

一种改进误差扩散系数的半色调算法

王晓红¹, 刘丽丽¹, 肖颖², 麻祥才², 丁桂芝³, 章婷³

(1.上海理工大学, 上海 200093; 2.上海出版印刷高等专科学校, 上海 200093;

3.上海市印刷行业协会, 上海 200093)

摘要: **目的** 为了解决现有半色调算法产生的半色调图像边界模糊以及视觉蠕虫等问题, 获得一种人眼视觉感知较好的数字半色调图像。**方法** 在原始经典滤波器的基础上引入 α -截尾均值滤波器, 得到一种新的基于邻域像素灰度值相关的误差扩散滤波器。**结果** 所提算法相较于传统误差扩散算法能更好地再现半色调图像细节, 同时其边界也得到了较好的保持, 并且客观评价参数 PSNR 值、SSIM 值均有一定幅度的提高, NSME 值也得到了较为理想的结果, 不仅解决了传统误差扩散算法中边界模糊现象, 同时也更好地表达了半色调图像的细节纹理信息。**结论** 依据提出的算法得到的半色调图像人眼视觉感知效果较好, 并且算法简单易行效率高。

关键词: 半色调; 边界区域; 双边滤波; 误差扩散

中图分类号: TS206 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2018)01-0179-05

A Halftone Algorithm Improving the Error Diffusion Coefficient

WANG Xiao-hong¹, LIU Li-li¹, XIAO Ying², MA Xiang-cai², DING Gui-zhi³, ZHANG Ting³

(1.University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2.Shanghai Publishing and Printing College, Shanghai 200093, China; 3.Shanghai Printing Trade Association, Shanghai 200093, China)

ABSTRACT: The work aims to solve the problem of image boundary blurring and visual worms generated by the existing halftone algorithm and get a better digital halftone image of visual perception. The α -truncated average filter was introduced based on the original classic filter and a new error diffusion filter considering the distance and the grey value similarity between pixels. Compared to the traditional error diffusion algorithm, the proposed algorithm reproduced the halftone image details in a better way and its boundary was also well maintained. Moreover, the PSNR and SSIM values of objective evaluation parameter were increased in some way, and the NSME value also got an ideal result, which not only solved the fuzzy boundary of traditional error diffusion algorithm, but also better expressed the detailed information on texture of the halftone images. The halftone image generated by the proposed algorithm has a better visual effect and the algorithm is simple and effective.

KEY WORDS: halftone; boundary region; bilateral filter; error diffusion

数字半色调技术是为了实现连续调图像能够在印刷二值设备上输出, 并达到视觉连续性效果的一种技术。这种视觉连续调效果越逼真就越表明这种半色调技术越优越^[1]。自 Floyd-Stein 提出基于邻域处理的误差扩散算法以来^[2-3], 数字半色调技术得到了突飞猛进的发展, 随后一些学者在此基础上提出很多改进

的数字半色调算法, 主要针对误差扩散系数的改进、扫描路径的改进以及阈值的改进等。1991 年 Knox^[4]针对传统误差扩散算法中得到的半色调图像边界模糊等弊端, 提出一种将当前像素灰度值的若干倍加到未处理的连续调图像上的方法。2001 年 Ostromoukhov^[5]针对传统误差扩散算法中由有限的固定

收稿日期: 2017-02-20

基金项目: “柔版印刷绿色制版与标准化实验室” 招标课题 (ZBKT201709)

作者简介: 王晓红 (1971—), 女, 上海理工大学教授、硕导, 主要研究方向为数字图像处理、印刷质量在现、数字水印、色彩管理与再现。

误差扩散系数带来的结构性纹理等弊端,提出了一种对图像像素的不同灰度级分配不同的误差扩散系数的半色调算法。2006年叶玉芬等^[6]对点扩散算法进行了改进并将HVS模型结合进来,最终取得了不错的效果。2012年Zifen He和Zhaolin Zhan^[7]提出了一种基于K-means分区聚类的数字半色调算法,随着分区数量的增加得到的半色调图像效果较好,但是随之算法的时间开销也增加。2015年Jan-Ray Liao^[8]提出了一种新的基于直接二值搜索的半色调算法,研究发现传统的直接二值搜索算法中的误差滤波器是收敛的,并发现了收敛范围大小规律,但是算法运行效率问题仍没有得到很好的解决。虽然目前已经提出了很多数字半色调技术,但至今都没有很好的兼顾数字半色调图像边界模糊、结构性纹理与运算效率的问题。

文中借鉴双边滤波器设定的原理,不仅考虑了邻域像素之间的距离相关性,同时也考虑了邻域像素之间的灰度相似性,拟在原始经典滤波器的基础上引入 α -截尾均值滤波器,实现了根据邻域像素灰度值相关性自适应调整误差扩散系数的目标。

1 传统误差扩散系数核的设定

误差扩散系数核的设定是误差扩散算法的核心所在,传统的误差扩散算法大部分使用时序滤波器分配误差扩散系数,然而事实上像素与像素之间的关系并不都是时序相关,这种固定的误差扩散系数分配导致误差在同一个方向不断累积,形成视觉上的蠕虫以及结构性纹理等现象。继Floyd-Steinberg误差扩散系数之后,相关学者又提出了一些经典的误差分配原则,如Stucki, Burkers, Jarvis和Sierra滤波器^[9]。

这些滤波器都在一定程度上增大误差分配的区域,但总是避免不了由固定的误差扩散系数累积带来的滞后性纹理以及边界模糊现象。另有学者提出对固定扩散系数进行小范围抖动,包括扩散系数的大小以及位置抖动^[10],也有学者根据图像的阶调信息把图像划分为不同的区域,在不同区域使用不同的半色调算法^[11],但这些算法都是小幅度地调高了半色调图像视觉效果,并没有从根本上解决目前半色调图像存在的问题。文中选取数字图像处理中3幅经典图像(256×256像素)进行仿真实验,并给出Lena图在使用不同误差扩散系数核时在Matlab中的实验仿真结果见图1。

使用不同的误差扩散系数核进行半色调处理得到的半色调图像视觉效果差别较大,从图1可以看出使用Floyd-Steinberg误差扩散系数得到的半色调图像纹理较为细腻,但是半色调图像中存在较多的视觉蠕虫现象,特别是在中间调区域这种块状蠕虫效应更是明显。使用Stenenson, Stucki, Buckers以及Jarvis

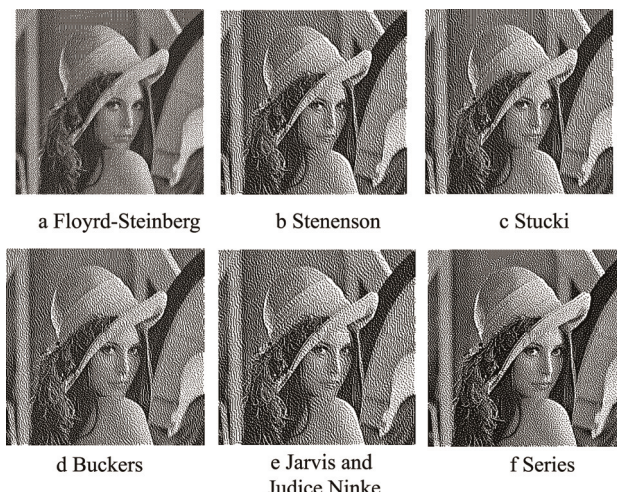


图1 使用不同误差扩散系数核的半色调图像

Fig.1 Halftone image using different error diffusion coefficient kernels

and Judice Ninke滤波器得到的半色调图像对比度较为清晰,但是得到的半色调图像存在较为严重的结构性纹理效应,并且较大的误差扩散范围也在一定程度上影响了算法的运行效率。使用Sierra滤波器得到的半色调图像视觉效果相对较好,纹理较为细腻,且灰度过渡也较为连续,是一种较为优良的误差扩散系数核。

2 一种新的误差扩散系数核设定

2.1 双边滤波原理

双边滤波是一种将高斯滤波与邻域滤波相结合的图像处理方法,它的优势在于将中心像素与其邻域像素之间的几何距离关系以及两者灰度值的相似程度同时考虑进来^[12-13]。设 $U(x)$ 为原始图像, $U_{BF}(x)$ 为输出图像, $X=(X_1, X_2)$ 是当前点的位置, $\Omega_{x,y}(N)=\{(x,y)+(i,j); -N \leq i, j \leq N\}$ 表示以点 X 为邻域中心 N 为邻域半径的取值范围。那么双边滤波的定义表达式为:

$$u_{BF}(x) = \frac{1}{C_{d,r}} \sum_{y \in \Omega} w_d(x,y) w_r(x,y) u(y) \quad (1)$$

$$\text{式中: } w_d(x,y) = \exp\left(-\frac{|x-y|^2}{2\sigma_d^2}\right); w_r(x,y) = \exp\left(-\frac{|u(x)-u(y)|^2}{2\sigma_r^2}\right);$$

$C_{d,r}(x,y) = \sum_{y \in \Omega} w_d(x,y) w_r(x,y)$; $W_d(x,y)$ 与 $W_r(x,y)$ 为双边滤波的权重函数,其中几何邻近度函数 $W_d(x,y)$ 度量了邻域中心像素点 X 与相邻像素点 Y 的几何邻近度,为高斯滤波器。像素亮度相似度函数 $W_r(x,y)$ 度量了两者之间的光度相似性,是 α -截尾均值滤波器。 $C_{d,r}$ 为归一化系数; σ_d 为空间距离权重系数参数,其值决定图像的平滑程度, σ_d 值较大时表示窗口中高斯函数所包含的像素点越多,图像将变得更加平滑,反之亦然。迄今为止,

对于 σ_d 和 σ_r 的取值仍没有最优化的理论支撑，文中借鉴传统参数设置的方法，通过不断调整参数的大小直至获得最优的图像质量评价参数，此时的参数大小即是符合该处理图像的最优参数。

2.2 基于邻域像素灰度相关的误差扩散系数核设定

文中考虑到传统误差扩散系数的设定一般只是考虑到人眼低通滤波的特性，根据图像像素点之间距离的大小进行误差扩散系数的设定，忽略了相邻像素值之间的大小关系，也没考虑图像边界信息等因素，导致得到的半色调图像存在结构性纹理、视觉蠕虫以及边界模糊等弊端。基于此，文中借鉴双边滤波系数设定的原则，不仅考虑到像素之间距离相关性也考虑到像素之间灰度相关性，提出了一种新的基于像素之间距离以及灰度相关的误差扩散系数核 w ，由系数核 a 与系数核 b 组成。

文中系数核 a 取经典 F_S 误差扩散滤波器，对应与双边滤波器中的高斯滤波核，在整个半色调处理过程中是固定的值。系数核 b 由 α -截尾均值滤波器产生，每处理一个像素就产生一次，值的大小与邻域像素之间的灰度差值有关，在图像灰度平滑区域邻域像素之间的灰度值变化不大， α -截尾均值滤波器取值接近于 1，对原始经典滤波器起到微调作用，减少了由于误差朝固定方向固定位置累积造成的视觉蠕虫现象。在图像的边界区域，像素之间灰度差别较大，此时 α -截尾均值滤波器系数偏离 1 的程度变大，由 $w=ab$ 可知此时系数核 b 对系数核 a 的影响也较为显著，从而减少了前端误差累积值对边界区域像素的影响，达到了在半色调过程中保持图像边界的目的。具体步骤如下所述。

- 1) 选取原始经典误差扩散滤波器系数记为 a ，对应与双边滤波器中由高斯滤波器生成的基于像素之间空间距离的系数核。
- 2) 由 α -截尾均值滤波器生成由像素之间差值决定的系数核 b ，取值范围为 $[0, 1]$ 。
- 3) 结合系数核 a 与系数核 b 生成一种基于邻域像素之间空间距离与灰度相关性相结合的误差扩散系数核 $w=ab$ 。
- 4) 利用新的误差扩散系数核 w 对连续调图像进行半色调处理。

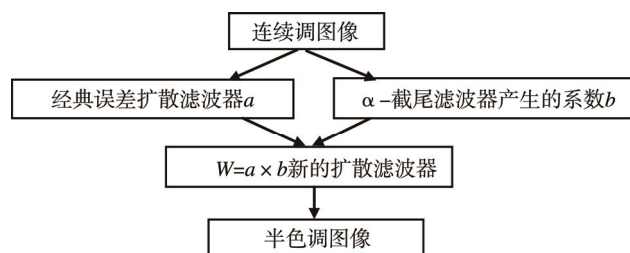


图 2 文中算法原理

Fig.2 Principle of proposed algorithm

3 实验

3.1 实验结果

选取数字图像处理中 3 幅经典图像 (256×256 像素) 进行仿真实验，并给出 Lena 图在 Matlab 中的实验仿真结果。

对 Lena 图分别采用了基于传统的 Floyd-Steinberg 误差分散算法、Ostromoukhov 快速误差扩散算法、自适应快速误差算法、Knox 算法、叶玉芬算法以及文中算法进行误差扩散的结果见图 3。在图 3a, d, f 中，Knox 算法只是在 F_S 算法的基础上对图像的边界部分进行改进，其他区域保持原样，所以图 3d 只对图 3a 中的区域 2 边界部分进行了改进，区域 1 中视觉效果一样，文中算法将 α -截尾均值滤波器引入到 F_S 滤波器中，在图像的非边界区域对 F_S 滤波器进行微调，改善了半色调图像中存在的视觉蠕虫效应，在图 3f 区域 1 中得到了验证。在图像的边界部分对 F_S 滤波器进行了较大程度的调整，减少了误差累积对边界部分的影响，从而保持了图像的边界部分，在图 3f 区域 2 中得到了验证。算法 3c 中在图像的边界部分与其他区域自适应进行半色调处理，虽然也保持了图像的边界效果，但是图像边界部分过渡不平滑，造成锯齿效应，见图 3c 中区域 3。使用快速误差算法得到的半色调图像较为精细，但是图像整体对比度不好。叶玉芬算法得到的半色调图像视觉效果较好，但是算法复杂度较高，参数设置存在一定的难度。

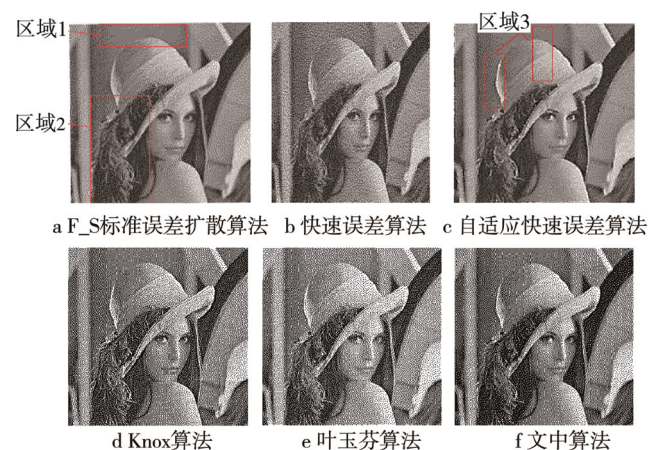


图 3 实验仿真结果

Fig.3 Experimental simulation results

这里选择 3 种客观评价参数，将文中算法与传统 F_S 误差扩散算法和 Knox 算法产生的半色调图像进行比较，其中 F_S 误差扩散算法是较为经典的算法，是与其他算法比较的基础，Knox 算法着重对图像边界区域进行改进，与文中算法的改进侧重点相似，是与文中算法进行对比的经典算法，客观评价结果见表 1。

表1 客观评价结果
Tab.1 Objective evaluation results

算法	Lena 图			Barbara 图			Boat 图		
	PSNR	SSIM	NMSE	PSNR	SSIM	NMSE	PSNR	SSIM	NMSE
F_S 误差扩散	6.7532	0.0635	0.7818	7.1564	0.1185	0.7472	6.7558	0.0871	0.7221
Knox	6.8562	0.0822	0.7635	7.3588	0.1520	0.7132	6.8988	0.1143	0.6987
文中	7.1094	0.0921	0.7558	7.4433	0.1477	0.7038	6.9043	0.0971	0.7019

3.2 实验结果评价

由于半色调图像为二值图像,所以对其进行质量评价之前先通过人类视觉模型(HVS模型)将半色调图像转化为视觉上的连续调图像,然后对其进行质量评价。文中选取二维高斯低通滤波器代替人类视觉模型。

文中选用归一化均方误差(NMSE)、峰值信噪比(PSNR)、结构相似度(SSIM)3个指标作为评价半色调图像质量的依据^[14-16]。其中PSNR与NMSE均能从整体上反映图像的统计特性,但其结果易受差异较大的像素点影响。其中PSNR值大小与半色调图像的质量成正比,NMSE值则相反。SSIM则结合了图像的亮度,图像的对比度以及图像的相关性3个方面的特性来反映图像的质量特性,得到的SSIM值越接近1,说明半色调图像与原始图像越相似,因此文中选取这3种指标进行半色调的图像质量评价。

从表1的客观统计数据可以看出,通过文中算法得到的半色调图像效果较好,比传统的经典算法产生的半色调图像效果好,且文中算法简单易行效率高,是一种优良的半色调图像处理算法。

4 结语

对比分析了当前数字半色调技术领域的各种算法特点,并针对传统误差扩散算法存在的一些问题如蠕虫效应、结构性纹理以及边界模糊等,提出了一种新的基于像素之间距离与像素之间灰度值相似性相结合的新型误差扩散滤波器。通过在原始经典滤波器的基础上引入 α -截尾均值滤波器,实现了对原始经典滤波器的固定扩散方向与固定大小进行调整的目的,特别是在图像灰度值变化剧烈的边界区域,此时 α -截尾均值滤波器的值偏离1的程度较大,对经典滤波器的影响也较为显著,从而减少了前端误差累积对边界区域像素值的影响,实现了在半色调过程中保持图像边界的目的。通过客观评价结果证实文中提出的算法可以得到视觉效果较好的数字半色调图像,文中算法是一种较好的数字半色调算法。

参考文献:

- [1] 曹瑞春,江新忠.关于数字加网方法的研究[J].今日印刷,2014(6):61—64.
- [2] CAO Rui-chun,JIANG Xin-zhong.The Research on Digital Halftone[J].Print Today,2014(6):61—64.
- [3] 姚海根.数字半色调技术发展简史[J].广东印刷,2000,21(9):39—41.
- [4] YAO Hai-gen.The Development of the Halftone[J].Guangdong Printing,2000,21(9):39—41.
- [5] FLOYD R W.An Adaptive Algorithm for Spatial Grayscale[J].Proc Soc Inf Disp,1976,17:75—77.
- [6] ESCHBACH R,KNOX K T.Error-diffusion Algorithm with Edge Enhancement[J].Journal of the Optical Society of America A,1991,8(12):1844—1850.
- [7] OSTROMOUKHOV V.A Simple and Efficient Error-Diffusion Algorithm[C]//Annual Conference on Computer Graphics,2001:567—572.
- [8] 叶玉芬,郭宝龙.数字半色调技术中的误差扩散算法研究[D].西安:西安电子科技大学,2006.
- [9] YE Yu-fen,GUO Bao-long.Research on Error Diffusion Algorithm in Digital Halftone Technique[D].Xi'an:Xi'an University of Electronic Science and Technology,2006.
- [10] HE Z F,ZHANG Y,ZHAN Z L.Digital Halftoning Based on K-means Clustering[C]//Industrial Electronics and Applications,2012:432—436.
- [11] LIAO J R.Theoretical Bounds of Direct Binary Search Halftoning[J].IEEE Transactions on Image Processing A Publication of the IEEE Signal Processing Society,2015,24(11):3478—3487.
- [12] 梁永峰.一种改进的误差扩散算法[D].西安:西安电子科技大学,2013.
- [13] LIANG Yong-feng.An Improved Error Diffusion Algorithm[D].Xi'an:Xi'an University of Electronic Science and Technology,2013.
- [14] 孙娜.数字印刷阶调处理系统研究[D].北京:华北电力大学,2010.
- [15] SUN Na.Research on digital printing order processing system[D].Beijing:North China Electric Power University,2013.

- [11] 周啸, 史瑞芝, 李少梅. 一种基于阶调划分的网点重组型复合半色调算法[J]. 包装工程, 2015, 36(13): 104—110.
ZHOU Xiao, SHI Rui-zhi, LI Shao-mei. Dot-recombined Hybrid Halftoning Algorithm Based on Tone Division[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(13): 104—110.
- [12] 王玉灵. 基于双边滤波的图像处理算法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010.
WANG Yu-ling. Image Processing Algorithms Based on Bilateral Filtering[D]. Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and Technology, 2010.
- [13] CHAUDHURY K N, DABHADE S D. Fast and Provably Accurate Bilateral Filtering[J]. IEEE Transactions on Image Processing A Publication of the IEEE Signal Processing Society, 2016, 25(6): 2519.
- [14] 宋鹏程. 基于 HVS 的点扩散算法和图像质量评价算法的研究[D]. 开封: 河南大学, 2012.
SONG Peng-cheng. Point Spread Algorithm Based on HVS and the Research of Image Quality Assessment Algorithm[D]. Kaifeng: Henan University, 2012.
- [15] ZHANG H B. Quality Evaluation of Halftone Based on Visual Perception Similarity[J]. Journal of Computer Applications, 2011, 31(10): 2750—2752.
- [16] 陈丽娜. 基于质量相关因素的半色调图像质量评价的研究[D]. 上海: 上海理工大学, 2013.
CHEN Li-na. Halftone Image Assessment Based on Quality-concerned Factors[D]. Shanghai: University of Shanghai for Science and Technology, 2013.