

# 基于加网算法与算法适应性的 半色调图像质量评价方法

万晓霞<sup>1</sup> 谢德红<sup>1</sup> 徐锦林<sup>1</sup>

(1 武汉大学印刷与包装系, 武汉市珞喻路 129 号, 430079)

**摘要:** 根据各种数字加网的特性提出了各自最优的评价方法, 并针对原始图像和加网图像在视觉上的不同, 利用差别图像的统计特性, 提出了一种基于加网算法和算法适应性的半色调图像质量评价方法。

**关键词:** 加网算法; 半色调图像; 质量评价

中图法分类号: TP751; P237.3

数字加网算法是一个非线性操作<sup>[1]</sup>, 它的目的是把多灰度级的连续调图像转变为输出设备所支持的半色调图像。不同的加网算法产生的半色调图像具有各自不同的特性。第一类, 误差扩散加网算法<sup>[1,2,3]</sup>和蓝绿噪声模板加网算法产生的半色调图像具有量化噪声, 而量化噪声是由相关噪声和加性噪声两部分组成<sup>[4]</sup>, 过大的相关性会产生纹理, 大大地影响了图像的质量。第二类, 聚集点有序抖动的调幅加网算法不会产生相关的量化噪声和白噪声, 而重采样导致半色调图像的走样。同样, 对于其他的加网算法也存在相似的问题。这使得以往仅仅适用于衡量加性噪声(或白噪声)水平<sup>[5]</sup>的手段如 MSE、SNR 和 WSNR 在此不再适用。此外, 这三种方法只是总体地评价图像的质量, 不能察觉图像的局部缺陷, 而且也没有考虑人眼视觉系统, 因此, 需要新的适应各种加网算法或普遍适用的, 同时基于人眼视觉系统的方法来评价一个算法的优劣和所得的半色调图像质量。

## 1 质量评价方法

### 1) 加网算法分析和最优化的图像评价方法

任何加网算法都是非线性变换, 但是对于误差扩散算法, 根据文献[4], 可以近似看作一个线性增益与加性噪声的结合。那么, 新的加网图

像质量的评价方法为:

$$\text{DECOR-WSNR} = \frac{\sum_i^M \sum_j^N (x_{i,j} * * h_{k,l})^2}{\sum_i^M \sum_j^N |b_{ij}| * * h_{k,l} - R \times x_{i,j} * * h_{k,l}|^2} \quad (1)$$

式中, DECOR-WSNR (decorrelated weighted signal to noise ratio) 为去除相关性的权重信噪比;  $x_{i,j}$  为原始连续图像的灰度值;  $b_{ij}$  为加网图像的像素值;  $M$  和  $N$  分别为图像宽和高的像素个数;  $h_{k,l}$  为人眼视觉系统的点扩散函数(PSF);  $R$  为常数, 表示线性增益的大小<sup>[4]</sup>, 与加网图像和原始图像的相关性相关。

表 1 给出在不同的误差扩散核、最大人眼空间分辨率以及平均线性增益  $R^{[4]}$  的情况下的 DECOR-WSNR 值, 发现 Floyd+Steinberg 加网算法产生的噪声水平要低于 Jarvis 和 Stucki 加网算法。

调幅加网是一个将各个像素值与阈值矩阵上的阈值作比较的过程。通常此阈值矩阵是预先确定的, 具有周期性。由于此算法没有反馈系统, 会导致图像大量细节损失。它的优越之处在于它几乎不会产生白噪声<sup>[6]</sup>, 所以无论是 MSE 还是 SNR 和 WSNR 都不适合用来评价此类的加网图像。此外, 由于误差扩散算法的相关性量化噪声来源于其扩散核的反馈系统的噪声塑造功能, 所

以上述的 DECOR-WSNR 方法在此算法中也不适用。

表 1 不同情况下的 DECOR-WSNR 值

Tab.1 DECOR-WSNR in Different Situations

人眼最大空间分辨率	Floyd-Steinberg	Jarvis	Stucki
	R= 2.03	R= 4.37	R= 3.94
60	0.950 7	0.089 4	0.117 4
50	0.947 1	0.089 8	0.118 0
40	0.921 6	0.090 0	0.118 5
30	0.792 3	0.088 8	0.117 3
20	0.417 0	0.080 3	0.105 8

由 Nyquist 采样定理可知, 当采样频率小于最大频率的两倍时, 图像就会走样。加网算法从物理上看不可能实现一位的半色调图像模拟多层次的连续调图像。然而, 人眼视觉系统相当于一个低通滤波器, 而且存在最大的截止空间频率, 使得一位的半色调图像在视觉上可以近似为原始的连续图像。也就是说, 半色调图像在视网膜上不再是半色调图像, 而是经过人眼这个低通滤波器模糊化的连续调图像。对于任何半色调图像在视网膜上的成像, 人眼这个低通滤波器是一样的, 只要控制一位图像的黑白像素的空间分布, 就可以使得加网前后两幅图像在视觉上一致。所以, 对于调幅加网, 其半色调图像的两个相邻网点的距离满足式(2)时, 可以得到较好的加网质量:

$$S \leq \frac{1}{2} \frac{1}{RD} \frac{180}{\pi} \quad (2)$$

式中,  $S$  为相邻像素的距离;  $R$  为人眼最大空间频率;  $D$  为视距。

对于蓝绿噪声模板加网算法<sup>[7]</sup> 或其他的加网算法, 会产生大量的相关噪声, 同时, 为了增强抗打印机扭曲的鲁棒性, 重采样导致半色调图像在某种程度上走样。所以, 要评价此类算法和其半色调图像, 要结合式(1)和调幅网评价的方法。总而言之, 各类加网算法和其半色调图像的质量评价要依据其特殊的性质。

### 2) 算法适应性质量评价方法

根据光学原理, 连续调图像是由一系列不同方向、不同空间频率的正弦波光栅组成。相应地, 半色调图像是由不同方向、不同空间频率的方形波光栅组成, 所以半色调图像就如方形波光栅一样, 只有黑白两色没有中间灰色调层次。从物理上或光学上, 半色调图像和相应的连续调图像在根本上是不相同的。然而, 人眼具有低通的性质, 它可以模糊图像, 从而产生中间灰度层次的视觉错觉, 使得半色调图像和其连续调图像在视觉上相似。加网算法本质上是根据人眼特性, 调

节各个方向的方形波光栅的空间频率来模拟正弦波的组成。如图 1(b) 的空间频率为图 1(a) 的空间频率的 2 倍, 因此, 图 1(c) 正弦波光栅图的相似程度要高于图 1(a)。

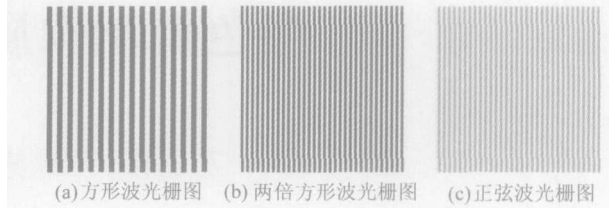


图 1 空间频率

Fig. 1 Spatial Frequency

事实上, 绝大多数的透镜(包括人眼)都不是一个完善的光学系统, 如有限的空间频率等。当一个点光源穿过光学透镜时, 其光的能量就会扩散开, 同时还出现振铃现象, 如图 2(a)。如果半色调图像两点的位置合适, 由于如图 2(a) 所示的能量扩展, 在视网膜上就会产生中间灰度层次, 如图 2(b)。

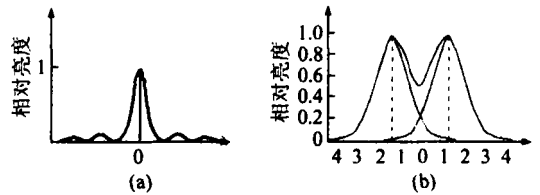


图 2 人眼视觉系统点扩散函数

Fig. 2 Point Spread Function of Human Visual System

综上所述, 把连续调图像和其半色调图像与人眼的点扩散函数(本文选用 Monnos<sup>[8]</sup> 人眼视觉系统的点扩散函数) 分别相卷积, 就相当于这两幅图像在人眼中的成像。利用这两幅卷积图像的误差图像(这里的误差图像指的是视觉上的误差, 而不是物理上的误差) 的统计特性作为评价半色调图像的一般方法(图 2、表 2)。

首先, 把此误差图像按照位置分为一系列子图像, 分别得到各自的期望值和标准偏差, 检查此误差图像是否为静态。根据实验, 发现绝大多数的误差图像都是静态噪声图像。其次, 根据中心极限定理, 无论怎样使用随机噪声进行扰动(如 Ulichney 加网算法), 其误差图像的概率分布都是正态分布(对于图像像素非常小的时候可能不成立)。假设连续调图像和其半色调图像完全相同时, 其误差图像的期望值和标准偏差都为 0。其中, 期望值表示半色调图像的整体灰度级相对原图的偏差, 反映其抗打印机扭曲的鲁棒性。而

标准偏差、最大值和最小值反映其半色调图像的质量。如果标准偏差、最大值和最小值较大, 说明

半色调图像与原图在视觉上相差较远; 反之值较小, 说明视觉质量较好。

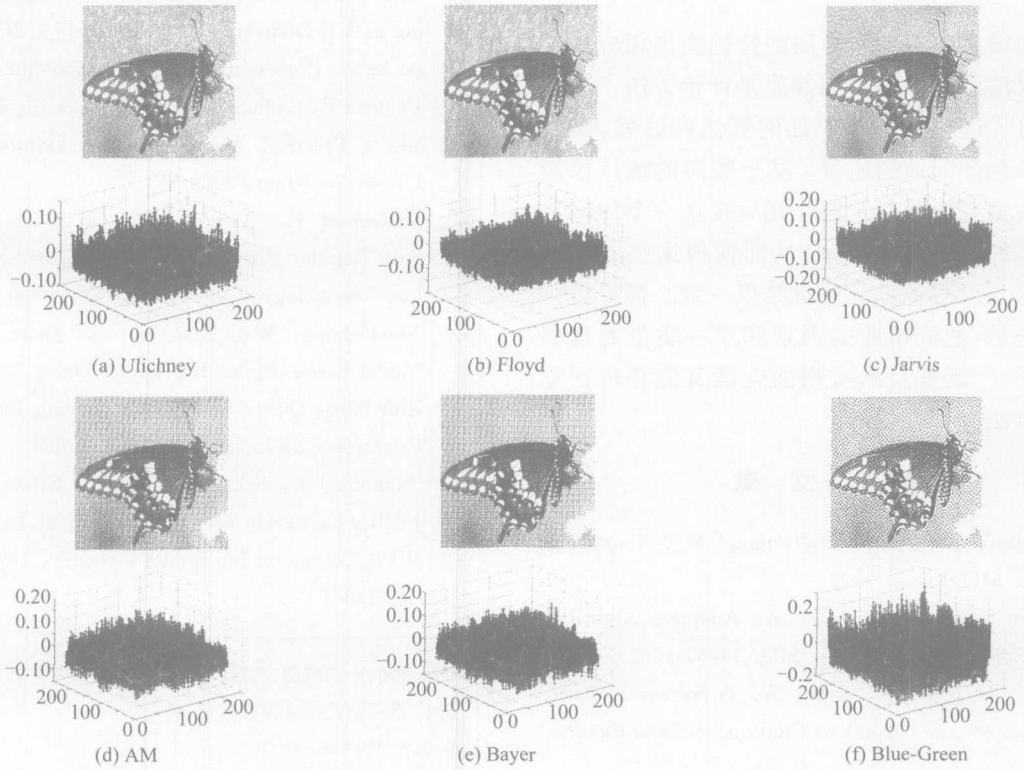


图 3 加网图像与原始连续调图像的误差图像的统计特性图

Fig. 3 Graphics of Statistical Feature of Residual Images Between Original Images and Corresponding Halftones

从图 3 和表 2 来看, 蓝绿噪声加网算法所产生的视觉误差图像具有相对较大的期望值, 在文献[7]中确实由实验得到证实具有很强的抗打印机的鲁棒性。而 Ulichney, Floyd-Steinberg 及 Jarvis 加网算法产生的视觉误差图像的期望值较小, 事实上, 它们抗打印机扭曲的性能较弱。从标准偏差、最大值和最小值来看, Ulichney 算法产生的视觉误差图像的值最小, 如果只从显示器上观察, 它的视觉质量最好。而调幅加网所得半色调图像的误差图像的期望值和标准偏差及最大值都相对较大, 说明在当前使用的加网线数下(本

文在相同分辨率下选用 53 dpi 加网线数), 半色调图像视觉质量较差。如果提高图像的分辨率和加网线数, 图像质量有所改善, 但是对于低分辨率的打印机来说, 质量提高有限。蓝绿噪声<sup>[7]</sup>(blue green noise) 加网算法所得的半色调图像的误差图像, 其期望值明显地大于误差扩散算法, 所以具有良好的抗打印机扭曲的性能。同时, 其加网图像没有周期变化的纹理, 但是由于增加了抗打印机扭曲性能, 使得标准偏差要大于误差扩散算法, 导致图像质量在某种程度上的下降, 但在视觉上是可以容忍的。

表 2 不同加网算法所得半色调图像与原始图像的的误差图像的统计特性

Tab. 2 Statistical Features of Residual Images Between Original Images and Corresponding Halftones by All Kinds of Halftoning Algorithms

统计特性	人眼最大空间频率: 60					
	Ulichney	Floyd-Steinberg	Jarvis	AM (diamond)	Blue-Green noise	Bayer (8-size mask)
期望值	0.002 023	0.001 931	0.006 071	0.001 638	0.010 999	0.001 040
标准偏差	0.002 269	0.002 918	0.004 472	0.004 628	0.004 387	0.004 356
最大值	0.120 770	0.108 740	0.178 700	0.175 320	0.288 130	0.169 770
最小值	-0.095 933	-0.101 100	-0.153 030	-0.136 540	-0.161 580	-0.149 800

## 2 结 语

本文根据各类加网算法的特性提出相应的各类加网算法和其半色调图像质量评价方法。与此同时,为了适应在不知道加网算法的时候,同样能检测半色调图像的质量,基于噪声的统计原理和人眼视觉系统的点扩散作用,建立一个加网算法适应性的质量评价方法,从而使得这些方法的评价结果与人眼视觉的评价结果一致。需要进一步研究的是,把抗扭曲的因素和单一质量因素整合,形成一个既能反映抗扭曲性能又能评价视觉质量的方法。

### 参 考 文 献

- [1] Ulichney R. Digital Halftoning [M]. Cambridge MA: MIT Press, 1987
- [2] Floyd R W, Steinberg L. An Adaptive Algorithm for Spatial Grayscale[J]. SID, 1976, 17(2): 75-77
- [3] Jarvis J, Judice C, Ninke W. A Survey of Techniques for the Display of Continuous Tone Pictures

- on Bilevel Displays[J]. Comp. Graph. and Image Proc., 1976(5): 13-40
- [4] Kite T D, Evans B L, Bovik A C. Digital Halftoning as 2-D Delta-sigma Modulation[J]. IEEE Conf. on Image Processing 1, 1997(1): 799-802
- [5] Baldock R, Graham J. Image Processing and Analysis: a Practical Approach [M]. Oxford: Oxford University Press, 2000
- [6] Schlaepfer K. Assessing Visual Noise Produced with Regular Screens Random Screens and Screenless Technology[C]. TAGA, NY, 1994
- [7] Xie Dehong, Wan Xiaoxiao, Xu Jinlin. A Novel Model-Based Digital Halftoning Using a Green and Blue Noise Dither Matrix[C]. Beijing International Conference on Imaging, Beijing, 2005
- [8] Mannos J L, Sakrison D J. The Effect of Visual Fidelity Criterion on the Encoding of Imaging [J]. IEEE Trans. on Information Theory, 1974, 20(4): 525-536

第一作者简介: 万晓霞, 教授, 博士生导师。研究方向为颜色科学与技术、数字资产管理信息方法。

E-mail: wan@whu.ed.cn

## Quality Evaluation of Halftone by Halftoning Algorithm-Based Adaptive Method

WAN Xiaoxia<sup>1</sup> XIE Dehong<sup>1</sup> XU Jinlin<sup>1</sup>

(1 Department of Printing and Packaging, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

**Abstract:** In order to evaluate the halftoning algorithms and the corresponding halftones, a criterion is necessary. A series of halftoning algorithm-based methods are proposed, which adapt to the special properties of halftoning algorithms. An adaptive method is proposed to evaluate the halftoning algorithms and the corresponding halftones, which is based on the statistical features of the residual image between the original image and the corresponding halftone on the retinal of human eye.

**Key words:** halftoning algorithm; halftone; quality evaluation

**About the first author:** WAN Xiaoxia, Ph D supervisor, professor, majors in color science and color technology, digital asset management. Main achievements include accurate inkjet printer six-primary color reproduction model based on multi-spectral estimation, et al.  
E-mail: wan@whu.ed.cn