

基于离散四元数傅里叶变换的彩色图像质量评价

陈莉莉¹ 朱 峰² 盛 斌³ 陈志华¹

(华东理工大学信息科学与工程学院 上海 200237)¹ (江苏大学理学院 江苏 镇江 212013)²

(上海交通大学电子信息与电气工程学院 上海 200240)³

摘 要 彩色图像质量的评价在图像数据的采集、压缩、存储、传输等方面具有重要意义。然而传统的评价方法往往因损失部分彩色信息或者忽略彩色图像的整体性,导致其结果不能很好地与主观结果保持一致,因此提出一种彩色图像客观质量评价方法。将彩色图像表示成四元数矩阵,并对其进行离散四元数傅里叶变换;根据人眼视觉系统特性对频域进行非均匀分块,计算失真图像和参考图像之间的幅值相似度和相位相似度;采用熵值法综合考虑两者对图像质量的影响,获得表示整体图像质量的指标。最后,使用图像数据库针对高斯模糊失真进行相关性分析,以验证方法的可行性和有效性。实验结果表明,客观评价能较好地与主观评价保持一致,且对于 3 个数据库的性能表现稳定,算法性能总体上优于对比方法。

关键词 彩色图像,客观质量评价,离散四元数傅里叶变换,非均匀分块,相关性分析

中图分类号 TP391 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2018.08.012

Quality Evaluation of Color Image Based on Discrete Quaternion Fourier Transform

CHEN Li-li¹ ZHU Feng² SHENG Bin³ CHEN Zhi-hua¹

(School of Information Science and Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)¹

(Faculty of Science, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)²

(School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)³

Abstract Quality evaluation of color image is of great significance in image acquisition, compression, storage, transmission and so on. However, traditional objective evaluation methods often lose some color information or ignore the integrity of color image, making the results can not be well consistent with the subjective scores. This paper proposed an objective quality evaluation method of color image based on discrete quaternion Fourier transform(DQFT). A color image is expressed as a quaternion matrix and the discrete quaternion Fourier transform is applied. Then, the spectrum is divided into non-uniform bins and a reduced space representation of the spectrum is obtained by considering the characteristics of Human vision system which is sensitive to the distortion of lower frequency components and insensitive to higher frequency components. Next, the amplitude similarity and phase similarity between the distorted image and the reference image are described. Taking into account the influence on the image quality of the amplitude similarity and phase similarity, both of them are integrated by using entropy method and the index of the distorted image quality is achieved. Finally, image databases were used to analyze the correlation between the objective scores and the subjective scores. The experimental results demonstrate the feasibility and effectiveness of the proposed method.

Keywords Color image, Objective quality evaluation, Discrete quaternion Fourier transform, Non-uniform binning, Correlation analysis

1 引言

图像质量评价^[1]一直是图像工程领域的研究热点之一。由于图像在压缩、存储和传输的过程有质量损失,所获得的图像与原图像间存在差异,应用图像进行数据分析时容易产生误差,因此对图像的质量进行评价十分必要。此外,可以通过

评价图像质量的优劣,来比较各种图像处理算法,评估系统性能和优化模型参数^[2-3]。图像质量评价可分为主观评价方法^[4]和客观评价方法^[5]。主观方法通过给出一系列测试图像,使实验人员依据主观感知对测试图像进行打分从而获得图像质量。客观方法则通过数学模型给出图像质量的量化指标。由于主观方法费时费力,且容易受测试环境、设备条件、

到稿日期:2017-10-24 返修日期:2018-03-11 本文受国家自然科学基金项目(61672228)资助。

陈莉莉(1995—),女,硕士,主要研究方向为图像处理;朱 峰(1977—),男,副教授,主要研究方向为医学图像处理和识别;盛 斌(1981—),男,副教授,主要研究方向为计算机图形学、虚拟现实;陈志华(1969—),男,教授,CCF 高级会员,主要研究方向为数字图像处理、计算机图形学, E-mail: czh@ecust.edu.cn(通信作者)。

人的心理状态等多方面的影响,实际使用价值不高,而客观方法耗时小、费用低且易于实现,因此更多的研究侧重于使用客观图像质量的评价方法。基于人眼才是图像的最终受体这一事实,客观图像质量的评价方法必须以尽可能地符合主观结果为准则。

目前,大多数文献仍集中于对灰度图像进行质量评价^[6-9],然而客观世界以彩色图像为主,因此研究彩色图像质量的评价方法具有重要意义。彩色图像相较于灰度图像提供了更多的色彩信息,对图像质量的研究更为困难。常用的方法之一是将彩色图像转化为灰度图像,再利用灰度图像质量评价的方法进行处理。另一种方法是分别对彩色图像的 3 个分量进行处理再加权,以获得整体图像质量,如传统的基于像素统计的均方差法(MSE)、峰值信噪比法(PSNR)^[10-11]、基于结构信息基础的结构相似度法(SSIM)^[12]等。然而这两种处理方法的实验结果常常不能很好地与主观结果保持一致,这是因为前者将彩色图像转换成灰度图像时损失了部分信息,后者对 3 个分量分别进行处理割裂了彩色图像的整体性,对结果的准确性和可靠性均有一定影响。为了解决上述问题,叶佳等^[13]提出了一种基于超复数奇异值分解(SVD)的彩色图像客观质量评价方法,将表征图像信息的超复数矩阵的奇异值作为衡量图像质量的标准。然而由于该方法需要进行超复数矩阵的奇异值分解,计算过程复杂且费时,不适于处理数量多且尺寸大的图像。

傅里叶变换是信号和图像处理的重要工具之一,目前已有许多研究将傅里叶变换运用到灰度图像的处理中。Narwaria 等^[14]将傅里叶变换应用于灰度图像的质量评价,研究了相位和幅值对图像质量评价的影响。随着彩色图像超复数傅里叶变换的提出^[15],越来越多的研究者意识到傅里叶变换对于彩色图像处理的重要意义,并将其运用于图像水印、图像增强等各种彩色图像处理算法^[16-18]中。

本文提出了一种基于离散四元数傅里叶变换的彩色图像客观质量评价方法,主要工作有以下几点:

- 1) 采用四元数表示彩色图像,很好地保留了彩色信息并体现了彩色图像的整体性。
- 2) 将彩色图像傅里叶变换的频谱作为图像信息的表示,计算失真图像和参考图像间的相位相似度和幅值相似度,以此来反映两个图像间的信息差异。
- 3) 由于人眼视觉系统对不同频率成分的敏感度不同,在获得频谱时对频域进行非均匀分块,从而获得减少信息表示的幅度谱和相位谱,即我们可以使用更少的信息来计算图像质量,同时使其很好地与主观感知相符合。
- 4) 采用熵值法综合考虑相位和幅值对整体图像质量的影响,获得对失真图像整体的质量评价。
- 5) 选取图像数据库进行主客观相关性分析,验证方法的可行性和有效性。实验结果表明,所提方法能很好地与主观评价方法相吻合,并且优于文中列出的客观质量评价方法。

2 彩色图像的傅里叶变换

采用 RGB 模型表示的彩色图像的每一个像素点包含红(R)、绿(G)、蓝(B) 3 个分量,一幅大小为 $m \times n$ 的图像可以

用一个大小为 $m \times n$ 的纯四元数矩阵 $f(x, y)$ 表示:

$$f(x, y) = R(x, y)i + G(x, y)j + B(x, y)k \quad (1)$$

其中, x 和 y 分别表示矩阵的行和列, $x \in [0, m-1]$, $y \in [0, n-1]$ 。四元数的 3 个虚部分量分别对应彩色图像的 3 个分量。

这样,一个彩色图像存在唯一的一个四元数矩阵与之对应。彩色图像的这种四元数矩阵表示法完整地保留了色彩信息,且很好地体现了彩色图像的整体性,解决了传统的彩色图像处理方法存在的问题。

对于 $f(x, y)$, 定义其离散四元数傅里叶变换^[15]如下:

$$F(u, v) = \frac{1}{\sqrt{m \times n}} \sum_{x=0}^{m-1} \sum_{y=0}^{n-1} e^{-\mu 2\pi i (\frac{xu}{m} + \frac{yv}{n})} f(x, y) \quad (2)$$

其对应的逆变换为:

$$f(x, y) = \frac{1}{\sqrt{m \times n}} \sum_{u=0}^{m-1} \sum_{v=0}^{n-1} e^{\mu 2\pi i (\frac{xu}{m} + \frac{yv}{n})} F(u, v) \quad (3)$$

其中, (x, y) 表示空间域的坐标, (u, v) 表示频率域的坐标。 μ 是一个单位纯四元数, 且 $\mu^2 = -1$ 。对于彩色图像, 取 $\mu = (i + j + k) / \sqrt{3}$ 。四元数的傅里叶变换仍为四元数, 设:

$$F(u, v) = a(u, v) + b(u, v) \cdot i + c(u, v) \cdot j + d(u, v) \cdot k \quad (4)$$

定义其幅值为:

$$|F(u, v)| = \sqrt{a^2(u, v) + b^2(u, v) + c^2(u, v) + d^2(u, v)} \quad (5)$$

定义其相位为:

$$\theta(u, v) = \arctan \frac{\sqrt{b^2(u, v) + c^2(u, v) + d^2(u, v)}}{a(u, v)} \quad (6)$$

通过对彩色图像进行离散四元数傅里叶变换, 可以获得其傅里叶变换的频谱, 如图 1 所示。

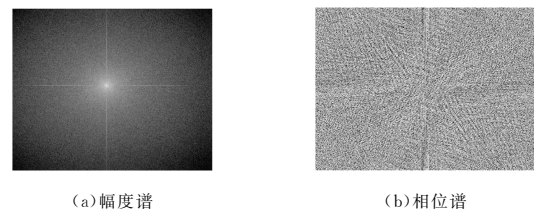


图 1 彩色图像的离散四元数傅里叶变换频谱图

Fig. 1 Discrete quaternion Fourier transform of color images

3 基于离散四元数傅里叶变换的彩色图像质量评价方法

给定一幅大小为 $m \times n$ 的彩色失真图像及其对应的同样大小的参考图像, 来评价失真图像的图像质量。首先, 对失真图像和参考图像同时进行以下处理: 基于图像像素具有局部相关性这一事实, 首先将图像分成互不重叠的 $w \times w$ 个图像块, 然后对每一个图像块进行上述傅里叶变换, 获得表示图像信息的幅度谱和相位谱。下面, 考虑如何比较失真图像和参考图像间信息的差异性, 并以此作为评价失真图像质量的指标。

3.1 频域非均匀分块

Cakir 等^[19]最先提出对频率空间进行非均匀分块的思想。基于人眼视觉系统对高频失真的容忍性大、对低频失真

更为敏感的视觉特性, Narwaria 等^[14]将频域的非均匀分块运用于灰度图像的质量评价中。基于此理论, 本文利用对数压缩非均匀量化法对彩色图像的频域进行非均匀分块。首先, 对频率空间的 u 轴区间和 v 轴区间使用对数函数压缩; 然后, 将所获得的区间进行均匀分段再对分段点取反对数, 即分别得到了 u 轴和 v 轴的非均匀分段区间点, 完成了对频域的非均匀分块。在实际分段过程中, 高频区域的分块大, 低频区域的分块小, 直流分量不分块, 频域非均匀分块示意图如图 2 所示。

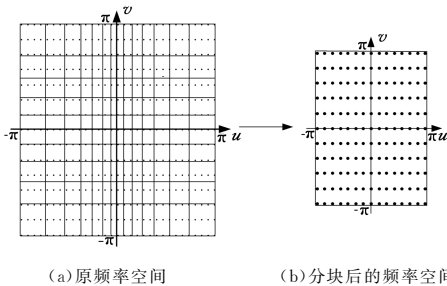


图 2 频域非均匀分块示意图

Fig. 2 Diagram of non-uniform blocks for spectrum

图 2 中的黑点表示傅里叶变换的幅值和相位, 使用每一个分块的平均幅值和平均相位来表示分块后频率空间的幅值和相位, 可以获得一个减少了信息的幅度谱和相位谱。不同于传统的直接丢弃高频成分的做法(完全忽略高频成分对图像质量的影响, 容易产生误差), 这种依据人眼视觉系统的特性对频域进行非均匀分块的方法, 在结合人眼视觉特性的同时, 既保留了部分高频信息, 又有效地减少了图像信息表示, 使得结果能更好地符合主观评价结果。

3.2 幅值相似度和相位相似度

我们将频率空间非均匀地分成 $P \times Q$ 个分块, 计算每一个分块的平均幅值和平均相位, 并以此作为每一个分块新的幅值和相位, 获得大小为 $P \times Q$ 的幅值矩阵和相位矩阵, 然后计算描述失真图像和参考图像间差异性的量化指标。令 $M_{ij}^{(ref)}$, $P_{ij}^{(ref)}$ 分别表示参考图像第 j 个图像块第 i 个非均匀分块的平均幅值和平均相位, $M_{ij}^{(dis)}$, $P_{ij}^{(dis)}$ 分别表示失真图像第 j 个图像块第 i 个非均匀分块的平均幅值和平均相位。定义第 j 个图像块的幅值相似度 $q_{mag}^{(j)}$ 和相位相似度 $q_{phase}^{(j)}$ 如下^[14]:

$$q_{mag}^{(j)} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{2M_{ij}^{(ref)}M_{ij}^{(dis)} + C}{(M_{ij}^{(ref)})^2 + (M_{ij}^{(dis)})^2 + C} \quad (7)$$

$$q_{phase}^{(j)} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{2P_{ij}^{(ref)}P_{ij}^{(dis)} + C}{(P_{ij}^{(ref)})^2 + (P_{ij}^{(dis)})^2 + C} \quad (8)$$

其中, N 表示非均匀分块数, $N = P \times Q$ 。 C 为接近 0 的正常数(避免除数为 0)。

定义整体的幅值相似度 Q_{mag} 和相位相似度 Q_{phase} 为 $\omega \times \omega$ 个图像块的平均幅值相似度和平均相位相似度:

$$Q_{mag} = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M q_{mag}^{(j)} \quad (9)$$

$$Q_{phase} = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M q_{phase}^{(j)} \quad (10)$$

其中, $M = \tau \times \omega$ 。 Q_{mag} 和 Q_{phase} 的取值范围为 $[0, 1]$, 0 表示失真程度最大, 1 表示没有失真。

3.3 图像质量评价指标

熵是信息论中对不确定性的度量。熵值越小, 意味着不确定性越小, 所含的信息量越大。可以利用熵的特性来判断指标的离散程度, 离散程度越大, 说明该指标对综合评价的影响越大。熵值法^[20-21]是一类客观赋权法。其根据各个指标的离散程度计算信息熵, 从而得到熵权; 再利用熵权修正各个指标的权重, 从而得到较为客观的指标权重。熵越小, 越有序, 包含的信息越多, 效用值越大, 权重越大。

考虑到影响图像质量的两个指标分别是幅值相似度和相位相似度, 采用加权法获得图像质量的综合评价 Q :

$$Q = \omega_1 \cdot Q_{phase} + \omega_2 \cdot Q_{mag} \quad (11)$$

其中, ω_1 和 ω_2 分别表示相位相似度和幅值相似度的权重, $\omega_1 + \omega_2 = 1$ 。 ω_1 和 ω_2 的值由熵值法确定。获得权重后, 可以利用式(11)计算图像质量分数, 来对图像进行质量评价。

4 实验结果与分析

本文实验计算所使用的 MATLAB 版本为 2010Rb, 所使用的 MATLAB 四元数工具箱为 Sangwine S J 等研发的 qtfm (版本 1.5, 2009-05-02)。实验所用的训练数据库为 LIVE 图像数据库^[22], 测试数据库为 TID2008^[23] 和 CSIQ^[24]。将本文方法运用于高斯模糊失真类型, 并验证其有效性。

4.1 参数选取

选取 LIVE 数据库中的 gb 子集(高斯模糊失真类型)作为训练集以获取最合适的权重值。为了方便计算, 取 $w = 4$, $P = Q$ 。以皮尔逊相关系数为评价算法性能的指标, 为了能够选取最合适的参数使算法性能达到最优, 首先研究了非均匀分块对整体评价效果的影响。选取不同的分块数, 获得主客观分值的皮尔逊相关系数的绝对值随非均匀分块数变化的情况, 如图 3 所示。

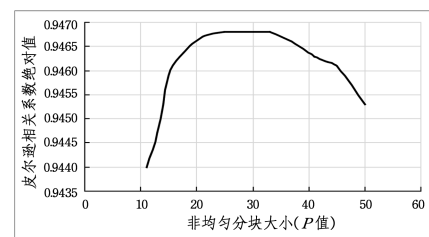


图 3 非均匀分块数对算法效果的影响

Fig. 3 Effects of P -values on algorithm performance

将图 3 中的曲线分为 3 段。当 $P < 21$ 时, 皮尔逊相关系数的绝对值随着非均匀分块数的增加而增加, 这意味着算法的性能变好; 当 $21 \leq P \leq 31$ 时, 即使继续增加非均匀分块数, 算法的性能仍然基本维持不变; 当 $P > 31$ 时, 随着非均匀分块数的增加, 算法性能反而开始下降。这说明, 合理地选取非均匀分块数不仅可以减少所需的图像信息, 还能提高算法的性能。例如, 当不使用均匀分块时, 需要使用全部的图像信息来计算图像质量, 而其皮尔逊相关系数为 -0.9333; 当选取 $P = Q = 31$ 来对图像进行非均匀分块时, 对于一幅大小为 768×512 的图像, 仅需要使用 7.82% 的图像信息来计算图像质量, 而其皮尔逊相关系数为 -0.9468。从图 3 可以发现, 我们还可以继续减少所需的图像信息来达到同样的算法效果。

理论上,由于人眼成像机制本身的局限性,人眼的分辨率是有限的,在空间频率域中表现为其对低频成分敏感而对高频成分不敏感。非均匀分块正是利用了人眼视觉系统这一特性,因此,若对图像进行合理的非均匀分块,其结果能更好地与主观结果相符合。

本文选取 $P=Q=25$ 。利用训练集计算相位相似度 ω_1 和幅值相似度 ω_2 ,其值分别为 0.2512 和 0.7488。图 4 给出了 51 幅测试图像对应的客观分值 Q 及主观分值 $DMOS$ 。图 4 中上方的曲线为 $DMOS$ 值,对应左侧的纵坐标,取值范围为 $[0,100]$;下方的曲线为 Q 值曲线,对应右侧的纵坐标,取值范围为 $[0,1]$ 。可以看出,客观值能很好地反映主观分数的变化, Q 值越大, $DMOS$ 越小,意味着图像质量越好。即本文的结果能很好地与主观结果保持一致,可以用来预测主观分值,评价图像质量。下文将进一步证明所提方法的有效性。

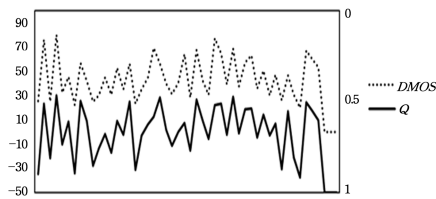


图 4 主客观一致性比较

Fig. 4 Correlation between objective scores and subjective scores

4.2 相关性分析

本文利用相关性分析来分析本文算法的评价效果。使用客观质量评分与主观质量评分之间的相关系数来描述两列数据的相关程度,并以此来判断客观质量评价方法优劣的依据,相关程度越高,客观评价方法的性能越好。相关系数大小所表示的意义如表 1 所列。相关系数的符号表示相关方向(正相关或负相关),相关系数的绝对值表示相关程度。

表 1 相关系数及其对应的相关程度

Table 1 Correlation coefficients and corresponding degree of correlation

相关系数	相关程度
0.00~±0.30	微相关
±0.30~±0.50	实相关
±0.50~±0.80	显著相关
±0.80~±1.00	高度相关

下文的实验中,使用 3 个相关系数即 Pearson 相关系数、Spearman 相关系数、Kendall 相关系数来评价算法的性能。 r_p, r_s, r_k 分别为这 3 个相关系数的绝对值,其值越大,算法的性能越好。

4.2.1 3 个数据库的性能比较

为了证明本文方法对不同数据库的适应性,选择了 LIVE, TID2008, CSIQ 3 个图像数据库的图片进行实验,如表 2 所列。

表 2 3 个数据库的比较

Table 2 Comparison of three different databases

数据库	图像大小	数量	主观分值
LIVE	768×512	102	DMOS
TID2008	512×384	100	MOS
CSIQ	512×512	150	DMOS

表 3 列出了 4 种方法在这 3 个数据库上分别对应的 r_p, r_s 和 r_k 值。其中, Q 指代本文所提出的基于离散四元数傅里叶变换的彩色图像质量评价方法(以下简称 Q 值法)。本文方法的 r_p, r_s 和 r_k 的值几乎都达到 0.8 以上,根据表 1 可知,主客观值的相关程度均为高度相关,客观结果能较好地与主观结果保持一致。这说明对于这 3 个数据库本文方法均有很好的效果。此外,对于 3 个数据库,同一相关系数的改变不大,算法性能接近,说明算法具有稳定性。

表 3 4 种算法对于 3 个数据库的性能比较

Table 3 Performance of four algorithms on three databases

数据库	相关系数	MSE	PSNR	SSIM	Q
LIVE	r_p	0.6831	0.7373	0.8609	0.9468
	r_s	0.8488	0.7399	0.6558	0.9644
	r_k	0.6754	0.5440	0.6888	0.8013
TID 2008	r_p	0.4870	0.8376	0.8603	0.9125
	r_s	0.8682	0.8682	0.7114	0.9244
	r_k	0.7328	0.7328	0.6956	0.7636
CSIQ	r_p	0.8796	0.9081	0.9390	0.9289
	r_s	0.9347	0.9347	0.7965	0.9500
	r_k	0.7689	0.7689	0.7756	0.8013

表 3 还列出了 3 种传统客观质量评价算法 MSE, PSNR, SSIM 的 r_p, r_s, r_k 的值。通过对比可知,本文提出的方法总体上优于其他 3 种算法,且其他 3 种算法对不同数据库的性能差异较大,如 MSE 在 CSIQ 上的性能表现较好,而在 TID2008 上, r_p 值只有 0.4870,与其他算法的差异较大,算法不稳定。

4.2.2 与其他客观评价方法的比较

为了进一步验证方法的有效性,将本文方法与 IFC, PSNRY, PSNR-HVS, VSNR 这 4 种客观评价方法^[23] 进行比较,实验所用数据库为 TID2008,实验结果如表 4 所列。表 5 列出了这 5 种方法的相关系数的排序情况,可以看出,本文方法明显优于 IFC 和 PSNRY。而 PSNR-HVS, VSNR 和 Q 值法 3 种方法各有优劣,总体来讲 Q 值法的性能仍优于 PSNR-HVS 方法,与 VSNR 方法的性能接近。本文方法由于使用了更少的图像信息,减少了计算量,综合考虑了算法的时间复杂度和性能,因此优于其他方法。

表 4 TID2008 上 5 种方法的性能比较

Table 4 Performance comparison of five algorithms on TID2008

相关系数	IFC	PSNRY	PSNR-HVS	VSNR	Q
r_p	0.8707	0.8437	0.9120	0.9330	0.9125
r_s	0.8766	0.8698	0.9165	0.9160	0.9244
r_k	0.6863	0.7337	0.7834	0.7733	0.7636

表 5 5 种方法的相关系数排序

Table 5 Ranking of correlation coefficients of five methods

相关系数	IFC	PSNRY	PSNR-HVS	VSNR	Q
r_p	4	5	3	1	2
r_s	4	5	2	3	1
r_k	5	4	1	2	3

结束语 本文提出了一种彩色图像客观质量评价方法。将彩色图像表示成纯四元数矩阵,很好地保留了色彩信息,体现了彩色图像的整体性。首先,通过四元数傅里叶变换将彩色图像转换到频率空间,并以幅值和相位表示图像信息。然后,本文充分利用了人眼视觉系统对不同频率的敏感程度不

同这一特性,对频域进行非均匀分块。最后使用失真图像和参考图像的相位相似度和幅值相似度表示图像质量的指标,采用熵值法获得图像质量的综合评价。实验结果表明,本文方法的结果能很好地与主观结果保持一致,即本文方法可以有效地预测主观分值,评价图像质量。且与其他方法相比,本文方法对于不同数据库的性能表现稳定,总体上优于对比方法。但文中仅针对1种失真类型进行了实验,未能有效说明该方法的适用范围。事实上,由于不同的失真因素产生了不同的失真类型,人眼视觉特性对图像质量评价产生的影响是不同的。因此,若对不同的失真类型进行质量评价,考虑如何合理地选取参数进行非均匀分块,将是我们进一步需要研究的重点。

参考文献

- [1] JIANG G Y, HUANG D J, WANG X, et al. Overview on image quality assessment methods[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(1): 219-226. (in Chinese)
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.
- [2] LIANG Y, LIU Y J, GUTIERREZ D. Objective quality prediction of image retargeting algorithms[J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2017, 23(2): 1099-1110.
- [3] QURESHI M A, BEGHDAI A, SDIRI B, et al. A comprehensive performance evaluation of objective quality metrics for contrast enhancement techniques[C]// *European Workshop on Visual Information Processing*. Marseille, 2016: 1-5.
- [4] MANTIUK R K, TOMASZEWSKA A, MANTIUK R. Comparison of four subjective methods for image quality assessment [J]. *Computer Graphics Forum*, 2012, 31(8): 2478-2491.
- [5] ZARIC A, LONCARIC M, TRALIC D, et al. Image quality assessment-comparison of objective measures with results of subjective test[C]// *Proceedings ELMAR-2010*. Zadar, 2010: 113-118.
- [6] XUE W, ZHANG L, MOU X, et al. Gradient magnitude similarity deviation: A highly efficient perceptual image quality index [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2014, 23(2): 684-695.
- [7] REENU M, DAVID D, RAJ S S A, et al. Wavelet based sharp features (WASH): An image quality assessment metric based on hvs[C]// *Proceedings of the International Conference on Advanced Computing, Networking and Security*. Mangalore, 2013: 79-83.
- [8] LI S, ZHANG F, MA L, et al. Image quality assessment by separately evaluating detail losses and additive impairments [J]. *IEEE Transactions on Multimedia*, 2011, 13(5): 935-949.
- [9] THAKUR N, DEVI S, UPADHYAY P. Grayscale image quality measure in spatial domain[C]// *Proceedings of the International Conference on Computer and Communication Technology*. Allahabad, Uttar Pradesh, 2010: 224-229.
- [10] RUAAO F, DE ANGELIS A, CARBONE P. A vector approach to quality assessment of color images[C]// *Proceedings of the IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference*. Victoria, BC, Canada, 2008: 814-818.
- [11] YALMAN Y, ERTURK I. A new color image quality measure based on YUV transformation and PSNR for human vision system[J]. *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 2013, 21(2): 603-612.
- [12] WANG Z, BOVIK A C, SHEIKH H R, et al. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2004, 13(4): 600-612.
- [13] YE J, ZHANG J Q, HU B. Hypercomplex Singular Value Decomposition Approach to Objectively Assessing Color Image Quality[J]. *Chinese Journal of Electronics*, 2007, 35(1): 28-33. (in Chinese)
叶佳, 张建秋, 胡波. 客观评估彩色图像质量的超复数奇异值分解法[J]. *电子学报*, 2007, 35(1): 28-33.
- [14] NARWARIA M, LIN W, MCLOUGHLIN I V, et al. Fourier transform-based scalable image quality measure [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2012, 21(8): 3364-3377.
- [15] ELL T A, SANGWINE S J. Hypercomplex Fourier Transforms of Color Images[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2007, 16(1): 22-35.
- [16] OUYANG J, COATRIEUX G, CHEN B, et al. Color image watermarking based on quaternion Fourier transform and improved uniform log-polar mapping[J]. *Computers & Electrical Engineering*, 2015, 46: 419-432.
- [17] GRIGORYAN A M, JENKINSON J, AGAINAN S S. Quaternion Fourier transform based alpha-rooting method for color image measurement and enhancement[J]. *Signal Processing*, 2015, 109(C): 269-289.
- [18] YANG C, ZHANG J, YANG D, et al. Discrete-quaternion-Fourier-transform-based registration method for color images[C]// *International Conference on Audio, Language and Image Processing*. Shanghai, 2010: 1184-1189.
- [19] CAKIR S, CETIN A. Mel-cepstral feature extraction methods for image representation[J]. *Optical Engineering*, 2010, 49(9): 097004.
- [20] ZOU Z H, YUN Y, SUN J N. Entropy method for determination of weight of evaluating indicators in fuzzy synthetic evaluation for water quality assessment[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2006, 18(5): 1020-1023.
- [21] AMIRI V, REZAEI M, SOHRABI N. Groundwater quality assessment using entropy weighted water quality index (EWQI) in Lenjanat, Iran [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2014, 72(9): 3479-3490.
- [22] SHEIKH H R, WANG Z, BOVIK A C, et al. Image and Video Quality Assessment Research at LIVE [OL]. <http://live.ece.utexas.edu/research/quality>.
- [23] PONOMARENKO N, LUKIN V, ZELENSKY A, et al. TID 2008-A Database for Evaluation of Full-Reference Visual Quality Assessment Metrics [J]. *Advances of Modern Radioelectronics*, 2009, 10(10): 30-45.
- [24] LARSON E C, CHANDLER D M. Categorical Image Quality (CSIQ) Database [OL]. <http://vision.okstate.edu/csiq>.