

基于 3 维矩阵变换的彩色图像质量评价方法研究

陈 强 陈贺新 李文娟

(吉林大学通信工程学院, 长春 130025)

摘 要 鉴于传统的图像质量评价指标不能很好地反映图像质量, 为了对图像质量进行更合理的评价, 提出了一种新的彩色图像质量评价方法, 该方法从图像的客观保真度、视觉失真度及清晰度 3 个方面来综合评价图像质量, 其中, 客观保真度作为图像质量的横向评价标准, 而视觉失真度和清晰度则为其纵向评价标准。在评价图像的清晰度时, 还充分考虑了彩色图像 3 帧间的结构相似性, 把彩色图像的各个分量表示在一个统一的数学模型里, 使用 3 维矩阵宽离散余弦变换来衡量图像的清晰度。实验结果表明, 相对于传统的峰值信噪比评价指标来说, 这种方法更为符合人眼视觉特性。

关键词 质量评价 客观保真度 失真敏感度 清晰度 3 维矩阵变换

中图分类号: TN949.61 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2006)11-1732-04

Quality Measure of Color Image Based on Three Dimensional Matrix Transform

CHEN Qiang, CHEN He-xin, LI Wen-juan

(School of Communication Engineering, Jilin University, Changchun 130025)

Abstract In this paper, DSF (definition, error sensitivity and objective fidelity), a new technique of color image quality measure has been proposed in which color image quality can be measured synthetically by calculating the objective fidelity, vision distortion and definition of a color image. The objective fidelity is a base for transverse comparison. While the vision distortion and definition is utilized for vertical evaluation. The great similarity among three frames of one image is taken into account fully and 3D-WDCT (three dimensional wide DCT) is used when the definition was calculated. Three frames, R, G and B, are integrated into one single mathematics model to be transformed. Against PSNR, this method will provide a better performance consistent with human visual characteristic.

Keywords quality measure, objective fidelity, distortion sensitivity, definition, 3D matrix transform

1 引 言

随着多媒体技术的广泛应用, 图像压缩技术也得到了迅速的发展, 而与其相应的图像质量评价方法却没有太大的改进, 评价一幅图像质量好坏采用的仍是以峰值信噪比为指标的传统评价方法, 这类评价方法主要是以降质图像和原图像之间的差异作为主要参数来进行评价, 而对于图像噪声的成因、性质等并没有加以考虑, 从而结果使得具有相同信噪比的两幅图像, 在人眼看来却可能

存在很大的差异, 对于彩色图像更是如此, 其色度信息间的相关性没有很好的利用^[1-3], 而主观评价方法虽然符合人眼视觉感受, 却费时费力, 而且由于评价者的个体差异, 因此对图像质量的评价也相对不够客观。

本文提出了一种新的基于 3 维矩阵的彩色图像质量评价方法, 它综合了客观评价和主观评价两方面的因素, 即从清晰度、失真敏感度和客观保真度 3 个方面来评价彩色图像的好坏。实验结果表明, 该方法对于视觉上存在重大差异, 却具有相同信噪比的图像, 可以得到更为理想的质量评价结果。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (60372060)

收稿日期: 2006-06-29; 改回日期: 2006-08-04

第一作者简介: 陈强 (1977 -), 男, 2000 年获得吉林大学计算机软件与理论专业硕士学位, 现为吉林大学通信与信息系统专业博士研究生。主要研究兴趣为多媒体通信和 MPEG-21 等。E-mail: viixii@yahoo.com.cn

2 客观保真度

假设 $I(x, y)$ 和 $\hat{I}(x, y)$ 分别表示原始彩色图像和降质后的图像元素。所谓客观保真度就是对图像质量的大体评价,是图像进行横向评价的依据。这里,基于人眼的视觉特性,将亮度函数 $L(x, y)$ 、对比度函数 $C(x, y)$ 和结构函数 $s(x, y)$ 3 个因子用来定义客观保真度函数 $F(x, y)$,下面先对 $L(x, y)$ 、 $C(x, y)$ 和 $s(x, y)$ 3 个函数分别定义,然后定义客观保真度 $F(x, y)$,这 3 个函数需满足下列条件:

- (1) 对称性 $F(x, y) = F(y, x)$;
- (2) 有界性 $0 \leq F(x, y) \leq 1$;
- (3) 最大值唯一性,当且仅当 $I(x_i, y_j) = \hat{I}(x_i, y_j)$, $(i=1, 2, \dots, M; j=1, 2, \dots, N)$ 即两幅图像完全相同时,可取得最大值 1。

2.1 亮度函数的定义

用 $L(x, y)$ 来表示亮度函数,其定义为

$$L(x, y) = \begin{cases} 1 & \mu_i = \mu_j = 0 \\ \frac{2\mu_i\mu_j}{\mu_i^2 + \mu_j^2} & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中,图像 I, \hat{I} 的均值为

$$\mu_i = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \hat{I}(x_i, y_j) \quad \mu_j = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N I(x_i, y_j)$$

不难验证,函数 $L(x, y)$ 满足上述的 3 个条件。当 μ_i 和 μ_j 至少一个不为 0 时(这里假设 $\mu_i \neq 0$),则 $L(x, y) = 2\mu_i\mu_j / (\mu_i^2 + \mu_j^2)$,此时若令亮度差 $\Delta I = \hat{I} - I$, $R = \Delta I / I$,则有 $\mu_j = (1 + R)\mu_i$,分子分母同时除以 μ_i^2 ,得

$$L(x, y) = \frac{2(1 + R)}{1 + (1 + R)^2} \quad (2)$$

根据韦伯定律,当背景亮度 I 增大时,能够分辨出的 ΔI 也相应增大,在相当宽的强度范围内, $\Delta I / I$ 为一常数。显然,亮度函数 $L(x, y)$ 只和 R 有关。这也符合韦伯定律。

2.2 对比度函数的定义

$C(x, y)$ 用来表示对比度函数,其定义为

$$C(x, y) = \begin{cases} 1 & \sigma_i = \sigma_j = 0 \\ \frac{2\sigma_i\sigma_j}{\sigma_i^2 + \sigma_j^2} & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中,图像 I, \hat{I} 的方差为

$$\sigma_i = \left(\frac{1}{MN-1} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (I(x_i, y_j) - \mu_i)^2 \right)^{1/2}$$

$$\sigma_j = \left(\frac{1}{MN-1} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (\hat{I}(x_i, y_j) - \mu_j)^2 \right)^{1/2}$$

对比度函数 $C(x, y)$ 也满足上述的 3 个条件。这个函数的特点是,对于具有相同的 $\Delta\sigma$ 两幅图像而言, $\Delta\sigma = \sigma_i - \sigma_j$, σ_i 较小的那幅图像,变化较大,这符合人眼的对比度掩蔽效应。

2.3 结构函数的定义

这里,用 $s(x, y)$ 来表示结构函数,其定义为

$$s(x, y) = \begin{cases} 1 & \sigma_i = 0, \text{ 或 } \sigma_j = 0 \\ \frac{\sigma_{i,j}}{\sigma_i\sigma_j} & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中,

$$\sigma_{i,j} = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [(I(x_i, y_j) - \mu_i)(\hat{I}(x_i, y_j) - \mu_j)]^{1/2}}{(MN-1)}$$

由于 $\sigma_{i,j}$ 与两幅图像的相关性有关,因此可用 $s(x, y)$ 来描述图像间的相似性^[4]。

2.4 客观保真度的定义

最后,根据上述的 3 个条件及 3 个子函数的特点定义客观保真度函数为

$$F(x, y) = L(x, y) \cdot C(x, y) \cdot s(x, y) \quad (5)$$

显然, $F(x, y)$ 满足条件(1)、(2)和(3),在实际计算中,如果采用加窗的方法来计算每个像素点的 $L(x, y)$ 、 $C(x, y)$ 和 $s(x, y)$ 的值,那么整幅图像的客观保真度 F 可定义为

$$F = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N F(x_i, y_j) \quad (6)$$

3 失真敏感度

所谓失真敏感度就是图像对于噪声的敏感程度,这里,用矢量 n 来表示噪声信号,用 S 来表示失真敏感度,则 S 的数学表达式为

$$S = \sigma_{\text{noise}} / \mu_{\text{noise}} \quad (7)$$

其中, μ_{noise} 为噪声信号的均值, $\mu_{\text{noise}} = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^{MN} n_i$, σ_{noise} 为噪声信号的标准差,

$$\sigma_{\text{noise}} = \left[\frac{1}{MN-1} \sum_{i=1}^{MN} (n_i - \mu_{\text{noise}})^2 \right]^{1/2} \quad (8)$$

4 图像对比清晰度

4.1 3 维矩阵离散余弦变换

在定义清晰度之前,先来介绍一下 3 维矩阵宽

离散余弦变换 (width discrete cosine transform, WDCT)^[5]。

由于一幅尺寸为 $M \times N$ 的彩色图像是由 3 帧同样大小的 R、G 和 B 灰度图像组成,因此彩色图像可用如下所示的 3 维矩阵来表示:

$$A_{M \times N \times 3} = [a_{i,j,k}]_{M \times N \times 3} \quad (9)$$

其中, $(1 \leq i \leq M, 1 \leq j \leq N)$ 表示的是彩色图像的空间位置, $1 \leq k \leq 3$ 代表彩色图像的 3 个颜色分量。因此,彩色图像的这种表示就把像素间的位置关系以及相应的各个分量间的关系构筑在同一模型中,这样可以充分利用彩色图像在空间和各分量间的相关性,从而可更好地形成彩色图像评价指数。3 维矩阵变换指对 3 维矩阵进行变换操作,即

$$P_{M \times N \times 3}^{(w)} = (A_{M \times N \times 3} \cdot O_{M \times N \times 3}(i, j, k, w))_w \quad (10)$$

其中, $w = I, II, III$, 分别表示 3 维矩阵的 3 类乘法运算, $A_{M \times N \times 3}$ 为被操作的彩色图像 3 维矩阵, $O_{M \times N \times 3}(i, j, k, w)$ 是与序号有关的同阶 3 维矩阵,称为 3 维矩阵 $A_{M \times N \times 3}$ 的操作算子。

3 维矩阵 WDCT 是将输出中的 $O_{M \times N \times 3}(i, j, k, w)$ 取如下定义,即具体变换核心矩阵 C 的元素为

$$[c_{u,v,w}]_L = \begin{cases} \sqrt{\frac{2}{N}} \cos \frac{i\pi(2j+1)}{2N} & i \neq 0 \\ \frac{1}{\sqrt{N}} & i = 0 \end{cases} \quad (11)$$

当 $L=1$ 时, $i=u, j=v$; 当 $L=2$ 时, $i=u, j=z$; 当 $L=3$ 时, $i=v, j=z$ 。对于 3 维矩阵 A , 其正变换为 $B = (C_3(C_2(C_1AC_1^T)_I, C^T_{II})_{II}, C^T_{III})_{III}$, B 为变换系数 3 维矩阵^[5,6]。

4.2 清晰度的定义

本文将图像在频域的失真程度作为模糊度的评价依据,模糊度的定义为

$$R = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N |P_I[i, j] - P_i[i, j]| \quad (12)$$

其中, P_I, P_i 分别为原始彩色图像和降质图像经过 3 维矩阵离散余弦变换后的输出矩阵。那么,清晰度的数学表达式为

$$D = R/\mu_{noise} \quad (13)$$

5 评价方案与实验结果分析

DSF (definition, error sensitivity and object fidelity) 用来表示最后的评价结果。根据各个因素对图像质量影响的不同,将图像的质量评价指标定义为

$$DSF = F - 0.8 \times S + 0.1 \times D \quad (14)$$

由式(14)可知,DSF 值越大,图像质量越好,当降质图像与原始图像完全相同时,DSF 取得最大值 1。根据上述方法,本文进行了仿真实验,并与传统的客观质量评价方法进行了比较,所用图像是从典型测试图像库中选取的 $256 \times 256 \times 24$ bits 的真彩色图像。客观质量评价使用的是峰值信噪比 (peak signal noise ratio, PSNR),即

$$PSNR = 10 \log \frac{255 \times 255}{MSE} \text{ (dB)} \quad (15)$$

其中, MSE 是重构图像的均方误差。对于彩色图像而言,3 帧 R、G 和 B 图像的峰值信噪比 (分别用 $PSNR_R, PSNR_G$ 和 $PSNR_B$ 来表示) 的平均值则为就是它的峰值信噪比。

表 1 列出了本文提出的 DSF 方法与传统的峰值信噪比方法评价图像的结果比较。由表 1 可以看出,尽管图 1(a)、(b)、(c) 和 (d) 与图 2(a)、(b)、(c) 和 (d) 中的各幅彩色图像的 PSNR 值相差很小,而用 DSF 来衡量则有明显的差别。通过对加入噪声的图像进行质量排序的结果表明,DSF 方法与人眼视觉感受能够很好的保持一致,可见其评价结果要优于传统的峰值信噪比评价方法。

表 1 本文方法评价指标 DSF 与峰值信噪比的对比

Tab. 1 Comparison of DSF and PSNR

图号	Lena		Pepper		图像质量评价排序		
	PSNR (dB)	DSF	PSNR (dB)	DSF	峰值信噪比	DSF	主观感受
(a)	∞	1	∞	1	-	-	-
(b)	25.453	0.815	26.289	0.777	3	3	1
(c)	25.459	0.741	26.821	0.742	2	2	2
(d)	25.474	0.654	26.823	0.698	1	1	3

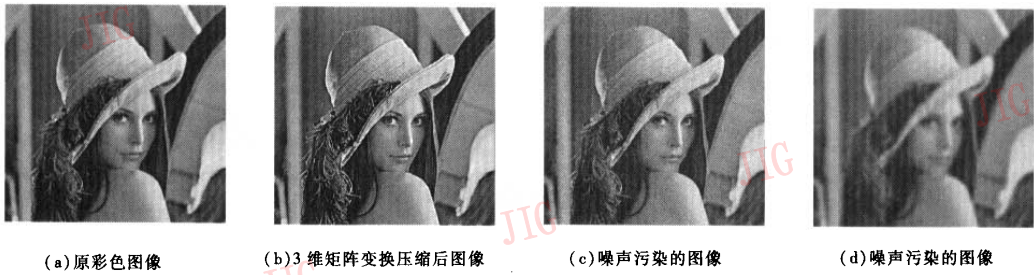


图 1 3 维矩阵变换压缩后及加入不同噪声的 Lena 图像

Fig. 1 Lena images compressed by 3D matrix transform and embedded with different noises

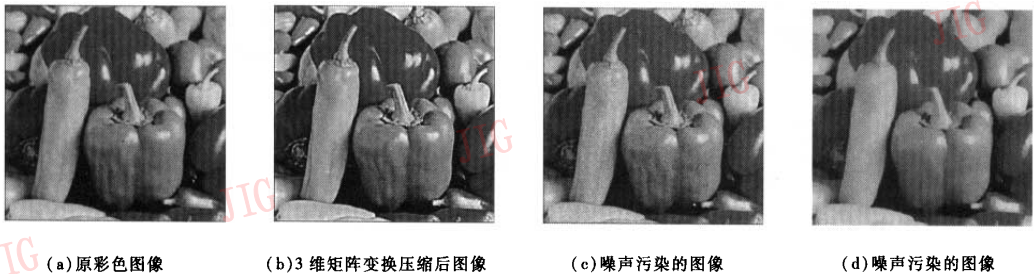


图 2 3 维矩阵变换压缩后及加入不同噪声的 Pepper 图像

Fig. 2 Pepper images compressed by 3D matrix transform and embedded with different noises

6 结 论

本文提出了一种新的基于 3 维矩阵变换的图像质量评价方法——DSF,该方法从清晰度 D 、失真敏感度 S 和客观保真度 F 等 3 个方面入手,对彩色图像质量进行综合评价。仿真实验表明,该方法在充分利用色度冗余的基础上,能够给出与人眼视觉更为一致的评价指数。对 PSNR 相差不大而视觉感受相差很大的图像,本方法能给出令人满意的评价结果。

参考文献 (References)

- Hilbert David. What is color vision [J]. Philosophical Studies, 1992, 68(3): 351 ~ 370.
- Ford Adrian, Roberts Alan. Colour space conversions [EB/OL]. www.poynton.com/PDFs/coloureq.pdf.
- Eckert M P, Bradley A P. Perceptual quality metrics applied to still image compression [J]. Signal Processing, 1998, 70(1): 177 ~ 200.
- Wang Zhou, Bovik Alan Conrad. Image quality assess: from error visibility to structural similarity [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2004, 13(4): 600 ~ 612.
- Sang Ai-jun, Chen He-xin. 3-D matrix wide DCT compression coding for color image [J]. Acta Electronica Sinica, 2002, 30(4): 594 ~ 597. [桑爱军,陈贺新. 3 维矩阵彩色图像 WDCT 压缩编码 [J]. 电子学报, 2002, 30(4): 594 ~ 597.]
- Zhu Yan-qiu, Chen He-xin, Dai Yi-song. Compression coding of color image via 3-D matrix transform [J]. Acta Electronica Sinica, 1997, 25(7): 16 ~ 21. [朱彦秋,陈贺新,戴逸松. 基于三维矩阵变化的彩色图像压缩编码 [J]. 电子学报, 1997, 25(7): 16 ~ 21.]