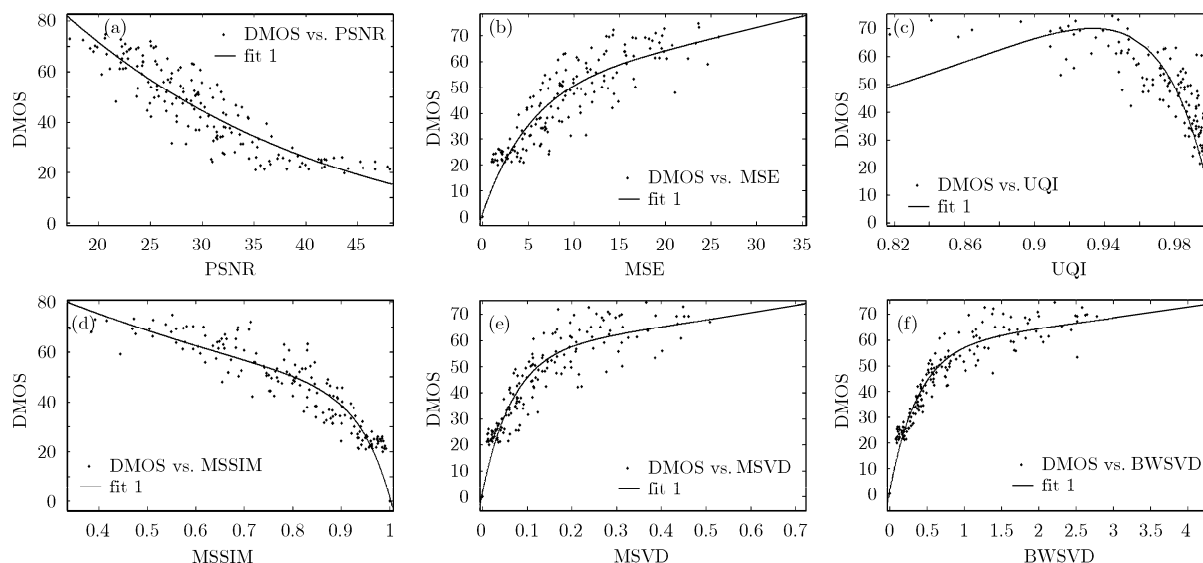


图2 (a),(b),(c),(d),(e),(f)分别为 PSNR, MSE, UQI, MSSIM, MSVD 及本文算法 BWSVD 的客观评价指标与 DMOS 的曲线拟合图, 图像降质类型为 JPEG2000 压缩

表1 曲线拟合结果评价列表

	PSNR	MSE	UQI	MSSIM	MSVD	BWSVD
R-square	0.7846	0.9259	0.8149	0.9395	0.936	0.9642
RMSE	7.609	6.702	10.59	6.052	6.184	4.656

相似的 MSSIM 算法相比, 本文算法通过对图像结构特征的提取, 能够更好地体现压缩重建图像与标准参考图像的结构相似性能, 同时考虑到人眼对不同图像区域的敏感性区别, 对图像进行分块加权, 使得此评价算法与主观视觉评价结果具有更好的一致性。

4 结论

针对传统基于像素的客观质量评价指标与主观评价的不一致性, 提出了利用分块奇异值分解提取图像特征的质量评价方法, 加入视觉影响因子后, 将其应用于 227 幅不同压缩倍率的 JPEG2000 压缩图像, 通过其与主观算法的拟合分析, 得出了此评价方法可很好的用于压缩图像质量的评价, 且不需要获取完全标准参考图像, 而只需要分块图像的 SVD 值和残余图像的均值即可, 这种优势使其更适合于实际应用。同时, 针对视觉权重为 0 的完全平滑图像区域, 不对其进行 SVD 操作, 只考虑其均值偏差, 从而极大的减小了算法的复杂度, 节约了计算时间。

参考文献

[1] Wang Z, Bovik A C, Sheikh H R, and Simoncelli E P. Image quality assessment: from error visibility to structural

similarity. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2004, 13(4): 600-612.

[2] 蹇森, 朱剑英. 基于奇异值分解的图像质量评价. *东南大学学报(自然科学版)*, 2006, 36(4): 643-646.

Qian S and Zhu J Y. Image quality measure using singular value decomposition. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2006, 36(4): 643-646.

[3] 朱里, 李乔亮, 张婷, 汪国有. 基于结构相似性的图像质量评价方法. *光电工程*, 2007, 34(11): 108-118.

Zhu L, Li Q L, Zhang T, and Wang G Y. Metric of image quality based on structure similarity. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, 34(11): 108-118.

[4] Aznaveh A M, Azadeh M, Azar F T, and Eslami M. Image quality measurement besides distortion type classifying. *Optical Review*, 2009, 16(1): 30-34.

[5] Phillips R D, Watson L T, Wynne R H, and Blinn C E. Feature reduction using a singular value decomposition for the iterative guided spectral class rejection hybrid classifier. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2009, 64(1): 107-116.

[6] Sheikh H.R, Wang Z, Cormack L, and Bovik A C. Live image quality assessment database, release. <http://live.ece.utexas.edu/research/quality>, 2006.

- [7] Rohaly A M, Libert J, Corriveau P, and Webster A. Final Report from the Video Quality Experts Groupon the Validation of Objective Models of Video Quality Assessment. http://www.its.bldrdoc.gov/vqeg/projects/firtv_phaseII/downloads/VQEGII_Final_Report.pdf, 2000.
- [8] 苏金明, 张莲花, 刘波. MATLAB 工具箱应用. 北京: 电子工业出版社, 2004: 498-509.
- Su J M, Zhang L H, and Liu B. Application of MATLAB Toolbox. Beijing: Electronic Industry Press, 2004: 498-509.
- 张飞艳: 女, 1984 年生, 博士生, 研究方向为遥感图像处理、图像质量评价.
- 谢 伟: 男, 1982 年生, 博士生, 研究方向为超分辨率图像处理、超分辨率重建图像质量评价.
- 陈荣元: 男, 1976 年生, 博士生, 研究方向为图像融合、数据同化等.
- 秦前清: 男, 1961 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为信息论、小波分析、数据处理应用基础及应用技术.