

一种基于结构相似度的逆半调彩色图像质量评价方法^①

姜楠

(陕西省公安边防总队, 西安 710086)

摘要: 基于 HVS (Human Visual System, 人眼视觉系统) 特性的图像质量评价方法研究已成为图像处理工程中的一个重要研究领域. 但该特性仅考虑了视觉处理的早期阶段, 没有考虑到人的实际观察习惯, 割裂了像素间的相互关系. 鉴于此, 本文考虑利用图像的结构信息来描述彩色逆半调图像的降质程度, 并通过实验验证, 该评价指标能较好反映实际观测效果.

关键词: 逆半调; 图像质量评价; 人眼视觉系统; 评分归一化; 结构相似度

Color Inverse Halftone Image Quality Assessment Algorithm Based on Structure Similarity

JIANG Nan

(Shaanxi Border Control Department, Xi'an 710086, China)

Abstract: Most image assessment methods based on human visual properties only take into account the early stage of the HVS. But natural image signals are highly structured, and the human visual system is highly adapted to extract structural information from the viewing field. Based on the two points above, an assessment method with structural similarity is proposed. The experimental results indicate that the two methods correlate with Mean Opinion Score well.

Key words: inverse halftone; image assessment; human visual system; mean opinion score; structure similarity

1 引言

半调技术是一类广泛应用于印刷、打印、LED 显示的技术, 它通过把连续色调图像转换成二进制表示的半色调图像, 以降低图像再现成本. 逆半调技术是由半调图像重构连续色调图像的技术. 图像质量评价可以检验和衡量图像重构算法的优劣. 传统的图像质量评价方法主要包括客观和主观两大类. 客观评价方法通过计算原始图像与恢复图像之间的数学统计差别来评价图像质量, 如均方根误差法(RMS)、均方误差(MSE)、峰值信噪比(PSNR)等, 这些方法虽然计算简单易行, 能较好的将误差量化表达, 但是评价却独立于图像内容, 往往不能完全符合人的主观感受.

主观评价方法就是让观察者根据一些事先规定的评价尺度或自己的经验, 对测试图像按视觉效果提出质量判断, 通过对观察者的评分归一化来判断图像质量, 常用的有对重构图像的失真程度进行评级(Mean

Opinion Score, MOS)等. 这种方法能够很好的考虑到观察者对图像的理解效果, 然而它的自由度大, 不能用数学模型表达并加以利用. 为此, 人眼视觉特性(HVS)被引入图像质量评价方法, 通过建立相应数学模型来模拟人眼观察效果, 即视觉幅度非线性、对比度敏感度带通和多通道与掩盖效应, 从而达到使评价结果符合人眼视觉的目的. 但是笔者认为该类方法仍以“像素误差”作为衡量依据, 割裂了像素间的相互关系, 破坏了图像的整体性. 鉴于此, 本文考虑利用图像的结构信息来描述彩色逆半调图像的降质程度, 使评价结果进一步符合实际观测效果.

2 基于灰度图像的结构相似度算法理论

对于一幅自然图像而言, 像素之间的依赖性很强, 特别是当它们空间位置接近时. 这种相互依赖性承载了图像丰富的结构信息, 因此自然图像体现出了

^① 收稿时间:2012-08-30;收到修改稿时间:2012-09-24

较强的结构化特征^[1]。同时,当人在观察一幅图像时,总是先抽取视域的结构信息,因此,如果能将这种结构化特征引入图像评价算法,将可以在保持图像整体性的基础上给出符合 HVS 特性的指标。基于该理论,文献[2]提出了基于结构相似度的灰度图像质量评价算法。该算法以图像整体作为评价对象,较好地保持了像素间的相互依赖性,与基于误差的评价算法相比,有以下两个特点:第一,基于误差的评价算法通过比较像素间的误差来量化图像降质程度,而新算法则是以图像结构信息来衡量。图 1 中(a)是原图,其它图像均为具有相同 MSE 的降质图。很明显,尽管降质图 MSE 相同,但是其图像质量却存在明显差异。用基于误差的算法思想我们很难解释为何如此,而从结构相似度的角度出发,我们则可以很容易解释这种现象:这些图像在降质过程中不同程度地损失了结构信息,所以造成了不同的观感;第二,基于误差的评价算法在将 HVS 特性引入时,仅考虑了视觉处理的早期阶段,即光线通过人眼时所经历的低、带通光学处理过程,而没有考虑到人的实际观察习惯。基于图像结构信息的评价思想在充分考虑这一实际情况的同时,还避免了阈值因素,从而减少了评价算法的额外考量。

Zhou Wang 等^[2]认为图像的亮度、对比度等属性反映了图形的结构信息,通过对比原图与降质图的这些属性,并综合其差异,给出了结构相似度指标 SSIM (Structure SIMilarity),该指标可以有效衡量灰度降质图像的结构信息损失程度。如图中所示,SSIM 值依次为 0.9168、0.9900、0.6949、0.7052、0.7748,与人的观感一致。SSIM 的计算步骤如下(原图与降质图分别为 x 和 y , $x(i, j)$ 和 $y(i, j)$ 分别代表对应图像 (i, j) 像素的灰度值,尺寸均为 $M \times N$):

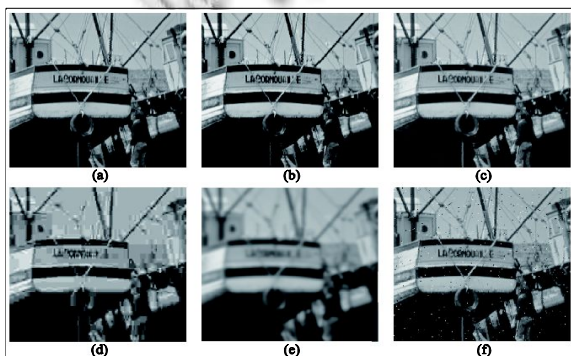


图 1 同一幅图像且具有相同 MSE 的不同降质图

① 比较两图的亮度属性

亮度比较函数:

$$l(x, y) = \frac{2\mu_x\mu_y + c_1}{\mu_x^2 + \mu_y^2 + c_1} \quad (1)$$

其中, $\mu_x = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N x(i, j)$, $\mu_y = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N y(i, j)$,

这里将灰度图像信号的平均强度作为图像亮度的估计值。

② 比较两图的对比度属性

对比度比较函数:

$$c(x, y) = \frac{2\sigma_x\sigma_y + c_2}{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + c_2} \quad (2)$$

其中, $\sigma_x = \left[\frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [x(i, j) - \mu_x]^2 \right]^{\frac{1}{2}}$,

$\sigma_y = \left[\frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [y(i, j) - \mu_y]^2 \right]^{\frac{1}{2}}$.

③ 比较两图的结构属性

结构比较函数:

$$s(x, y) = \frac{\sigma_{xy} + c_3}{\sigma_x\sigma_y + c_3} \quad (3)$$

其中, $\sigma_{xy} = \frac{1}{MN-1} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [x(i, j) - \mu_x][y(i, j) - \mu_y]$.

c_1, c_2, c_3 是为了避免不稳定性而添加的常数。

④ 生成 SSIM

最后综合三个指标,据式(4)生成结构相似度指标 SSIM .

$$SSIM(x, y) = [l(x, y)]^\alpha [c(x, y)]^\beta [s(x, y)]^\gamma \quad (4)$$

α, β, γ 均大于 0,其作用是调整各参量在式中的权重。

SSIM(x, y) 具有以下特性:

- ① 对称性,即 $SSIM(x, y) = SSIM(y, x)$;
- ② 有界性,即 $SSIM(x, y) \leq 1$;
- ③ 最大值唯一性,即当且仅当 $x = y$ 时, $SSIM(x, y)$ 取得最大值 1;

在利用指标进行图像质量评价时,通常要对原图与降质图分块,对每一个小块计算局部结构相似度,取其均值作为两幅图像的全局结构相似度指标^[3],即:

$$MSSIM(x, y) = \frac{1}{T} \sum_{j=1}^T SSIM(x_j, y_j) \quad (5)$$

T 为图像分块数, x_j, y_j 分别代表原图和降质图第 j 个分块。

3 基于彩色逆半调图像的结构相似度

对于彩色图像而言, 图像的结构信息蕴含在其各个分量当中, 但是由于分量间的相关性, 使得结构信息的提取存在一定的困难. 在提取灰度图像结构信息时, 算法将其信号的平均强度作为图像亮度的估计值, 由此可见图像的亮度信息是结构信息的关键, 而高频部分正好对应了图像的边沿信息, 这与亮度对于边缘模糊的影响大于色度和饱和度的人眼视觉特性相符合, 所以亮度通道对于划分图像结构的影响要大于另外两个通道, 因此本文基于彩色逆半调图像的结构相似度算法将以彩色图像的亮度信息作为结构划分的依据, 算法流程如图 2:

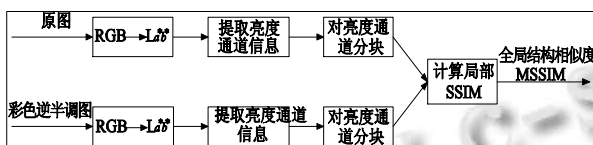


图 2 基于结构相似度的评价算法流程

计算步骤:

- ① 将原图与彩色逆半调图转换至 $La*b^*$ 色彩空间;
- ② 提取亮度通道, 并对该通道分块;
- ③ 以图像的亮度信息为依据, 在每个图像块内

计算局部 $SSIM$;

- ④ 综合局部 $SSIM$, 取均值 $MSSIM$ 作为两幅图像的全局结构相似度;

4 实验结果

为了验证该算法的有效性, 从典型测试图库中选取三幅 512×512 的彩色图, 先对各种逆半调图像用 MOS 评价方法进行评价, 再用本算法进行质量评价, 分别求出每幅逆半调图像与原图的结构相似度 $MSSIM$, 然后通过试验数据考察该评价算法的有效性以及与主观评价的相关性. 试验结果如表 1 和表 2 所示:

测试一:

表 1(a) 多种逆半调算法处理 Floyd 核误差分散半调图结构相似度实验数据

图别	Lena	Pepper
HVS_IH	0.9423	0.9688
IOD_IH	0.9280	0.9674
LUT_IH	0.5351	0.6483
MP_IH	0.9464	0.9657
MIRFP_IH	0.7813	0.9007
VECTOR_IH	0.9392	0.9651
WAVELET_IH	0.9212	0.9630

测试二:

表 1(b) 中值金字塔逆半调方法处理多种半调图结构相似度实验数据

图别	Lena	Pepper
Bayer4	0.9124	0.9375
Bayer8	0.9022	0.9343
Burkers	0.9369	0.9605
Floyd	0.9464	0.9657
Jarvis	0.9108	0.9460
Sierra	0.9180	0.9495
Stevenson	0.8033	0.8839
Stucki	0.9295	0.9535

测试三:

表 1(c) Burkers 核误差分散半调与中值金字塔逆半调处理多种图像结构相似度实验数据

图像	$MSSIM$
Flower	0.8058
Lena	0.9369
Mandrill	0.8440
Pepper	0.9605
tower	0.8653

表 2 结构相似度与 MOS 相关系数

试验	相关系数	
测试一	Lena	0.9653
	Pepper	0.9174
测试二	Lena	0.9124
	Pepper	0.9014
测试三	0.8753	

观察试验数据可知, 由于基于结构相似度的评价方法从人眼观察图像的习惯着手, 所以其评价结果也较基于色差的评价指标更符合人眼视觉特性.

参考文献

- 1 Cadik M, Slavik P. Evaluation of Two Principal Approaches to Objective Image Quality Assessment. Proc. of the 8th International Conference on Information Visualisation. 2004: 1251-1276.
- 2 Wang Z. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity. IEEE Trans. on Image Processing, 2004,13(4):600-611.
- 3 狄红卫,刘显峰.基于结构相似度的图像融合质量评价.光子学报,2006,35(5):766-771.