

一种基于动态误差扩散系数的数字半色调算法

王晓红^{1,3}, 刘丽丽¹, 陈豪¹, 肖颖^{2,3}

(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.国家新闻出版广电总局新闻出版业科技与标准重点实验室)

摘要: **目的** 为了解决现有半色调算法产生的图像边界模糊以及视觉蠕虫等问题, 研究一种视觉效果较好的半色调图像。 **方法** 提出一种在半色调过程中动态分配误差扩散系数的数字半色调方法, 减少由固定误差扩散系数和固定扩散方向带来的边界模糊、视觉蠕虫以及结构性纹理等现象。 **结果** 文中提出的算法相较于传统的误差扩散算法其 PSNR 值提高了约 0.5, SSIM 值提高了约 0.06, NSME 值下降了约 0.06。不仅解决了传统误差扩散算法中的边界模糊现象, 同时也更好地表达了半色调图像的细节纹理信息。 **结论** 依据提出的算法产生的半色调图像视觉效果较好, 并且算法简单易行, 运行效率高。

关键词: 半色调; 质量评价; 动态误差扩散系数

中图分类号: TS805.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2017)13-0199-05

A Digital Halftone Algorithm Based on the Dynamic Error Diffusion Coefficient

WANG Xiao-hong^{1,3}, LIU Li-li¹, CHEN Hao¹, XIAO Ying^{2,3}

(1.University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2.Shanghai Publishing and Printing College, Shanghai 200093, China; 3.State Administration of Press, Publication, Radio, Film and Television the Press and Publication Industry Technology and the Key Laboratory of Standardization, Shanghai 200093, China)

ABSTRACT: The work aims to study a halftone image with better visual effect to solve such problems as fuzzy image boundary and visual worm generated in the existing halftone algorithm. A digital halftone method for dynamic distribution of error diffusion coefficients in the halftone process was proposed to reduce such phenomena as fuzzy boundary, visual worm and structural texture brought by fixed error diffusion coefficients and fixed diffusion direction. Compared to the traditional error diffusion algorithm, PSNR value of the proposed method was improved by about 0.5, SSIM value improved by about 0.06 and NSME value reduced by about 0.06. In such case, not only the fuzzy boundary in the traditional error diffusion algorithm was solved, but also the information on detailed texture of halftone image was better expressed. The visual effect of the halftone image generated based on the proposed algorithm is good, and the algorithm is simple and easy and of high running efficiency.

KEY WORDS: halftone; quality evaluation; dynamic error diffusion coefficient

数字半色调技术是为了将连续调图像在二值印刷设备上输出并实现视觉连续调效果的一种技术。这种视觉上的连续调效果是基于人类视觉低通特性, 当印刷的网点足够小足够密, 印刷稿离人眼距离足够大时即可实现视觉连续性效果^[1-5]。

1976 年 Floyd 提出了一种基于邻域处理的误差扩散算法, 正式开启了数字半色调技术的里程碑。误差扩散算法不同于以往的点处理算法, 它不仅考虑到了当前待处理的像素, 并把半色调过程中每个像素点

量化后产生的误差按照一定的规则分配到与其相邻的未被访问的像素点, 实验结果表明通过这种邻域处理方法得到的半色调图像能够更好地还原连续调图像的细节信息, 总体来说, 得到的半色调图像视觉效果较好, 但得到的半色调图像仍然存在结构性纹理、视觉蠕虫以及边界模糊等弊端^[6]。之后一些学者在误差扩散算法的基础上提出了很多改进的算法, 如 Ostromoukhov.V 对误差分配系数进行了改进, 通过对图像像素的不同灰度级分配不同的误差扩散系数来

收稿日期: 2016-11-02

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。

改进传统误差扩散过程中由有限的固定误差扩散系数带来的结构性纹理等弊端^[7]。Knox 通过将当前像素的若干倍加到处理前的图像上实现了图像边界的增强^[8]。接着 Hwang 与 Kwak 对 Knox 的算法进行了改进^[9-10]等。虽然目前数字半色调技术已经较为成熟,但是仍然存在一些难以解决的问题,比如视觉蠕虫效应、龟纹现象以及边界模糊等弊端,这些都制约着该技术的发展,如何通过更好的算法实现视觉效果更好的数字半色调图像成为目前急需解决的问题。为了解决由固定误差扩散系数以及固定扩散方向产生的视觉蠕虫以及纹理效应,文中通过比较当前待处理像素的灰度值与其邻域像素灰度值之间的关系动态分配误差扩散系数,以此产生半色调图像。

1 Floyd-Steinberg 误差扩散算法

1.1 基本原理

Floyd-Steinberg 误差扩散算法作为最经典的半色调算法之一,开启了数字半色调技术的里程碑。误差扩散的思想是首先将当前待处理的像素值与阈值进行比较,从而实现该点的二值化,然后将该点像素灰度值的变化误差按照一定的规则分配到邻域像素,它的基本原理是误差向后向下扩散。算法误差扩散系数核和原理公式见式(1)~(3),该算法对应的原理见图1。

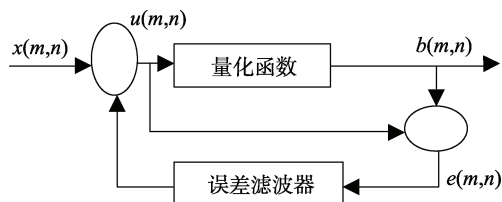


图1 Floyd-Steinberg 算法原理
Fig.1 Floyd-Steinberg algorithm principle

$$h(k,l) = \frac{1}{16} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 7 \\ 3 & 5 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$u(m,n) = x(m,n) - \sum_{k,l} h(k,l) \times e(m,n) \quad (2)$$

$$b(m,n) = Q(u(m,n)) = \begin{cases} 1, & \text{若 } u(m,n) > \text{阈值}, e(m,n) = b(m,n) - u(m,n) \\ 0, & e(m,n) = u(m,n) \end{cases} \quad (3)$$

式中: x 为归一化后的输入图像; $x(m,n)$ 为当前待处理的像素点; $Q()$ 为阈值量化准则; $u(m,n)$ 为当前像素本身灰度值与从其他像素误差扩散来的灰度值之和,当 $u(m,n)$ 大于设定的阈值时, $Q()$ 值为1,若 $u(m,n)$ 小于阈值, $Q()$ 值则为0。对 $u(m,n)$ 进行阈值处理后得到 $b(m,n)$, $b(m,n)$ 为最终处理后得到的半色调图像其值为0或者1。 $e(m,n)$ 为阈值处理后该点的量化误差。 H 为误差扩散滤波器,为保证连续调图像在半色调过程中整体灰度值不损失,规定滤波器系

数之和为1。

1.2 误差扩散系数的设定

误差扩散系数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^[11]。

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 滤波器、Burkers 滤波器、Jarvis 滤波器、Sierra 滤波器等,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。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^[12]。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^[13],但都不能达到较好的半色调图像效果。

2 基于动态误差扩散系数的数字半色调算法

2.1 文中算法原理

在传统的误差扩散算法中,其误差扩散系数设定的大小以及误差扩散的方向都是固定的,只考虑到邻域像素之间的位置相关性,忽略了灰度相关性,导致产生的半色调图像对比度较差并且带有严重的滞后性纹理等弊端。基于此,文中在分配 Floyd-Steinberg 误差扩散系数的时候考虑到邻域像素之间的灰度相关性,通过计算并比较邻域像素自身灰度值与邻域像素均值之间的误差绝对值大小,动态分配 Floyd-Steinberg 误差扩散系数。若图像中某一点处像素值与其邻域像素差值较大说明该点在邻域中较为突出,是图像中的角点,为了保持图像的整体对比度,此处的像素值不易分配过大的误差扩散系数,反之亦然。文中提出的误差扩散系数不仅考虑到像素与像素之间的位置相关性也考虑到了像素与像素之间的灰度相关性,不仅改善了半色调图像的对比度也改善了半色调图像的滞后性纹理等弊端。文中算法流程见图2。具体算法实施过程如下所述。

1) 计算一幅图像的均值矩阵。一幅图像由无数的像素点组成,像素与像素之间并不是孤立存在的,而是相互影响、相互制约。按照误差扩散原理,在图像的半色调过程中,待处理的当前像素的误差值会按照一定的规则与方向被分配到了其邻域像素中。为了更好地理解当前像素值与其邻域像素值之间的关系,遍历整幅图像计算每个像素三邻域(3×3=9个像素点)像素点的平均灰度值,并将其三邻域的灰度值代替自身的灰度值,存为矩阵 A_i 。

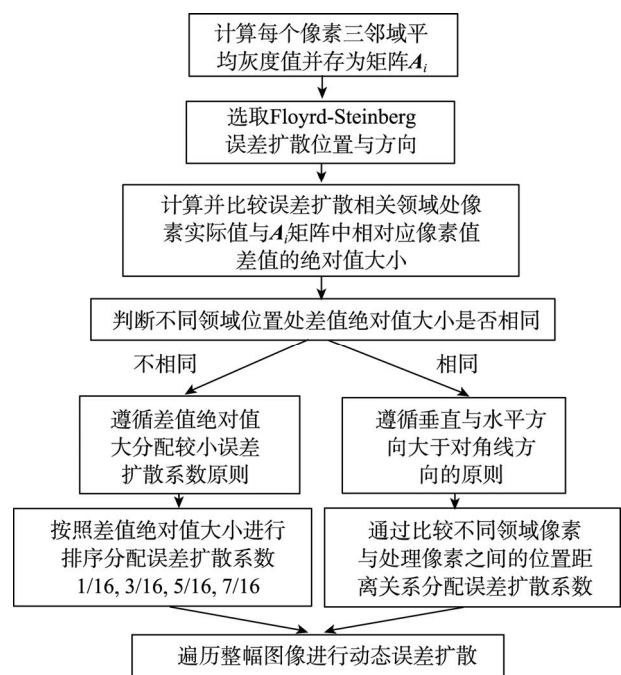


图 2 文中算法原理
Fig.2 Algorithm principle in this paper

2) 动态分配 Floyd-Steinberg 误差扩散系数 (7/16, 5/16, 3/16, 1/16)。记当前待处理像素点为像素点 0, 选取 Floyd-Steinberg 误差扩散的方向与位置 (记为像素点右 1、下 1、左下 1 与右下 1) 对像素点 0 半色调化后的误差进行扩散, 通过计算并比较 4 个像素点处(右 1、下 1、左下 1 与右下 1) 实际灰度值与均值矩阵中其对应位置像素值的差值绝对值大小, 确定不同像素位置处的误差扩散系数。当差值绝对值较大时, 说明该位置处的像素与其邻域像素之间的差别较大, 是图像中较为突出的像素点, 所以在半色调处理的过程中应该最大程度地保持该点的原始像素值, 以保证图像的整体对比度。此时该位置处的像素应分配较小的误差扩散系数核, 以减少其他位置处的像素值对该像素值的影响, 此处应分配 1/16。若在半色调的过程中出现不同位置处的像素值与其对应均值矩阵中的像素值差值绝对值大小相同时, 应考虑不同的邻域像素与待处理像素之间的位置远近关系, 根据垂直方向大于对角线方向的规律, 遵循误差扩散系数右 1>下 1>左 1>右 1 的原则动态分配 Floyd-Steinberg 误差扩散系数。根据差值绝对值大小以及像素之间的相关性对 4 个位置处的像素动态分配误差扩散系数 7/16, 5/16, 3/16, 1/16。

3) 按从左往右从上而下的顺序遍历像素进行处理, 得到最终的半色调图像。

2.2 算法实验结果

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 Matlab

中的实验仿真结果见图 3。



图 3 实验仿真结果
Fig.3 Experimental simulation results

3 实验结果评价

文中对 3 幅经典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 算法以及文中算法进行误差扩散, 并通过主观评价以及 3 种客观评价参数对其进行质量评价。

3.1 主观评价

选择 10 名视觉感知正常的观察者 (5 男 5 女) 对不同算法得到的半色调图像进行主观打分。规定最低分为 0 最高分为 10, 打分标准包括半色调图像的边界还原能力、细节再现能力以及半色调图像的整体视觉感知。具体评分见表 1。

表 1 主观评价结果
Tab.1 Subjective evaluation criteria

算法	Lena 图	Barbara 图	Boat 图
F_S 标准误差扩散算法	6.2	6.4	7.0
快速误差算法	7.5	7	7.3
自适应快速误差算法	8.0	7.4	8.1
Knox 算法	8.4	7.7	8.3
文中算法	8.8	8.5	9.0

通过文中算法得到的半色调图像也存在部分结构性纹理但是得到的图像边界较为清晰,图像整体视觉效果较好。由于人眼对图像的亮度以及整体对比度较为敏感,所以通过文中算法得到的半色调图像主观得分较高,最符合人眼视觉特性。

3.2 客观评价

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。

目前存在的半色调图像质量评价指标主要有归一化均方误差(NMSE),峰值信噪比(PSNR),结构相似度(SSIM)等^[14-15],其中PSNR与NMSE作为图像质量评价的常见指标均能从整体上反映图像的统计特性,但客观评价结果易受差异较大的像素点影响。PSNR值越大越能说明待比较的2幅图像相似度越高,NMSE值则相反。SSIM结合了图像的亮度、对比度、相关性3个方面的特性来反映图像之间的客观指标。评价结果越接近1说明半色调图像与原始图像的差异越小,所以文中选取这3种指标进行半色调的图像质量评价。归一化均方误差评价法(NMSE):

$$NMSE = \frac{\sum_M \sum_N (f(m,n) - b(m,n))^2}{\sum_M \sum_N (f(m,n))^2} \quad (4)$$

峰值信噪比评价法(PSNR):

$$PSNR = 10 \log_{10} \frac{255^2 \times M \times N}{\sum_M \sum_N (f(m,n) - b(m,n))^2} \quad (5)$$

式中: $f(m,n)$ 代表原始连续调图像; $b(m,n)$ 代表半色调图像,图像的大小为 $M \times N$ 。

结构相似度法(NSSIM):

$$l(x,y) = \frac{2\mu_x\mu_y + C_1}{\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_2}, \quad (6)$$

$$\mu_x = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i, \mu_y = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i$$

$$c(x,y) = \frac{2\sigma_x\sigma_y + C_2}{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2},$$

$$\sigma_x = \left(\left(\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N x_i - \mu_x \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

$$s(x,y) = \frac{\sigma_{xy} + C_3}{\sigma_x\sigma_y + C_3}, \sigma_{xy} = \left(\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu_x)(y_i - \mu_y) \right) \quad (8)$$

$$SSIM(x,y) = [l(x,y)]^\alpha [c(x,y)]^\beta [s(x,y)]^\gamma \quad (9)$$

$$SSIM(x,y) = \frac{(2\mu_x\mu_y + C_1)(2\sigma_{xy} + C_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2)} \quad (10)$$

$$NSSIM(X,Y) = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M SSIM(x_j, y_j) \quad (11)$$

式中: $l(x,y)$, $c(x,y)$ 与 $s(x,y)$ 分别为亮度函数、对比度函数以及相关性函数。为了防止分母出现0的情况,引入 C_1, C_2, C_3 等3个参数,一般情况下其值都为0; α, β, γ 为权重参数,并且一般情况下设其值为1。

文中利用3个客观评价参数对得到的半色调图像进行质量评价结果见表2。

客观评价通过给出客观数据反映原始图像和半色调图像的差别。从表2的3种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最好。结合主观评价结果可以得出结论,文中算法得到的半色调图像较传统的经典算法产生的半色调图像效果好,并且文中提出的算法简单易行效率高,是一种优良的半色调图像处理算法。

表2 客观评价结果
Tab.2 Objective evaluation criteria

算法	Lena 图			Barbara 图			Boat 图		
	PSNR	NSSIM	NMSE	PSNR	NSSIM	NMSE	PSNR	NSSIM	NMSE
F_S 标准误差扩散算法	6.7532	0.0635	0.7818	7.1564	0.1185	0.7472	6.7558	0.0871	0.7221
快速误差算法	6.7252	0.0569	0.7869	7.0622	0.1008	0.7636	6.7378	0.0835	0.7251
自适应快速误差算法	6.7999	0.0697	0.7735	7.2070	0.1254	0.7385	6.7918	0.0923	0.7162
Knox 算法	6.8562	0.0822	0.7635	7.3588	0.1520	0.7132	6.8988	0.1143	0.6987
文中算法	7.0573	0.1158	0.7290	7.6355	0.1912	0.6691	7.1631	0.1603	0.6575

4 结语

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边界模糊、蠕虫

效应以及结构性纹理等问题,提出了一种新的基于动态误差扩散系数的数字半色调算法。该方法根据邻域像素之间的灰度值关系动态地选择误差分散系数,通过这种方法能较大程度地减少传统误差方法由于固

定的分散系数而产生的边界模糊、视觉蠕虫以及结构性纹理效应,从而良好地再现图像的细节信息。通过 Matlab 实验仿真证明文中提出的算法可得到视觉效果较好的数字半色调图像,并且文中算法简单易行,效率高,可以很好地应用于印刷实践中。

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.
CAO Rui-chun, JIANG Xin-zhong. The Research on Digital Halftone[J]. Print Today, 2014(6): 61—64.
- [2] 李畅. 基于图像特征匹配的新型加网方法及算法研究[D]. 北京: 北京印刷学院, 2016.
LI Chang. Research on a New Algorithm Based on Image Feature Matching[D]. Beijing: Beijing Institute of Graphic Communication, 2016.
- [3] PANDA N R, SAHOO A K, KUMAR S. A Negative Multiscale Error Diffusion Technique for Digital Halftoning[C]// International Conference on Pervasive Computing, IEEE, 2015: 1—4.
- [4] 姚海根. 数字半色调技术发展简史[J]. 广东印刷, 2000, 21(9): 39—41.
YAO Hai-gen. The Development of the Halftone[J]. Guangdong Printing, 2000, 21(9): 39—41.
- [5] THOLETI T, GANESH P, RAMANUJAM P. Frequency Domain Filtering Techniques of Halftone Images[J]. International Conference on Signal Processing and Integrated Networks(SPIN), 2015(2): 427—430.
- [6] FLOYD R W, STEINBERG L. An Adaptive Algorithm for Spatial Grey Scale[J]. Society for Information Display, 1976, 17(2): 75—77.
- [7] OSTROMOUKHOV V. A Simple and Efficient Error-Diffusion Algorithm[C]// Computer Graphics Proceedings, Siggraph, 2001: 567—572.
- [8] KONX K, ESCHBACH R. Error Diffusion Algorithm with Edge Enhancement[J]. Journal of the Optical Society of America (Optics and Image Science), 1991, 18(12): 1844—1850.
- [9] HWANG B W, KANG T H, LEE T S. Distortion Free General Information with Edge Enhanced Error Diffusion Halftoning[J]. ICCSA 2004, 3046: 281—290.
- [10] KWAK N J, RYU S P. Edge-enhanced Error Diffusion Halftoning Using Human Visual Properties[J]. Hybrid Information Technology, 2006, 1: 499—504.
- [11] PANDA N R, SAHOO A K, KUMAR S. A Negative Multiscale Error Diffusion Technique for Digital Halftoning[C]// International Conference on Pervasive Computing, 2015.
- [12] 梁永峰. 一种改进的误差扩散算法[D]. 西安电子科技大学, 2013.
LIANG Yong-feng. An Improved Error Diffusion Algorithm[D]. Xi'an: Xidian University, 2013.
- [13] 朱明, 李予. 基于权值抖动的误差扩散加网算法研究[J]. 包装工程, 2013, 34(7): 71—76.
ZHU Ming, LI Yu. The Research of Error Diffusion Based on Weight and Network Algorithm[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(7): 71—76.
- [14] 周啸, 史瑞芝, 李少梅, 等. 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.
- [15] 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.
- [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.