基于权值抖动的误差扩散加网算法研究

朱明1,李予2

(1. 河南工程学院, 郑州 450007; 2. 河南省新闻出版学校, 郑州 450007)

摘要:首先,基于人眼对输出结果的主观感受,将权值抖动算法与传统误差扩散算法进行了对比研究。通过研究发现:权值组内抖动的算法效果略优于传统 Floyed-Steinberg 算法,在一定程度上减小了伪轮廓和提高了边缘的锐利程度,但滞后现象没有得到很好解决。其次,使用该算法输出了不同灰度级的均匀灰度块,分析了输出后的径向平均功率谱和各向异性程度,并对比了实际视觉效果,得出了半色调输出质量与频率谱和对称性的关系,最终提出了提高半色调输出质量的算法研究方向。

关键词:误差扩散;权值抖动;径向平均功率谱;各向异性

中图分类号: TS801.3; TS807 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2013)07-0071-06

Research on Error Diffusion Algorithm Based on Weights Perturbation *ZHU Ming*¹, *LI Yu*²

(1. Henan Institute of Engineering, Zhengzhou 450007, China; 2. Press and Publication School of Henan Province, Zhengzhou 450007, China)

Abstract: Comparative study was carried out on the error diffusion algorithm based on weight perturbation and conventional error diffusion algorithm. The result indicated that the effect of the error diffusion algorithm with four perturbation weights is little batter than Floyed-Steinberg; this algorithm reduces the pseudo outline and sharpens the image edge to some extent, but the pseudo outline and the hysteresis phenomenon still exist. Uniform gray patch with different level was output by the method; radial average power spectrum and anisotropy of the output result was analyzed. The effects of objective assessment and subjective assessment were compared and the relation among halftone output quality, radial average power spectrum and symmetry was obtained. The research direction of halftone algorithm to improve halftone output quality was put forward.

Key words: error diffusion; weights perturbation; radial average power spectrum; anisotropy

由于调频加网技术使用的网点更细小,因而更能体现原稿的细微变化,使印刷图像更清晰。同时调频网点无固定网角,从根本上避免了调幅网点可能引起的撞网、错网问题,因此调频加网成为高保真印刷的重要加网方式^[1]。随着多通道数字喷墨打印设备的出现和广泛应用,促进了国内外对调频加网算法的研究,对算法的效果和速度都提出了更高要求。在国内外相关研究中,Folyed 在 1975 年提出了误差扩散算法^[2],该算法因输出质量较好所以使用广泛,但也存在一些缺陷需要进一步改进:如输出图像存在蠕虫纹理、与方向相关的滞后纹理及伪轮廓等^[7]。Rosenfeld

和 Wellendorf, Kiel 分别在 1984 年和 1985 年提出了 一种对传统误差扩散算法中使用的扩散滤波器进行 权值扰动,以减少相关纹理,提高边缘锐利程度的改 进方法,并认为该方法在效果上取得了较大的改 善^[3-4,8],目前国内还未见与此算法相关的研究文献, 于是本文对此算法进行了深入的分析与研究。

1 权值抖动误差扩散算法的基本原理

传统误差扩散算法中的误差滤波器(如图1)权

收稿日期: 2013-01-08

基金项目: 2012 年度河南省教育厅自然科学研究重点项目(12A510004)资助; 2011 年河南省科技厅科技攻关计划项目 (112102210017)资助; 2013 年河南工程学院博士基金项目资助

作者简介:朱明(1983-),男,博士,河南工程学院讲师,主要研究方向为颜色再现理论与应用(色貌模型与颜色管理)。



Fig. 1 Several error diffusion filters commonly used

值是固定的,且权值权重在右下方比较多,这被认为 是出现滞后纹理的原因。于是有研究者提出了蛇形 扫描等扫描路径,虽解决了向右滞后的问题但向下滞 后的问题依然存在。

针对存在的问题,一些学者提出了基于权值抖动 的改进方法,该方法依然采用传统 Floyrd-Steinberg 误 差扩散滤波器,但对滤波器中的权值进行大小或位置 的抖动,抖动方式有以下几种:单个权值在不同位置 抖动、两个权值取值大小的抖动或权值取值大小与位 置的共同抖动、权值在0和1之间抖动。4个权值最 小的2个与最大的2个各分为一组抖动,为保证不出 现负值,抖动幅度在0和各组中的较小值之间浮动(4 种权值抖动滤波器如图2,其中r,r'是符合0≤r≤1,0



Fig. 2 Error diffusion filters with weights perturbation

≤r'≤1条件的随机数)。因此与传统误差扩散算法相比较,改进后的方法在每次扩散前都需对扩散权值进行抖动,然后按照抖动后的新权值进行误差扩散(算法流程见图3)。Rosenfeld、1985年Wellendorf和 Kiel认为权值抖动使误差扩散方向更具有随机性,因



Fig. 2 Workflow of the error diffusion algorithm based on weights perturbation

此能够改变误差扩散方向相对处理方向偏下的问题, 从而使误差扩散量也更具随机性。权值抖动还能在 完全输出蓝噪性二值图的误差扩散处理中引入较低 频信号,从而使原来只有高频信号的误差扩散输出具 有了中间频率信号,一定程度上减轻了伪轮廓问 题^[3-4,8]。

2 实验思路与原理

首先,通过主观评价的方法排除那些输出效果明显不佳的算法,再使用剩下的算法输出均匀灰度色块,并对输出结果进行频谱分析。通过计算输出灰度 二值图的径向平均功率谱和各向异性程度来分析该 算法输出结果的频率分布和视觉对称性。径向平均 功率谱的计算过程如下:先对灰度色块的二值输出图 做傅里叶变换,再将原点移到中心,根据所有像素值 计算出傅里叶谱幅值的平方,然后以固定的宽度和半 径做圆环(见图 4),求出分布在圆环上的平均功率,



不同半径圆环上的平均功率值拟合便得到了径向平均功率谱线,如式1。傅里叶变换后的频谱图像像素距离中心点的距离表示了其所处的频率,式中p为圆

环上傅里叶频谱的平均功率,代表了图像在此频率的 平均功率,Nr为所求圆环上的所有像素数,P为每个 像素的值(即傅里叶谱功率值)^[5-6],代表了频域中该 像素与中心点连线方向上这一频率下的傅里叶谱功 率。当网点聚集时,黑白交界边缘减少,高频功率降 低,反之高频功率升高,因而径向平均功率谱可以反 映二值图像的网点分散状态,因人眼具有低通滤波的 特性,因此网点的分布应具有中高频性,即径向平均 功率谱曲线在中高频范围的取值越大,低频部分取值 越小,则算法的输出质量就越好。

$$\overline{p} = \frac{1}{Nr} \sum_{i=1}^{Nr} P \tag{1}$$

在傅里叶变换域中,频域图中某一方向的功率分 布较高,则说明在空域中该图像在这一方向上的变化 幅度较大。因此将径向功率分析中的圆环以原点为 中心分为角度为α的扇形,求出每个扇形内所包含的 总功率值,然后求取这些功率值之间的方差,方差大 小可以反映该圆环上各方向的功率分布差异大小,即 各向异性:

$$S^{2} = \frac{1}{\alpha - 1} \sum_{i=1}^{\alpha} (P - \overline{P})^{2}$$
(2)

式中:S²为方差; α为圆环按角度所分数目; P为 扇形内所分布的功率; P 为各扇形所分布功率的均 值。各向异性表示了图像在某一频率范围内,频域图 像各方向上的功率变化程度,也即表示图像在空域上 各方向上的灰度梯度变化是否均匀,而将不同频率范 围的各向异性值拟合为曲线就表示了图像在整个频 率范围内各方向的灰度梯度的变化,因均匀灰度色块 的原图是各向同性的,因此计算半色调处理后的均匀 灰度色块的各向异性曲线,可以获知半色调处理结果 的各向均匀性,各向异性越低说明各方向的均匀性越 好,半色调输出质量越高。

3 实验与分析

3.1 主观评价实验

首先,使用传统 Floyed-Steinberg 误差扩散算法和 4 种加过权值抖动的 Floyed-Steinberg 算法分别输出 lena 图,通过观察先找出明显较差的算法。lena 原 图、Floyed-Steinberg 算法和算法 d,a,b,c 的输出效果 见图 5。可以明显看出算法 a,b,c 的输出中有明显的 颗粒感,成像质量粗糙,输出质量要比传统 Floyed-





Steinberg 算法差。而算法 d 成像质量要略优于传统 算法,但并没有在很大程度上改善,滞后纹理、伪轮廓 等问题(见图中画圈部分)。

(1) 主观评价实验使用东芝 L600-22B 型笔记本 电脑显示器、EIZO CG19 型专业软打样显示器、苹果 A1186 型桌面电脑显示器,并分别使用了大小为 1886 ×3199,2370×4020,2962×5024,5332×9044,7109× 12058 的灰度渐变条进行观察,实验条件的配置依据 参考文献[9-10],确定当显示比例在 16.7~31.5 之 间或为 100% 时,同一幅图在 3 种显示器上的观察效 果一致,见图 6。



图 6 Floyed-Steinberg 算法(左)与 d 算法(右)输出的渐变条 Fig. 6 Ramps output by Floyed-Steinberg algorithm and d algorithm

(2) 屏幕观察实验发现: 半色调图像在 33% ~ 100% 之间显示器不能正常显示二值图像,为进一步 证明两种算法的不同效果,使用 EPSON Pro 7800,EP-SON Pro 7910 喷墨打印机绕开打印机加网模块直接控制打印机输出,以 360×360 dpi,720×720 dpi 打印输出测试图,用同样的方式使用 HP z3200 喷墨打印机以 300,600dpi 输出测试图。在输出图中也观察到了与显示器相同的纹理,与显示观察结果相一致。

3.2 径向功率谱的分析

针对上述结论,使用传统 Floyed-Steinberg 算法与 d 算法分别输出渐变条,进一步对两种算法的效果进 行分析,输出结果见图 6。在图 6 可以看出 d 算法在 较大程度上减轻了伪轮廓现象,但在输出图像中依然 存在视觉可感知的伪轮廓,特别是在中间调区域。D 算法对滞后纹理的改善效果微乎其微,依然存在明显 可察觉的纵向纹理,即滞后纹理,特别是在中间调部 分要比传统 Floyed-Steinberg 误差扩散算法的输出结 果还要严重一些。

其次,为分析上述现象的原因,对传统 Floyed-Steinberg 算法与 d 算法输出的一系列均匀灰度色块进 行径向功率谱的分析和各向异性分析。对 1/16,1/8, 1/4,1/2,3/4,7/8 灰度处的均匀灰度色块使用算法 d 和传统 Floyed-Steinberg 算法进行输出,灰度色块的图 像大小为 256×256 像素,计算其径向平均功率谱见图 7,图中 a-c,j-i 依次为 d 算法输出的 1/16, 1/8, 1/4, 1/2,3/4,7/8 灰度处的平均径向功率谱,d-f,j-e 依次



Fig. 7 Radial average power spectrums of uniform gray patches

为传统 Floyed-Steinberg 算法输出的 1/16,1/8,1/4, 1/2,3/4,7/8 灰度处的平均径向功率谱。图中的曲线 横坐标代表波长(频率),因此曲线自左至右为从低频 到高频的傅里叶谱平均功率,表示图像从低频到高频 的功率分布。在图中可以明显看出 2 种算法在 1/4, 1/2,3/4 灰度处的谱线明显不同,在 1/4,3/4 灰度处 传统 Floyed-Steinberg 算法的输出在高频部分具有更 高的功率,特别是在频率很高的地方,功率很集中,而 d 算法在同样灰度下的输出,从低频到高频功率缓慢 提高,较为均匀。这就说明 d 算法在 1/4 灰度和 3/4 灰度附近具有更好的绿噪性,而这就是 d 算法能够较 明显的减轻这些阶调处伪轮廓的原因,而在 1/2 灰度 处 d 算法输出结果具有比 Floyed-Steinberg 算法输出 结果高很多的功率,因此在中间阶调处依然有较严重 的伪轮廓现象,因此使输出二值图在各阶调获得更好的绿噪性是改进半色调输出质量的重点。

3.3 径向功率谱的分析

图像频域谱是径向对称的,但不是周向对称的,即 在某一过中心点的直线方向上相对中心点对称,不同 方向直线在对应位置上的频域谱是不同的。对于d算 法的输出依然存在视觉可察的滞后纹理,本文通过传统Floyed-Steinberg误差扩散算法和d算法输出256× 256 像素的均匀灰度色块,将图像傅里叶变换、原点置 中后,将傅里叶频谱图以原点为中心,5°为步长分为72 份,计算各方向上分布的频谱能量的方差值用于分析 算法输出结果的各向异性。为保证所有采样环上的各 向异性值都能在频谱图上正常显示,在得到计算结果 后将其放大了103 倍,各向异性曲线见图8,其中a-c,



Fig. 8 Anisotropy curves of the uniform gray patches

g-i 依次为 d 算法输出的 1/16,1/8,1/4,1/2,3/4,7/8 灰度的各向异性曲线; d-f,j-1 依次为传统 Floyed-Steinberg 算法输出的 1/16,1/8,1/4,1/2,3/4,7/8 灰 度的各向异性曲线。曲线上的每一点表示在该波长 (频率)处频谱图各方向上频谱值之间的差异(以方 差值表示),代表着该波长对应的原图像各方向灰度 变化程度上的差异。若在人眼较敏感的中低频处差 异较大,则说明有人眼可察觉的纹理存在。

通过分析可见,在 1/16 灰度值处的高频部分 d 算法输出结果的各向异性值低于 Floyed-Steinberg 算 法,其他灰度值处 d 算法的各向异性都偏高,特别是 在中低频处,而且在 1/4,1/2,3/4 灰度值处 d 算法输 出结果的各向异性值明显偏高,这也印证了用 2 种算 法输出渐变条时在滞后纹理方面的表现:即 d 算法的 滞后纹理没有明显改善,在中间调附近还有所加重。 因此,提高半色调输出质量的另一个关键是降低算法 输出结果的各向异性,即提高算法输出结果的对称性。

4 结论

将基于权值抖动的误差扩散加网算法与传统 Floyed-Steinberg 算法的输出结果进行主观视觉对比, 分析了它们的径向平均功率谱和各向异性。基于权 值抖动的误差扩散算法在4个扩散位置上都有权值 存在,且最小的两个权值与最大的2个权值各分为一 组,权值在组内进行抖动。该算法因在中间调以外的 阶调范围内引入了合理的绿噪声信号,因而减轻了伪 轮廓问题,而在中间调附近因能量依然较集中于高 频,伪轮廓问题依然存在。此外,由于该算法在各向 异性方面没有更好的改善,特别是在中间调附近反而 变差,导致滞后纹理现象依然严重。为了进一步改善 算法性能,提高半色调输出质量,今后的研究应从在 各阶调引入合理的绿噪声信号和提高输出对称性两 方面入手,研究对称的绿噪声误差扩散滤波器及相对 应的扫描路径策略。

(上接第67页)

WANG Yi-feng, ZENG Ping. Multi Channel Printer Characterization Based on Gamut Partition [J]. Act A Electronica Sinica, 2010, 38(3):507-511.

[8] GUO Jin-yi. Novel Spectral Characterization Method for Color Printer Based on the Cellular Neugebauer Model [J].

参考文献:

- [1] 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 Min-wei, CHEN Xin. Analysis and Research on FM Screening Technology[J]. Packaging Engneering, 2002,23 (5):12-14.
- [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 Zheng-ning. Digital Screening Technology
 [J]. Packaging Engneering,2005,26(5):49-52.
- [3] ROSENFELD G. Screened Image Reproduction: US,4456924[P]. 1984.
- [3] GALL W, WELLENDORF K, KIEL K. Production of Screen Printing Block: US,4499489[P]. 1985.
- [5] OPPENHEIM A V, SCHAFER R W. Digital Signal Processing[J]. Englewood Cliffs, NJ:Prentice-Hall, 1975.
- [6] 蒋甫玉,孟令顺,张凤旭,高丽坤. Chebyshev 逼近滤波器 在位场分离中的应用[J]. 物探与化探, 2008,32(3): 311-315.

JIANG Fu-yu, MENG Ling-shun, ZHANG Feng-xu, et al. The Application of Chebyshev Approximation Filter to Separating Potential Anomalies [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2008, 32(3):311–315.

- [7] 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.
 YE Yu-fen. Research on Error Diffusion Algorithm in Digital Halftoning[M]. Xi´an;Xi´an University,2006.
- [8] WOO B. A Survey of Halftoning Algorithms and Investigation of the Error Diffusion Technique. MIT, S. B. thesis, 1984.
- [9] CHANG Jiang-hao, ALAIN B, OSTROMOUKHOV V. Structure-Aware Error Diffusion [J]. ACM Transactions on Graphics, 2009, 28(5):162–166.
- [10] PANG Wai-man, QU Ying-ge, WONG Tien-tsin, et al. Structure-Aware Halftoning[J]. ACM Transactions on Graphics, 2008,27(3):89-93.

Chinese Optics Letters, 2010, 8(11):1106-1109.

[9] WANG Bin-yu. Color Separation Criteria for Spectral Multiink Printer Characterization [J]. Chinese Optics Letters, 2012,10(1);13301.

76