

基于边缘检测的视觉反馈误差扩散半色调算法

doi:10.3969/j.issn.1674-7100.2017.02.010

郭少东 王晓红

上海理工大学
出版印刷与艺术设计学院
上海 200093

摘要: 提出一种基于边缘检测的视觉反馈误差扩散半色调算法。首先,对原图像进行误差扩散,然后采用 LOG 算子提取原图像和半色调图像的边缘信息;接着计算原始图像边缘信息与半色调图像边缘信息之间的视觉差,并将该视觉差利用反馈函数传递到原图像,得到新的连续调图像;最后,对新的连续调图像进行误差扩散,得到最终的半色调图像。实验仿真结果表明,相较于标准误差扩散和快速误差扩散,所提算法在主观感受和客观评价方面都有较大提升,是一种有效的半色调图像生成方法。

关键词: 半色调算法; 误差扩散; 边缘检测; 视觉差反馈

中图分类号: TP391.41 **文献标志码:** A

文章编号: 1674-7100(2017)02-0063-05

0 引言

从模拟原稿与物理场景到印刷品,图像复制需经历数字图像捕获、连续调到半色调转换和印刷 3 个主要阶段。其中,连续调到半色调转换也称数字半色调处理,该阶段介于数字信号捕获与印刷之间,是联系模拟原稿或物理场景转换与印刷的桥梁。数字半色调技术之所以重要,至少有如下两方面的原因^[1]:首先,为了能真实地反映客观世界,数字图像必须以连续调的形式进行描述;其次,绝大多数硬拷贝设备只有二值表示能力,归结为着墨与不着墨两种状态,从而无法以直接方式在纸张等记录介质表面形成连续调记录结果,必须从多值像素描述转换到 0 和 1 的选择。

数字半色调技术常见的处理方法有抖动法、误差扩散法和迭代法 3 类,目前使用最多的是误差扩散算法^[2-15]。然而误差扩散算法也存在一些需要改进的缺陷,如边缘过渡不连续、轮廓失真等^[3,16-17]。

本文以传统误差扩散算法为基础,提出了一种基于边缘检测的视觉反馈误差扩散半色调算法,采用该

方法对 Lena、Test、Barbara 图像进行了仿真,并与标准误差扩散算法、快速误差扩散算法进行了比较。仿真结果表明,经本文提出算法处理的半色调图像更加平滑,边缘清晰度增加,视觉效果更好。

1 基于边缘检测视觉反馈的误差扩散半色调算法

1.1 误差扩散算法原理

经典误差扩散算法从连续调图像转换到半色调图像的信号处理流程如图 1 所示。

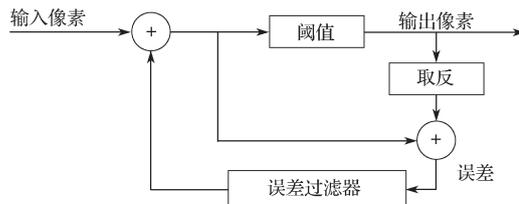


图 1 经典误差扩散算法原理

Fig. 1 Classical error diffusion algorithm principle

由图 1 可以得知,经典误差扩散算法中,经阈值

收稿日期: 2016-11-10

作者简介: 郭少东(1992-),男,山西晋中人,上海理工大学硕士生,主要研究方向为色彩再现理论与应用,
E-mail: 1115647492@qq.com

通信作者: 王晓红(1971-),女,陕西汉中,上海理工大学教授,主要从事色彩管理和图像质量控制方面的研究,
E-mail: wang_keyan@163.com

处理后的信号分成两部分输出，分别对应于二值像素的0或1和量化误差。当前处理像素导致的误差先传递至误差过滤器或者误差分配器，然后分配到邻域的未来像素^[1]。

1.2 图像边缘检测原理

传统的误差扩散算法在将图像变成半色调图像的过程中，没有考虑图像的边缘信息^[4]，因而会造成图像边缘过渡不均匀、轮廓失真等现象，所以本研究通过引入边缘提取算法来加以改善^[5-6]。

边缘检测算子是利用图像边缘的突变性质来检测图像边缘的^[7]，主要分为两种类型：一种是以一阶导数为基础的边缘检测算子，它通过计算图像的梯度值来检测图像边缘，如差分边缘检测、Roberts算子、Sobel算子、Prewitt算子等；另一种是以二阶导数为基础的边缘检测算子，通过寻求二阶导数中的过零点来检测边缘，如Laplacian算子、LOG (Laplacian of Gaussian)算子、Canny算子等。本文的算法中采用LOG算子进行图像边缘检测。

LOG算子利用图像信噪比得到检测边缘的最优滤波器。首先，通过高斯函数对图像进行低通平滑滤波；然后，通过Laplacian算子进行高通滤波；最后，由二阶导数零交叉点检测图像的边缘。已有研究表明，LOG算子获取的边缘图像效果优于其他边缘检测算子^[7]。

1.3 视觉差反馈

误差扩散算法处理过的半色调图像不够平滑，过渡不均匀，因此，本文采用视觉差反馈^[8-9]对原始灰度图像进行补偿，以使半色调图像过渡均匀，增强其视觉效果。

设 $f(m, n)$ 和 $b(m, n)$ 分别为原始灰度图像 (m, n) 的边缘信息和其所对应的半色调图像的边缘信息， $\tilde{f}(m, n)$ 和 $\tilde{b}(m, n)$ 分别为各自边缘信息经过人眼视觉 (human visual system, HVS) 模型后的输出响应。

通常采用高斯滤波器来模拟HVS模型^[10]，高斯滤波器表示如下：

$$H_{\text{Gaus}}(u, v) = e^{-\frac{u^2 + v^2}{2\sigma_1^2}} \quad (1)$$

式中： (u, v) 为频域坐标；

σ_1 为高斯曲线的扩张程度。

则 $\tilde{f}(m, n)$ ， $\tilde{b}(m, n)$ ， $|\tilde{e}(m, n)|$ 可以用以下公式表示：

$$\tilde{f}(m, n) = \left| \text{IFFT} \left\{ \text{FFT} [f(m, n)] \cdot H_{\text{Gaus}}(u, v) \right\} \right| \quad (2)$$

$$\tilde{b}(m, n) = \left| \text{IFFT} \left\{ \text{FFT} [b(m, n)] \cdot H_{\text{Gaus}}(u, v) \right\} \right| \quad (3)$$

$$|\tilde{e}(m, n)| = \left| \text{IFFT} \left\{ \text{FFT} [f(m, n) - b(m, n)] \cdot H_{\text{Gaus}}(u, v) \right\} \right| \quad (4)$$

式中： FFT 和 IFFT 分别为傅里叶变换及其反变换；

$|\tilde{e}(m, n)|$ 为原始图像边缘信息与半色调图像边缘信息之间的视觉差。

设 H 为反馈系数，表示视觉差对原始灰度图像边缘信息当前像素 $f(m, n)$ 的影响程度，对其进行补偿得到 $f'(m, n)$ ，则有以下反馈方程：

$$f'(m, n) = \begin{cases} f(m, n) - H|\tilde{e}(m, n)|, & f(m, n) < Ave; \\ f(m, n) + H|\tilde{e}(m, n)|, & f(m, n) \geq Ave \end{cases} \quad (5)$$

式中： $f'(m, n)$ 为边缘信息得到补偿后的灰度图像；

Ave 为 (m, n) 位置处像素点周围 3×3 邻域的平均值。

1.4 本文算法

传统的误差扩散算法处理过的半色调图像，会出现边缘不连续、“伪轮廓”等弊端，为解决这一弊端，本文提出基于边缘提取的视觉反馈误差扩散半色调算法，其原理如图2所示。

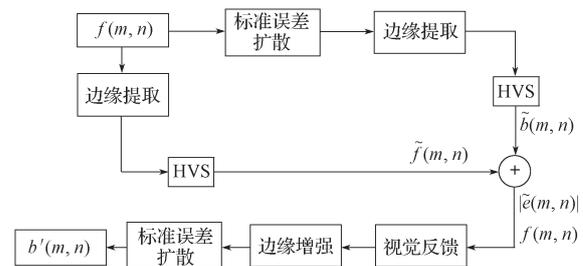


图2 基于边缘检测的视觉反馈误差扩散半色调算法
Fig. 2 Halftoning algorithm based on edge detection and feedback of human visual errors

基于边缘提取的视觉反馈误差扩散半色调算法的具体实现过程如下：

- a) 使用LOG算子提取原始灰度图像的边缘信息，得到 $f(m, n)$ ；
- b) 将原始图像经过Floyd-Steinberg误差扩散处理，得到半色调图像；
- c) 使用LOG算子提取半色调图像的边缘信息，得到 $b(m, n)$ ；
- d) 分别将原始图像边缘信息和半色调图像边缘信息与HVS视觉函数进行频域点积，再进行反傅里叶变换，依次得到 $\tilde{f}(m, n)$ 与 $\tilde{b}(m, n)$ ；
- e) 计算原始图像边缘信息与半色调图像边缘信息之间的视觉误差，得到 $|\tilde{e}(m, n)|$ ；
- f) 将视觉误差通过视觉反馈系数 $H(m, n)$ 添加

到原始图像边缘信息 $f(m, n)$, 得到反馈补偿后的图像 $f'(m, n)$, 然后对该图像再次进行 Floyd-Steinberg 误差扩散, 得到最终的半色调图像 $b'(m, n)$ 。

2 实验与结果分析

为了验证本文所提算法的有效性, 在 Matlab 平台上实现本文的算法, 并与标准误差算法、快速误差算法进行了比较, 选用的处理图像为 Lena、Test、Barbara 图像。

关于半色调图像质量的客观评价, 本研究中选用峰值信噪比 (peak signal to noise ratio, PSNR) 和结构相似度 (structural similarity index measurement, SSIM) 两个评价因子。

1) 峰值信噪比

峰值信噪比是峰值信号能量与平均噪声能量的比值, 其计算公式为

$$PSNR = 10 \lg \frac{255^2 \times M \times N}{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N [x(m, n) - y(m, n)]^2} \quad (6)$$

式中: $x(m, n)$ 为原始图像;

$y(m, n)$ 为最终的半色调图像, 且图像大小为 $M \times N$ 。

2) 结构相似度

结构相似度是一种衡量两幅图像结构相似程度的指标, 其值越大越好, 最大为 1, 其计算公式为

$$SSIM = \frac{(2\bar{I}\bar{b} + C'_1)(2\sigma_{Ib} + C'_2)}{(\bar{I}^2 + \bar{b}^2 + C'_1)(\sigma_I^2 + \sigma_b^2 + C'_2)} \quad (7)$$

式中: $C'_1 = (k_1 L)^2 (k_1 \leq 1)$;

$C'_2 = (k_2 L)^2 (k_2 \leq 1)$;

L 为图像的灰度级数。

图 3~5 给出了 Lena、Test、Barbara 3 幅图像, 以及其分别采用标准误差扩散、快速误差扩散和本文算法生成的半色调图像。



a) Lena 原图

b) 标准误差扩散

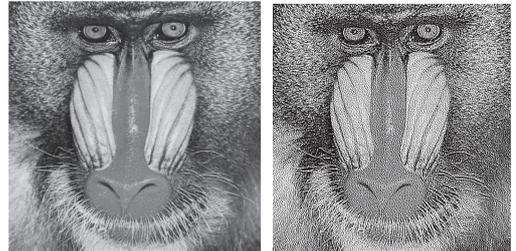


c) 快速误差扩散

d) 本文算法

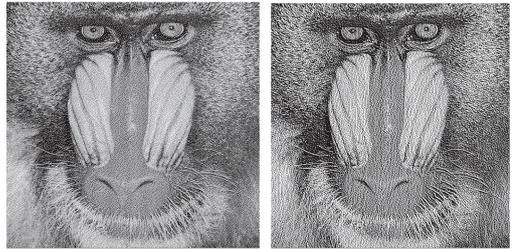
图 3 Lena 图像处理结果

Fig. 3 The final processing results of Lena



a) Test 原图

b) 标准误差扩散



c) 快速误差扩散

d) 本文算法

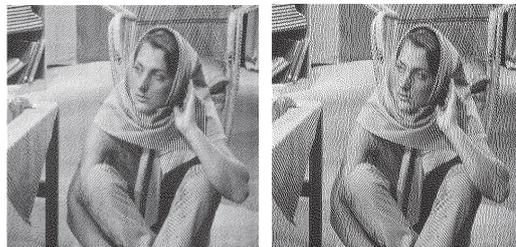
图 4 Test 图像处理结果

Fig. 4 The final processing results of Test



a) Barbara 原图

b) 标准误差扩散



c) 快速误差扩散

d) 本文算法

图 5 Barbara 图像处理结果

Fig. 5 The final processing results of Barbara

从图 3~5 中可以看出, 相较于标准误差扩散和快速误差扩散算法, 经本文算法处理的半色调图像具有较好的视觉效果, 图像细节更加清晰, 且图像的边缘得到了较好的保持。

表 1 给出了 3 种算法处理的半色调图像的客观评价具体数据。

表 1 客观评价数据比较

Table 1 Data comparison of objective evaluation

| 实验图像 | 评价指标 | 标准误差扩散 算法 | 快速误差扩散 算法 | 本文算法 |
|---------|------|--------------|--------------|---------|
| Lena | PSNR | 7.091 6 | 7.134 7 | 7.418 9 |
| | SSIM | 0.247 8 | 0.249 5 | 0.275 8 |
| Test | PSNR | 6.684 7 | 6.924 3 | 7.381 3 |
| | SSIM | 0.201 3 | 0.208 9 | 0.234 7 |
| Barbara | PSNR | 6.467 6 | 6.398 7 | 6.813 7 |
| | SSIM | 0.303 4 | 0.298 5 | 0.325 0 |

分析表 1 中的数据可以得知, 对于 3 幅图像的客观评价结果, 本文算法相较于标准误差扩散算法和快速误差扩散算法, 其 PSNR 值和 SSIM 值都有了明显的提高, 客观评价结果较好, 表明本文算法优于标准误差扩散算法和快速误差扩散算法。

3 结语

本文在经典误差扩散算法的基础上, 结合图像边缘检测和视觉差反馈, 对已有算法进行了改进, 在 Matlab 平台上实现本文的算法, 并选用 Lena、Test、Barbara 3 幅处理图像, 与标准误差扩散算法、快速误差扩散算法进行了仿真比较, 结果表明, 本文算法消除了经典误差扩散算法导致的图像边缘过渡不均匀、细节不清晰等弊端, 再现了比较清晰的图像边缘, 取得了较好的视觉效果。

同时, 客观评价结果表明, 本文所提出的算法较标准误差扩散算法和快速误差扩散算法, 其 PSNR 值和 SSIM 值均明显提高, 客观评价结果较好。

因此, 本文所提出的方法是一种有效的半色调图像生成方法。

参考文献:

[1] 姚海根, 程鹏飞. 数字半色调技术 [M]. 北京: 印刷工业出版社, 2012: 5-12.
YAO Haigen, CHENG Pengfei. Digital Halftoning Technology[M]. Beijing: Printing Industry Press,

2012: 5-12.
[2] 李 飞, 唐正宁. 数字加网技术 [J]. 包装工程, 2005, 26(5): 49-52.
LI Fei, TANG Zhengning. Digital Screening Technolog[J]. Package Engineering, 2005, 26(5): 49-52.
[3] 叶玉芬. 数字半色调技术中的误差扩散算法研究 [M]. 西安: 西安电子科技大学, 2006: 12-15.
YE Yufen. Research on Error Diffusion Algorithm in Digital Halftoning[M]. Xi'an: Xidian University, 2006: 12-15.
[4] 李松林. 误差扩散数字半色调技术研究 [D]. 河北: 河北工业大学, 2013.
LI Songlin. The Study of Error Diffusion Digital Halftoning Technique[D]. Hebei: Hebei University of Technology, 2013.
[5] HWANG B W, KANG T H, LEE T S. Distortion-Free of General Information with Edge Enhanced Error Diffusion Halftoning[C]//Computational Science and Its Applications-ICCSA 2004. Assisi: [S. l.], 2004: 281-290.
[6] PANG W M, QU Y, WONG T T, et al. Structure-Aware Halftoning[J]. ACM Transactions on Graphics, 2008, 27(3): 529-547.
[7] 欧温暖. 几种常见边缘检测算子的分析比较 [J]. 现代计算机, 2010(5): 75-77.
OU Wennuan. Analysis and Comparison of Several Common Edge Detection Operators[J]. Modern Computer, 2010(5): 75-77.
[8] KWAK N J, RYU S P, AHN J H. Edge-Enhanced Error Diffusion Halftoning Using Human Visual Properties[C]//2006 International Conference on Hybrid Information Technology. South Korea: IEEE, 2006: 499-504.
[9] KIM S H, ALLEBACH J P. Impact of HVS Modelson Model-Based Halftoning[J]. IEEE Transactions on Image Processing A Publication of the IEEE Signal Processing Society, 2002, 11(3): 258-269.
[10] 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.
LIANG Yongfeng. An Improved Error Diffusion Algorithm[D]. Xi'an: Xidian University, 2013.
[11] 邝敏威, 陈 新. 调频加网技术分析和研究 [J]. 包装工程, 2002, 23(5): 12-14.
KUANG Minwei, CHEN Xin. Analysis and Research on FM Screening Technology[J]. Package Engineering, 2002, 23(5): 12-14.
[12] 张大宁. 基于视觉差反馈的误差扩散算法 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2011.

- ZHANG Daning. An Error Diffusion Halftone Algorithm Based on Visual Error Feedback[D]. Xi'an: Xidian University, 2011.
- [13] CHANG J C, ALAIN B, OSTROMOUKHOV V. Structure-Aware Error Diffusion[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2009, 28(5): 162-170.
- [14] CHANG J, ALAIN B, OSTROMOUKHOV V. Structure-Aware Error Diffusion[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2009, 28(5): 89-97.
- [15] 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. Research on Error Diffusion Algorithm Based on Weights Perturbation[J]. *Package Engineering*, 2013, 34(7): 71-76.
- [16] 邹星星, 钟莎, 马增强. 基于边缘检测的 Kinect 深度图像去噪算[J]. *湖南工业大学学报*, 2013, 27(6): 36-39.
- ZOU Xingxing, ZHONG Sha, MA Zengqiang. Kinect Depth Image Denoising Based on Edge Detection[J]. *Journal of Hunan University of Technology*, 2013, 27(6): 36-39.
- [17] 吴婉, 于惠钧, 成运. 基于改进的 Canny 算法的铝塑泡罩药品边缘检测[J]. *湖南工业大学学报*, 2014, 28(4): 67-70.
- WU Wan, YU Huijun, CHENG Yun. Edge Detection of Aluminum-Plastic Blister Drugs Based on Improved Canny Algorithm[J]. *Journal of Hunan University of Technology*, 2014, 28(4): 67-70.

A Visual Feedback Error Diffusion Halftoning Algorithm Based on Edge Detection

GUO Shaodong, WANG Xiaohong

(College of Communication and Art Design, Shanghai University of Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: A visual feedback error diffusion halftoning algorithm based on edge detection was presented. Firstly, the original image was error-diffused, and the edge information of the original image and halftone image was extracted by the LOG operator. Then the visual difference between the original image edge information and the halftone image edge information was calculated with the feedback function of the visual difference. Finally, the new halftone image was spread by error diffusion to get the final halftone image. Experimental results showed that the proposed algorithm improved greatly in subjective perception and objective evaluation compared with the error diffusion and fast error diffusion, and was an effective method for generating halftone images.

Keywords: halftoning algorithm; error diffusion; edge detection; visual error feedback