

误差分散类逆半调技术综述

郑海红¹⁾ 孔月萍^{1), 2)} 曾平¹⁾ 王义峰¹⁾

¹⁾ (西安电子科技大学计算机学院, 西安 710071) ²⁾ (西安建筑科技大学信息与控制工程学院, 西安 710055)

摘要 逆半调技术是半调图像处理中的关键技术之一, 近几年来其研究取得了较大的进展。为了使人们对该技术研究现状有个概略了解, 首先论述了逆半调技术的原理和主要研究方法; 然后重点分析了针对误差分散半调图的滤波方法、机器学习方法和最优化估计方法, 并比较了它们的优缺点, 通过比较发现, 基于模糊技术、人眼视觉特性的自适应滤波方法, 在实际应用中有广阔的前景; 最后给出误差分散逆半调技术目前存在的问题和进一步的发展方向。

关键词 逆半调 半调 误差分散 滤波 机器学习 最优化估计

中图分类号: TP391.41 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2008)01-0001-06

A Review of Inverse Halftone Algorithms for Error Diffusion

ZHENG Haihong¹⁾, KONG Yueping^{1), 2)}, ZENG Ping¹⁾, WANG Yifeng¹⁾

¹⁾ (Department of Computer Science, Xidian University, Xi'an 710071)

²⁾ (School of Information and Control, Xi'an University of Architecture, Xi'an 710055)

Abstract Inverse halftone has been greatly developed recently and it is one of the key techniques in image processing for halftone. First the principles and implementations of inverse halftone are given. Then the emphasis is put on the analysis of filtering methods, machine-learning based methods and optimum-estimation based methods for error diffusion halftone. Comparisons show that HVS-based fuzzy filtering schemes have a promising application. Finally the open issues and possible future research directions are pointed out.

Keywords Inverse halftone, halftone, error diffusion, filtering, machine learning, optimum estimation

1 引言

数字半调 (digital halftone) 技术是一类将连续色调图像变换为等观感半色调图像 (通常为二值图像) 的技术, 目前被广泛用于连续色调图像的印刷、打印和显示, 以降低连续色调图像的再现成本和提高再现质量^[1]。由半调图像重构连续色调图像的技术为逆半调 (inverse halftone) 技术。由于在印刷、打印扫描输入、传真、部分网上进行的查询过程中, 人们只能获得半调图像, 因此此时如需对图像进行识别、压缩、增强等处理, 或针对其他再现设备重新进行半调, 则必须首先进行逆半调^[2]。

数字半调过程可被解释为一种噪声源, 它通过将噪声引入连续色调图来使输出图像可取二值性数值。目前常用的数字半调方法主要有有序抖动 (order dither) 和误差分散两类。这两类方法的差别既表现在处理结构上, 也表现在产生的半调图的频率特性上。经有序抖动产生的半调图, 由于有序抖动阵的周期性, 致使其频谱呈现出很强的离散分布性; 而经误差分散产生的半调图的频谱则无很强的周期分量, 且图像各局部的谱能量从低频到高频逐步增加。

根据半调图像的种类, 逆半调可分为有序抖动逆半调和误差分散逆半调两类。其中有序抖动图像降质严重, 虽然也有一些逆半调算法, 但目前对其研究较少; 而误差分散半调图则因噪声主要分布在人

基金项目: 国防科技预研基金项目 (51416050301DZ0140); 陕西省自然科学基金项目 (2004F32); 陕西省教育厅专项项目 (04JK244)

收稿日期: 2006-05-22 改回日期: 2006-08-28

第一作者简介: 郑海红 (1979~), 女, 博士, 现为西安电子科技大学计算机应用专业讲师。主要研究方向为半调图像处理。Email

hhzheng@mail.xidian.edu.cn

第五届全国CAD与数字图形学术年会

中国图象图形学报 (JIG) 创刊于1992年, 是《中国学术期刊网》、《中国期刊网》、《中国科技期刊网》、《万方数据》、《维普网》、《知网》等数据库的收录期刊。本刊为双月刊, 每月15日出版。国内邮发代号: 38-115。国外邮发代号: 92-115。零售每份0.50元。全年5.00元。广告刊例: 封面1000元/月, 封底800元/月, 封二600元/月, 封三400元/月, 正文200元/月。电话: 010-62786900。地址: 北京海淀区中关村大街27号。邮编: 100080。

眼不敏感的高频区域而具有较好的视觉效果,因此误差分散逆半调算法成为研究热点。

2 逆半调技术的原理和研究方法

从信号处理角度看,逆半调问题可被想像成估值问题。设 $\mathbf{x} = \{x_{ij} | x_{ij} \in [0, 1], 1 \leq i \leq M, 1 \leq j \leq N\}$ 为连续色调图像, $\mathbf{b} = \{b_{ij} | b_{ij} \in \{0, 1\}, 1 \leq i \leq M, 1 \leq j \leq N\}$ 为半调图像, H 表示半调过程, θ 表示误差分散核, 则

$$\mathbf{b} = H_{\theta}(\mathbf{x}) \quad (1)$$

可有以下两种不同的方法来指定逆半调目标: 一是从半调图像 \mathbf{b} 产生连续色调图像 $\hat{\mathbf{x}}$ 并要求在一定远处观察时, \mathbf{b} 和 $\hat{\mathbf{x}}$ 是相似的, 即寻找一种映射 H_1^{-1} , 满足

$$(\hat{\mathbf{x}} = H_1^{-1}(\mathbf{b})) \cup (\hat{\mathbf{x}} \approx \mathbf{b}) \quad (2)$$

二是对给定的一个半调图像 \mathbf{b} , 其通过寻找连续色调图像 $\hat{\mathbf{x}}$ 来使当 $\hat{\mathbf{x}}$ 被半调时, 产生的是 \mathbf{b} , 即通过寻找映射 H_2^{-1} 来使

$$(\hat{\mathbf{x}} = H_2^{-1}(\mathbf{b})) \cup (H(\hat{\mathbf{x}}) = \mathbf{b}) \quad (3)$$

目前, 误差分散逆半调方法主要分为滤波方法、机器学习方法和最优化估计方法 3 类。其中滤波方法和机器学习方法通常以式 (2) 为标准求解逆半调图像, 而最优化估计方法则通常以式 (3) 为标准求解。

3 逆半调技术的研究现状

逆半调技术的研究始于 20 世纪 90 年代。由于半调过程为多对一映射, 因此逆半调过程没有唯一解, 即给定一幅半调图可得到多种不同的逆半调图, 这是一种不适定问题^[3] (ill-posed problem)。逆半调技术在实际工作中具有典型的应用价值, 而针对不同图像, 如何在自适应抑制半调噪声的同时, 保持图像细节则是解决逆半调问题的难点。

3.1 滤波方法

误差分散半调引入的噪声主要集中在高频, 因此低通滤波是最直接、最简单的逆半调方法, 常用的低通滤波器有: 半带低通滤波器 (halfband low-pass)^[4]、高斯低通和基于 SVD (singular value decomposition) 的低通滤波器^[5], 但是低通滤波在去除噪声的同时, 也会损失图像的边缘和纹理信息, 使逆半调图像模糊。为此 Luo 等人提出基于子带的逆半调算法^[6], 引入噪声衰减和导向滤波 (oriented filter-

ring) 来处理高频子带区域; Xiong 等人将非正交小波引入逆半调^[7], 由于小波分解可以得到全频率子带, 因此通过选择高频子带上的有用信息能弥补低通滤波方法的不足; 其改进方法见文献 [8]。小波方法虽不要求已知误差分散核, 且逆半调图像的峰值信噪比 (PSNR) 较高, 但是, 由于它至少需要 17 个较大的滤波器, 还需备份 9 幅图像, 此外所有运算都基于浮点运算, 因此, 时、空复杂度较高。为此, 文献 [9] 提出了一种快速逆半调算法, 即利用各种线性、非线性滤波器分两步进行逆半调, 以抑制噪声和增强图像边缘; 文献 [10] 也采用了类似的思路, 不同之处在于抑制噪声的滤波器对误差分散的“有界循环 (limit cycles)”人工纹理更有效。以上滤波方法虽能得到视觉效果较好的逆半调图像, 但其参数需通过反复实验确定。因此, 许多学者又致力于自适应逆半调算法的研究^[11-14]。这些研究是先利用 LMS (least mean square) 算法, 用线性滑动窗口滤波器 (smoothing window filter SWF) 模拟半调图像来重建逆半调图像的逆误差分散滤波器, 并称该滤波器为 SWF^[11]; 然后基于图像的局部标准差, 设计了空间变化的后处理算法, 其能在不损失边缘信息的前提下, 消除平滑区域的“小亮块和小暗块”噪声。为更好地重建图像, 文献 [11] 还提出了图像分类方法^[12], 即用针对不同图像的多个 SWF 代替统一的 SWF, 使逆半调图像有较大的改善, 但是图像存在模糊性, 很难精确对其分类; 另外, 利用不同图像生成的 SWF 滤波器也不尽相同。Oscar 等人将低通滤波后的图像作为“目标参考”图, 结合空域不变线性滤波器和空域自适应变化滤波器进行逆半调^[13], 该算法不进行边缘检测, 其自适应滤波器对平滑区域的滤波程度较大, 而对边缘区域的滤波程度则较小。文献 [14] 则通过构造仅有一个控制参数的一系列滤波器来针对图像内容自适应地进行逆半调。

Kite 等人将误差分散的量化因子等效为线性增益和不相关噪声的和^[15], 文献 [16] 在该模型的基础上, 提出了 WVD (wavelet-vaguelette deconvolution) 算法, 该算法首先进行反卷积, 然后在小波域进行去噪, 其所得逆半调图像在均方误差 (mean square error MSE) 的意义下较现有算法好。

由于人是逆半调图像的最终观察者, 文献 [17] 将人眼视觉系统 (human visual system) 引入逆半调过程, 构造了误差分散逆滤波器, 同时提出了基于 HVS 的逆半调图像评价指标——感知峰值信噪比

(perceived peak signal to noise ratio PPSNR), 该算法简单、快速, 但是由于该误差分散逆滤波器本质上为一低通滤波器, 因此其逆半调图像的边缘较模糊。文献 [18] 也利用人眼视觉特性, 基于区域分割方法解决了存在黑灰区域的图像的逆半调问题。

3.2 机器学习方法

Mese 等人首先提出了基于查找表 (look up table, LUT) 的逆半调算法^[19], 其思路如图 1 所示。设 R 为半调图中一个模板 (template), 且 $|R|$ 表示模板 R 中像素的个数, 则模板共有 $2^{|R|}$ 种可能的样本, 因此如果建立一个 LUT, 它含有所有样本及与样本对应的灰度值 g , 则逆半调图像 $\hat{x}_{i,j} = LUT(b_{i,j} \in R)$, 显然, 因该方法为并行运算, 故速度快。实际上, 在图像训练过程中, 有些样本出现的概率高, 有些低, 有些甚至为 0 此时需根据一定的标准来估计与未出现样本对应的灰度值。对与未出现样本对应的灰度值进行估计及模板 R 的确定是 LUT 逆半调方法的难点。文献 [20] 给出了最优模板的选择方法, 文献 [21] 把 LUT 逆半调算法扩展到彩色图像; 文献 [22] 给出了选择训练图像时应该遵守的原则, 这些原则有利于提高逆半调图像的质量。Chang 等人提出了基于 IMS-MMSE (least mean square minimum mean square error) 的逆半调算法^[23], 虽然基于 MMSE 准则建立 LUT 的过程与 Mese 提出的方法相似, 但是利用 IMS 算法估计半调图到连续色调图像的映射, 能较准确地估计与未出现样本对应的连续色调值。为节省存储空间, Mese 等人又提出了基于树型结构 (tree-structured) 的 LUT 逆半调方法^[24]。为改善逆半调图像的边缘效果, 文献 [25] 提出了基于 ELUT (edge-based look up table) 的逆半调算法, 它基于 Mese 的 LUT 逆半调算法, 首先得到初始逆半调图像 B , 然后对 B 进行边缘检测, 并将其中的边缘分为规则边缘和非规则边缘两类, 前者包括水平边缘、垂直边缘、对角边缘和角边缘共 33 种; 后者包括含 0 个像素的边缘、含 1~4、5~8、9~12 和 13~16 个像素的边缘共 5 类; 最后根据半调模板和边缘类型建立 ELUT, 并将含有一个索引值的 LUT 推广到含有两个索引值的 ELUT, 所得逆半调图像质量虽较以前算法有很大提高, 但是当某些样本未出现时, 该算法仍然采用 Mese 提出的策略或文献 [23] 提出的 IMS 策略来估计与未出现样本对应的连续色调值。

基于 LUT 的逆半调算法需要选择最优的模板, 并且模板中像素的个数最多不超过 19 为克服以上

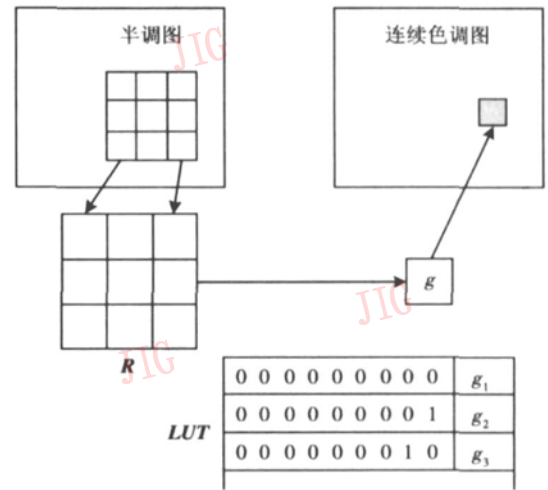


图 1 LUT 逆半调算法思想示意图

Fig 1 Scheme of LUT inverse halftoning

缺点, Kim 等人提出了基于决策树的逆半调算法^[26], 该算法不仅能自动确定样本对应的灰度值, 而且即使初始模板的尺寸很大也不影响决策树的性能。

由于神经网络有很强的非线性逼近能力, 因此能够很好地模拟误差分散的逆过程。文献 [27] 针对误差分散图像, 建立了 3 层 RBF 神经网络用来逼近半调图到连续色调图的映射; 为提高逆半调图像的质量, 还建立了基于边缘信息的多层感知器 (multi-level perceptron, MLP) 神经网络, 用来对逆半调图进行后处理。该算法较 Mese 的 LUT 算法的计算量大, 但是它不仅节省了存储空间, 而且逆半调图像的质量也有所提高。为进一步改善逆半调图像的视觉效果, 文献 [27] 还提出了基于单层感知器 (single-layer perceptron, SLP) 神经网络的半调算法, 并把 SLP 半调与 RGF+MLP 的逆半调过程结合起来共同训练, 因而所得半调图、逆半调图的边缘更清晰。

3.3 最优化估计方法

文献 [28] 首先把低通滤波后的半调图像作为初始逆半调图像, 然后基于 MAP (maximum a posteriori) 投影, 逐步迭代求解最优逆半调图像。该方法假设已知误差分散核, 但实际应用中通常不知道误差分散核, 为解决这一问题, 文献 [28] 将误差分散核的估计看成是系统识别问题, 将核估计和逆半调过程结合起来反复进行迭代, 直到逆半调图像最优, 类似的算法见文献 [29]、[30], 它们把逆半调问题转化为带约束的最优化问题进行求解。文献 [31] 将 ICM (iterated conditional modes) 引入逆半调领域, 其能克服文献 [30] 采用最陡下降法求解时产生

的震荡。郑海红等人基于误差分散的线性增益模型,构造了预处理滤波器^[32],并基于矩阵运算进行迭代,不仅克服了文献[30]以误差分散核为先验的缺点,而且降低了时、空复杂度。

文献[33]提出了基于凸集上投影 (projection onto convex sets, POCS)的逆半调算法,该算法假设误差分散核已知,若根据先验信息,应用集合理论构造两个约束集,并把半调图像在凸集上进行投影运算,则能得到逆半调图像的可行解,其中一个为空域集合,另一个为频域集合。Bozkurt等人分别在空域、频域和尺度(小波)域构建了凸集合^[34],其不仅能重建灰度逆半调图像,而且能重建彩色逆半调图像,其他改进算法见文献[35]。

4 3类算法的分析与比较

以上介绍了3类误差分散逆半调算法,现以高斯滤波方法、LUT逆半调算法和MAP算法为例,对

3类算法进行分析。

图2为3种算法的逆半调处理结果,从测试结果图来看,高斯滤波的结果图较为模糊,不仅图像细节保留得不够理想,而且图中的滤波纹理较为明显;LUT算法较高斯滤波算法效果好,且图像细节保持较好,虽然仍旧遗留有点状噪声,但不是非常明显;而MAP算法的效果最好,其处理后的图像不仅清晰,而且细节保留得很好,没有滤波纹理,且过渡自然,和原图最接近。其原因在于:高斯滤波没有直接针对误差分散算法的特性来处理问题,只是依据数字信号处理知识去除噪声,该方法可用于其他含噪图像的恢复。由于LUT方法是通过建立半调图与连续色调图的映射关系来进行逆半调,因此图像较能忠实于原图。MAP算法由于先将图像看作马尔可夫随机场,然后对图像中的每一个像素用最陡下降法寻找最优值,同时也将误差分散过程作为最优化的约束条件,因此该算法的效果图比前两种算法的效果图更接近原图。

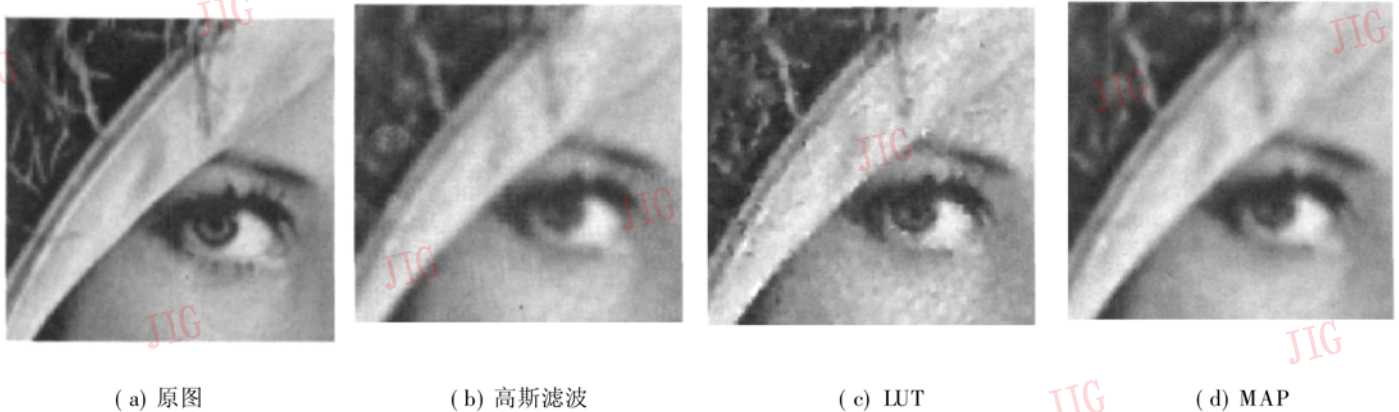


图 2 3种逆半调算法的结果图
Fig 2 Results of 3 inverse half-toning algorithms

从运行时间来看,高斯滤波需要0.11s,虽然LUT的建立需要大量时间,但基于LUT的逆半调仅需1.25s,而MAP逆半调平均每次迭代需54s,7次收敛。可见基于最优化估计的逆半调最耗时。

通过上述分析,可得出以下结论:对于给定的一幅半调图像,在没有任何先验信息的情况下,通常选择滤波方法进行处理,虽然滤波方法的时、空复杂度低,有利于实际应用,但大多数滤波方法保持图像细节的能力较差。机器学习方法通常利用查找表、神经网络、决策树等数学工具来建立半调图到连续色调图的映射关系,这种方法虽执行速度快,适用于各种半调图,但由于在进行逆半调前,必须用一些参考图像作为训练样本来对系统进行训练学习,因此需

要较长的启动时间。最优化估计方法需要已知一些先验信息,如半调图的类型、半调核(误差分散核或有序抖动矩阵)等,以便于建立半调图到连续色调图的精确映射,虽然该方法产生的逆半调图像视觉效果最好,但是算法通常要基于迭代运算,复杂度较高。而且要基于先验假设,在实际应用中有时不太合理。

5 存在的问题和研究前景

由于逆半调问题为一种逆问题,因此求解难度较大,尽管越来越多的人投身到逆半调技术的研究,并取得了一些成绩,但许多问题仍有待进一步研究。

其中包括:

(1) 基于 HVS 的自适应逆半调算法的研究还不够。由于半调图通常在暗区域或亮区域存在“虫”状人工纹理,且灰度渐变区域存在“有界循环”噪声,而人眼在某些情况下对此又非常敏感,因此逆半调过程必须考虑 HVS 的影响;另外,在实际应用中,很难辨别图像具体使用的半调技术,且不同打印/印刷机厂家的半调技术也不同,当给定半调图像时,开发一种能够自动选择参数、基于局部运算,且能有效保持图像细节的逆半调算法,是今后研究的重要目标。

(2) 基于模糊理论的逆半调方法尚未发现。在图像处理中,目标在投影成像过程中,由于各种因素的影响,造成了目标的像与干扰具有某种程度的相似性;其次,受成像期间空间分辨率及各种光照条件的影响,致使目标像的边界与背景之间像素灰度具有中间过渡的性质,即目标物的边界具有模糊性。另外,对图像底层处理结果的解释也带有一定的模糊性,加之逆半调是一个不定问题,要解决这类问题需要一定的先验知识。由于问题的复杂性,不可能完全搞清楚造成信息不足的原因,对图像具有的这种先验知识在很多情况下无法用经典的精确数学语言来描述,因此利用模糊信息处理技术来解决有其内在的必然性和合理性。例如,对于某些自适应滤波方法,如果引入模糊逻辑确定其参数,则将能有效提高逆半调图像的质量。

(3) 彩色逆半调方法的研究较少。由于彩色图像提供了比灰度图像更为丰富的信息,因此彩色图像的处理正受到人们越来越多的关注。现有的大多数逆半调算法都是针对灰度图像,而彩色逆半调算法则几乎都是基于利用灰度逆半调算法分通道处理的思想,由于逆半调效果较差,即通常存在大量彩色“斑点”,因此考虑彩色图像各通道之间的相关性的矢量逆半调方法仍需进一步研究。此外,四色、七色等打印机的出现,势必推进彩色逆半调技术的研究。

(4) 逆半调图像的评价体系尚未得到充分研究。到目前为止,已出现了大量逆半调算法,在评价逆半调图像质量时,虽常使用峰值信噪比 (PSNR),因为它的数学表达式简单且意义明确,但是仅采用 PSNR 测度并不能准确地评价逆半调图像质量。现有文献提出的质量评价体系绝大多数都只应用于图像压缩编码和视频技术,文献 [36] 针对误差分散逆半调图提出了一种评价体系,虽然其在一定程度上

反映了逆半调图像质量的优劣,但是该系统不能用于彩色图像评价。此外,当某指标算法 1 优于算法 2 而另一指标算法 2 优于算法 1 时,该系统仍无法评价逆半调图像的质量。由此可见,完善的逆半调图像评价体系,有利于高质量逆半调算法的提出。

(5) 针对扫描误差分散图像的逆半调算法的研究还不够。目前,绝大多数逆半调算法均是针对未经打印的半调图提出的,Chao 等人曾尝试分别对打印机/扫描仪建模,并分别对去除扫描噪声、打印噪声和半调噪声进行逆半调^[37]。由于建模过程中某些因素被忽略,致使所得逆半调图仍有噪声。由于该算法只适用于灰度图像,现有扫描图像的逆半调算法又多针对印刷图像^[38],因此开展针对扫描彩色误差分散半调图的逆半调算法的研究具有实用价值。

参考文献 (References)

- 1 Ulichney R. Digital Halftoning [M]. Cambridge, UK: the MIT Press, 1987.
- 2 Castleman K R. Digital Image Processing [M]. Englewood Cliffs, MA, US: Prentice-Hall, 1996 [Castleman K R 著,朱志刚等译.数字图像处理 [M].北京:电子工业出版社,1998]
- 3 Bakushinsky A, Goncharsky A. Ill-posed Problems: Theory and Applications [M]. Kluwer Academic, 1994.
- 4 Wong P W. Inverse halftoning and kernel estimation for error diffusion [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1995, 4(4): 486~498.
- 5 Hei S, Zakhor A. Halftone to continuous-tone conversion of error-diffusion coded images [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1995, 4(2): 208~216.
- 6 Queiroz D, Ricardo L, Luo J, et al. Method and Apparatus for Wavelet-Based Universal Halftone Image Unscreening [P]. US 5799112, 1998-08-25.
- 7 Xiong Zrxiang, Othard M T, Ramchandran K. A wavelet-based approach to inverse halftoning [A]. In: Proceedings of the SPIE Conference-The International Society for Optical Engineering [C], San Jose, CA, USA, 1997, 3018: 89~100.
- 8 Xiong Zrxiang, Othard M T, Ramchandran K. Inverse halftoning using wavelets [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1999, 8(10): 1479~1483.
- 9 Danera V N, Kite T D, Venkataraman M, et al. Fast blind inverse halftoning [A]. In: Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing [C], Chicago, IL, USA, 1998, 2: 64~68.
- 10 Shen M Y, Kuo C C J. A robust nonlinear filtering approach to inverse halftoning [J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2001, 12(1): 84~95.
- 11 Chen L M, Hang H M. An adaptive inverse halftoning algorithm [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1997, 6(8): 1202~1209.

- 12 Chang P C, Yu C S. Neural net classification and LMS reconstruction to halftone images[A]. In Proceedings of the SPIE Conference-The International Society for Optical Engineering[C], San Jose, CA, USA, 1997, **3309**: 592~ 602
- 13 Au O C, Fu M S, Wong P H W, *et al*. Hybrid inverse halftoning using adaptive filtering[A]. In Proceedings of IEEE International Symposium on Circuits and Systems VLSI[C], Piscataway, NJ USA, 1999, **4**: 259~ 262
- 14 Kite T D, Danera V N, Evans B L, *et al*. A fast high quality inverse halftoning algorithm for error diffused halftones[J]. IEEE Transactions on Image Processing 2000, **9**(9): 1583~ 1592
- 15 Kite T D, Evans B L, Bovik A C, *et al*. Digital halftoning as 2-D delta-sigma modulation[A]. In Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing[C], Los Alamitos, CA, USA, 1997, **1**: 799~ 802
- 16 Neelamani R, Nowak R, Baraniuk R. Model-based inverse halftoning with wavelet-vagulette deconvolution[A]. In Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing[C], Piscataway, NJ USA, 2000, **3**: 973~ 976
- 17 Zhang X H, Liu F, Jiao L C. An effective image halftoning and inverse halftoning technique based on HVS[A]. In Proceedings of IEEE Fifth International Conference on Computational Intelligence and Multimedia Applications[C], Los Alamitos, CA, USA, 2003: 441~ 445
- 18 Zheng Haihong, Wang Yifeng, Kong Yueping, *et al*. Inverse halftoning based on efficient noise remove from dark area[J]. Systems Engineering and Electronics 2006, **28**(2): 306~ 309 [郑海红, 王义峰, 孔月萍等. 有效抑制黑灰区域噪声的逆半调算法[J]. 系统工程与电子技术, 2006, **28**(2): 306~ 309.]
- 19 Mese M, Vaidyanathan P P. Look up table (LUT) inverse halftoning[A]. In Proceedings of IEEE International Symposium on Circuits and Systems[C], Geneva, Switzerland 2000, **4**: 517~ 520
- 20 Mese M, Vaidyanathan P P. Template selection for LUT inverse halftoning and application to color halftones[A]. In Proceedings of IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing[C], Piscataway, NJ USA, 2000, **4**: 2290~ 2293
- 21 Mese M, Vaidyanathan P P. Look-up table (LUT) method for inverse halftoning[J]. IEEE Transactions on Image Processing 2001, **10**(10): 1566~ 1578
- 22 Kong Y P, Zeng P. Inverse halftoning for error diffusion based on pattern recognition and look-up table[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument 2004, **25**(S4): 177~ 181
- 23 Chang P C, Yu C S, Lee T H. Hybrid LMS-MMS inverse halftoning technique[J]. IEEE Transactions on Image Processing 2001, **10**(1): 95~ 103
- 24 Mese M, Vaidyanathan P P. Tree-structured method for LUT inverse halftoning and for image halftone[J]. IEEE Transactions on Image Processing 2002, **11**(6): 644~ 655
- 25 Chung K L, Wu S T. Inverse halftoning algorithm using edge-based look-up table approach[J]. IEEE Transactions on Image Processing 2005, **14**(10): 1583~ 1589
- 26 Kim H Y, de Queiroz R L. Inverse halftoning by decision tree learning[A]. In Proceedings of International Conference on Image Processing[C], Piscataway, NJ USA, 2003, **3**: II-913~ 916
- 27 Huang W B, Chang W C, L Y W, *et al*. Halftone/contone conversion using neural networks[A]. In Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing[C], Piscataway, NJ USA, 2004, **5**: 3547~ 3550
- 28 Ping W W. Inverse halftoning and kernel estimation for error diffusion[J]. IEEE Transactions on Image Processing 1995, **4**(4): 486~ 498
- 29 Schweizer S M, Stevenson R L. A Bayesian approach to inverse halftoning[A]. In Proceedings of the SPIE Conference-The International Society for Optical Engineering[C], San Jose, CA, USA, 1993, **1913**: 282~ 292
- 30 Stevenson R L. Inverse halftoning via map estimation[J]. IEEE Transactions on Image Processing 1997, **6**(4): 574~ 583
- 31 Ho K C. Iterated conditional modes for inverse halftoning[A]. In Proceedings of IEEE International Symposium on Circuits and Systems[C], Piscataway, NJ USA, 2004, **3**: III-901~ 904
- 32 Zheng Haihong, Zeng Ping. Improved inverse halftoning method via maximum a posteriori[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University 2005, **39**(12): 1340~ 1343, 1357 [郑海红, 曾平. 基于最大后验概率的逆半调改进算法[J]. 西安交通大学学报, 2005, **39**(12): 1340~ 1343, 1357.]
- 33 Thao N T. Set theoretic inverse halftoning[A]. In Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing[C], Los Alamitos, CA, USA, 1997: 783~ 786
- 34 Bozkurt G, Cetin A E. A set theoretic inverse halftoning method for grayscale and color images[A]. In Proceedings of the SPIE Conference-The International Society for Optical Engineering[C], San Jose, CA, USA, 1998, **3653**: 151~ 159
- 35 Unal G B, Cetin A E. Restoration of error-diffused images using projection onto convex sets[J]. IEEE Transactions on Image Processing 2001, **10**(12): 1836~ 1841
- 36 Zhao Yuan, Zeng Ping. Image quality assessment based on an inverse halftoning for error-diffused model[J]. Computer Engineering and Application 2004, **40**(34): 75~ 77 [赵媛, 曾平. 误差分散类逆半调图象的质量评价方法[J]. 计算机工程与应用, 2004, **40**(34): 75~ 77.]
- 37 Chao T Y, Hang H M. Inverse halftoning of scanned images[A]. In Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing[C], Los Alamitos, CA, USA, 1995, **3**: 420~ 423
- 38 Han Y, Kim J K, Kim M. A new moire smoothing method for color inverse halftoning[A]. In Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing[C], Piscataway, NJ USA, 2002, **1**: 820~ 823