

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2017.03.006

图像逆半色调技术研究

张 燕^{1,2}, 张二虎^{1,3}

(1. 西安理工大学 机械与精密仪器工程学院, 陕西 西安 710048; 2. 中国人民武装警察部队学院 边防系, 河北 廊坊 065000; 3. 西安理工大学 印刷包装与数字媒体学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 逆半色调技术是将半色调图像转换为连续调图像的一项特殊的数字图像恢复技术,是半色调图像转换加网、数字化档案管理、高精度图像识别的关键环节。本文旨在系统介绍逆半色调技术的发展以及所采用的核心技术,为该技术的深入研究和推广应用提供参考。从半色调图像生成及逆半色调图像转换流程出发,阐述了逆半色调技术的基本机理,对各种逆半色调算法中采用的核心技术进行了总结,根据算法采用的核心技术提出了逆半色调技术的分类框架。在此基础上,对逆半色调图像处理中已提出的算法进行分类和全面回顾,并从客观评价和主观评价两个方面对具有代表性的逆半色调算法进行了性能评测。通过分析逆半色调技术研究中存在的不足,从开展模型化算法研究、深入机器学习逆半色调研究、拓宽彩色逆半色调图像处理和提升图像质量评价性能四个方面指出了该项技术的未来研究方向。

关键词: 半色调图像;逆半色调技术;图像恢复;图像质量评价

中图分类号: TP391.7

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2017)03-0282-08

A review of inverse halftoning techniques

ZHANG Yan^{1,2}, ZHANG Erhu^{1,3}

(1. School of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Department of Border-control and Immigration, Chinese People's Armed Police Force Academy, Langfang 065000, China; 3. School of Printing, Packaging Engineering and Digital Media Technology, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Inverse halftoning is the restoration of a continuous image with 256 discrete levels from a halftone-distributed dot pattern. Recovering gray level image is a critical process for the halftone transform, the digital archives management and the high precision identification of halftone. This paper presents a comprehensive review of published inverse halftoning algorithms. Firstly, we present the basic mechanism model of inverse halftoning based on outputting the halftone pipeline. Then, we develop a taxonomic framework by the key techniques of inverse halftoning methods. Following the taxonomy, published researches on inverse halftoning are reviewed, with their performances evaluated by subjective and objective indicators. Finally, the shortcomings of the presented algorithms are analyzed with future directions for research suggested, which includes modeling algorithm, machine learning, color image inverse halftoning and restored image quality evaluation.

Key words: halftone image; inverse halftoning; image restoration; image quality assessment

半色调技术是将连续调图像加网转换成二值图像,使其满足在二值设备上成像的数字图像处理技术。这项技术结合了人眼视觉系统的低通特性,使

变换获得的半色调图像不因有限二阶色调的影响,在一定距离下观察呈现连续调图像视觉效果。图像半色调处理解决了连续调图像在有限阶调设备输

收稿日期: 2016-07-13

基金项目: 西安市科技计划资助项目(2017080CG/RC043(XALG020))

作者简介: 张燕,女,副教授,博士生,研究方向为机器视觉与智能信息处理。E-mail:zhangyanxq@163.com

通讯作者: 张二虎,男,教授,博导,研究方向为图像处理、模式识别与智能信息处理。E-mail:eh-zhang@xaut.edu.cn

出、显示和传输的问题,主要应用于印刷工业、数字出版系统、LED显示以及二值图像压缩等领域^[1]。

20世纪九十年代,图像硬拷贝设备种类不断丰富、性能逐步提高,半色调技术得到了深入应用,出现了大量的半色调图像。在对半色调图像进行加工处理过程中,通用的图像缩放、旋转、特征提取、分割、压缩等数字图像处理技术不能够直接应用于半色调图像上,专业的图像处理软件包括 Adobe Photoshop 也尚无提供针对半色调图像进行上述处理的功能,因此对半色调图像的加工处理需要将其转换为连续调图像。另外,在纸制图像数字化和数字出版系统等实际应用中也需要将半色调图像转换为高质量的连续调图像,才能实现对半色调图像进行转换加网和印刷图像反演、压缩储存等操作。这项能够将半色调图像转换为连续调图像的技术就应运而生了,被称为逆半色调图像处理技术。

逆半色调技术是图像硬拷贝输出和输入的关键技术,属于图像恢复研究领域的一个重要分支。该项技术得到了美国、韩国、日本、印度、台湾地区以及我国等国家的高校及研究机构的高度重视^[2-3],在 IEEE Transactions on Image Processing、Optics Letters、Signal Processing、中国图象图形学报等国内外知名期刊上不断有相应研究内容的报道。本文在文献调研的基础上,对逆半色调技术的基本机理、分类方法以及核心算法进行了梳理和研究,分析了该项技术存在的关键问题,并指出了未来研究方向。

1 逆半色调图像转化的基本机理

为了将连续调图像通过打印机、印刷机、打样机、制版机等硬拷贝设备输出,必须通过半色调方法将图像转换成仅有 0 和 1 的二值图像(0 代表黑,1 代表白)。从图像处理的本质上讲,半色调的过程是特殊的图像二值转化,生成的图像利用人眼视觉系统的低通特性,在一定观察距离下,仍然具有连续调图像的效果。但在实际的传输、存储中,半色调图像是一类具有二值信息的特殊模态图像。为了提高对半色调图像的处理能力,增强对半色调图像的高精度识别,需要解决的关键问题就是如何将半色调图像恢复成连续调图像。在实际应用中,半色调和连续调图像转换的基本流程见图 1,连续调图像 $c(x, y)$ 通过数字加网的过程 H 得到数字半色调图像 $h(x, y)$ 。 $h(x, y)$ 在不同的硬拷贝设备输出,再经过扫描设备二次输入转化为的数字图像记为 $h'(x, y)$ 。根据在印刷工业和数字出版等领域的实际应用需求,图像的逆半色调转化中,待恢复的图像

出现了 $h(x, y)$ 和 $h'(x, y)$ 两种情况。一般来讲,将未经硬件设备输出和扫描的数字半色调图像 $h(x, y)$ 直接转化为对应的连续调图像称为数字逆半色调。这种变换不包含硬件设备输出和二次输入过程中引起的噪声、图像形变、灰度和对比度等方面变化的影响,是一种相对理想的图像恢复环境。数字逆半色调技术的实际应用不仅仅涉及数字印刷中的转换加网,更多地是在二值图像压缩、传真、互联网图像传输和无线数据传输等方面得到应用。

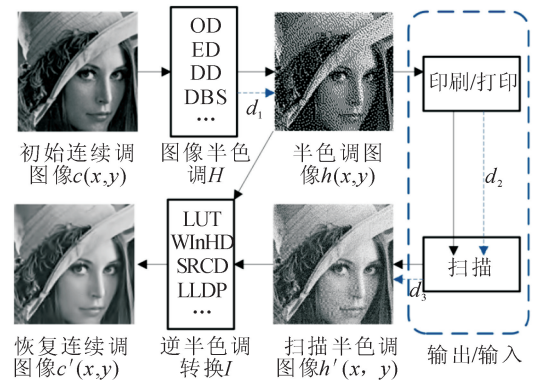


图 1 半色调与逆半色调转化流程

Fig. 1 Flowchart of the inverse half-toning from halftone

另外,在印刷工业中,将数字图像 $h'(x, y)$ 进行逆半色调恢复时,不仅要构建数字逆半色调模型,还需要考虑硬拷贝输出和扫描输入过程的模型。从信号分析的角度研究,逆半色调的过程就是产生尽可能与原始连续调图像相似的恢复图像 $c'(x, y)$,可以表示为:

$$c'(x, y) = I\{S[P(h(x, y))]\} \quad (1)$$

其中 P 和 S 分别表示打印和扫描模型, I 表示逆半色调处理。

在对初始连续图像半色调变换、图像输出、二次输入三个阶段的处理中,待恢复图像 $h'(x, y)$ 均受到了噪声的影响,分别是半色调转换噪声 d_1 、打印噪声 d_2 和扫描噪声 d_3 。 $c(x, y)$ 经过半色调处理,变换得到的图像 $h(x, y)$ 是由二值的网点或元素点构成,这就改变了原始连续调图像的空间和频谱特性,引入了半色调噪声。不同的半色调处理方法,引入的半色调噪声 d_1 的特征也有所差异,见图 2。图中(a)为连续调 Lena 图像,(b)~(e)是分别采用四类半色调算法转化的半色调图像,(f)~(j)是(b)~(e)经过 DFT(Discrete Fourier Transform)变换的频谱图,(k)~(o)是对应频谱图的三维曲线图。从空域分析,可以发现不同的半色调图像中网点分布规律存在差异,利用抖动模板转化的半色调图像(b)和(c)具有周期的变化规律,尤其是聚集网点抖

动法产生的半色调图像(b)出现明显的周期性噪声,对应的频谱图(g)和频谱曲线图(l)中在中高频段呈现了强度较大的周期性噪声。利用误差扩散法ED和直接二值搜索法(Direct Binary Search, DBS)

生成的半色调图像,元素点在图像空间域中不再呈现周期性分布,见图 2 的(n)和(o)。这类噪声在频域也没有呈现周期性,但中高频谱能量出现从低到高逐步增强的特点。

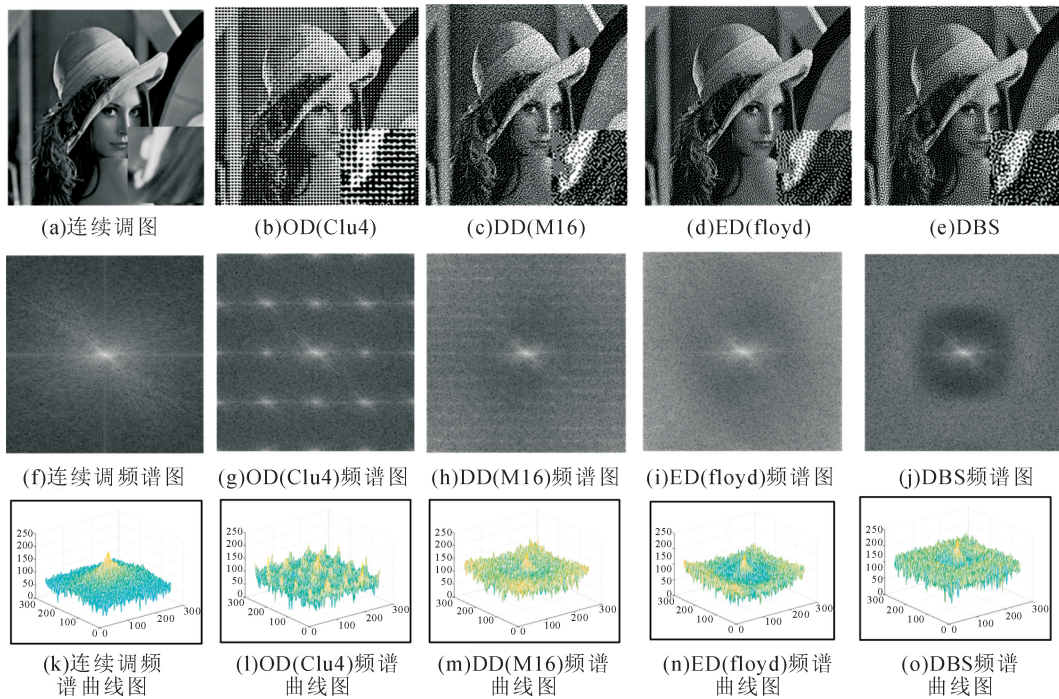


图 2 半色调噪声示意图
Fig. 2 Halftone denoise

在整个半色调图像处理中,硬拷贝设备输出和二次扫描输入对图像的噪声影响也不容忽视,图 3 是本文总结的半色调图像输出\输入噪声模型图。

空间存在映射关系,可用于输出\输入图像的颜色(灰度)校正。通过分析半色调过程中噪声对图像的影响,以及相关模型的研究,有助于增强逆半色调算法设计的针对性,更加有的放矢的进行逆半色调图像变换。

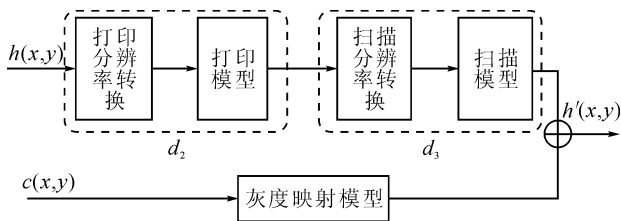


图 3 半色调图像输出\输入噪声模型框图
Fig. 3 Scheme of noise model for output and input halftoning image

在打印过程中,噪声 d_2 除了半色调图像和打印机分辨率转换引起的像素插值以外,打印的墨点往往大于像素栅格,造成黑色墨点向周围邻域扩散侵入的点增益现象构成了打印环节主要的噪声成分。二次输入扫描时,仍然存在扫描分辨率转换。扫描仪器在采集图像时,采样点的值和周围像素是紧密相关的,文献[4-5]中指出可以采用低通滤波器来进行模拟。除此以外,实现连续调图像打印输出和二次扫描过程中,图像色彩空间和输出\输入设备色彩

2 逆半色调方法分类

图像半色调过程中存在量化的过程,即出现了 N 级阶调量化为 0 或 1 的处理,是一个多对一的运算过程。相反,运用逆半色调方法恢复连续调图像中就会出现一对多的对应关系,也就是说可以恢复的逆半色调图像可能出现多种情况,从数学的角度分析,这是一种不适定问题(ill-posed problem)^[6-7]。在已提出的逆半色调算法中,如何解决图像恢复过程中的不适定性,在抑制加网噪声前提下准确刻画边缘、纹理和角形等重要几何结构信息,成为了逆半色调技术研究的重点。按照采用的核心技术不同,本文将逆半色调算法分为了五类:滤波法、反褶积法、矢量法、迭代法和机器学习法。

2.1 基于滤波的方法

半色调技术的基础是依据人眼视觉的低通特

性,因此一般低通滤波是实现逆半色调转换的最简单的方法,如高斯低通滤波、巴特沃兹低通滤波等。运用低通滤波器可以消除图像中大部分半色调加网噪声,但同时图像的边缘、纹理等高频特征也会因低通滤波变得模糊。为了能够处理半色调过程中引起的非线性量化的影响,自适应、非线性低通和变换域等滤波技术在逆半色调技术中得到了应用。

将自适应滤波方法应用到逆半色调变换主要包括自适应滤波器设计和控制信号输出两个关键环节。Chen等^[8]通过图像局域方差将图像块训练集分类,利用最小均方误差方法优化获得一组具有不同权值的滤波器,根据待转换图像信息控制滤波参数进行自适应地逆半色调处理。为了进一步保护恢复图像的边缘、纹理等细节信息,Kite等^[9]引入了多尺度梯度估计方法,在大小不同的两个尺度下计算待恢复半色调图像水平和垂直两个方向的梯度,共同作为控制函数的输出,用于估计一组空间可变的线性滤波器参数,并在控制函数中强调了大尺度梯度的作用,用于抑制网点的小尺度噪声在平滑区域的影响。文献^[10-12]将上述算法扩展到彩色半色调图像的逆变换处理中。Freitas等^[13]将随机步长模型与一组线性滤波器结合对点扩散类半色调图像进行了逆变换研究,该方法依赖于固定加网模板和其对应的灰度区间,算法的泛化能力有限。

逆半色调自适应滤波方法的基础处理是线性滤波,为了考虑半色调过程中引起的非线性量化误差,一种基于空间秩序二值置换的非线性滤波器用于逆半色调图像变换中^[14-15]。该算法是根据半色调图像二值元素在固定观测窗中空间位置和秩序排列,获得多集置换矩阵,通过置换矩阵优化确定滤波参数并重构半色调的连续图像。该算法主要针对有序抖动类图像进行逆半色调处理,将其应用于误差扩散类图像时,非线性滤波器的边界条件就不再适用,需要通过扩展观察向量来重新产生权重系数。另外,非线性滤波方法应用在扫描输入的半色调图像的逆变换中。Chao等^[16]针对提出的打印和扫描模型,在逆半色调变换中分别计算了获得两个模型的参数进行逆变换。Siddiqui采用了分辨率合成去噪(Resolution Synthesis-based Denoising, RSD)和SUSAN(Smallest Univalve Segment Assimilating Nucleus)非线性滤波结合,有效地消除了打印图像再次扫描产生的摩尔纹现象^[17]。

在研究中运用多尺度小波变换进行逆半色调变换,获得了较好的图像恢复效果^[32]。Xiong等^[18]采用非正交小波变换,一方面将高通小波变换图像中

提取到的半色调图像边缘信息与低通信息一起用于逆半色调变换,以加强恢复图像中的细节信息;另一方面还利用高通小波图像具有多尺度相关性,消除低通图像中半色调加网噪声。该算法既加强了图像纹理和边缘信息的保护又消除了平滑区域半色调噪声的影响。

2.2 基于反褶积的方法

使用反褶积方法进行逆半色调变换,是将半色调加网过程模拟为在连续调图像上的某种滤波过程,通过消除滤波影响,即可恢复原来的连续调信号,即反褶积是一种逆滤波过程。基于傅里叶谐波、小波分解、Shearlet变换和局域多项式近似的反褶积方法在逆半色调技术中得到了应用^[19-22]。Foi^[22]采用了各项异性反褶积策略,在各个方向下运用局域多项式近似(Local Polynomial Approximation, LPA)算法和交叉置信区间(Intersection of Confidence Intervals, ICI)尺度选择算法进行自适应可变尺度预测,从而进行连续图像估计。

2.3 基于矢量的方法

Lai^[23]将矢量量化方法应用到了逆半色调变换研究中,提出了基于分类矢量量化(Classified Vector Quantization, CVQ)的半色调图像压缩算法,在编码和解码过程中设计两个码书,两个码书间通过码字索引建立关系,从而获得连续调图像。该方法应用在半色调图像有损压缩中可以直接存储重构连续图像的压缩形式,不再需要对恢复图像进行再压缩。

2.4 基于迭代的方法

在逆半色调变换中,最优化估计迭代方法得到了研究者广泛的关注^[24-26]。Stevenson等^[25]将一种非线性迭代重构技术应用到了逆半色调研究中,提出了非高斯的基于马尔科夫随机场先验图像模型和最大后验概率结合的逆半调方法。Bayesian理论亦被引入到了逆半色调变换中,先针对不同类型半色调图像运用LMS优化图像像素位置的支持区域的大小和形状,然后在这个区域提取黑色像素出现的概率,进而当前位置输出灰度值为具有最大概率点的灰度值^[26]。

另外,将凸集投影方法应用到逆半色调变换中,将半色调加网过程模拟为特殊的非线性退化模型,把未知图像假设为一个希尔伯特(Hilbert)空间的元素,由先验知识或约束限制希尔伯特空间中的封闭凸集解,引入幅度边界条件(0~255),导出恢复图像的迭代函数。由初始的连续调图像开始迭代,按照模拟误差逐次修正恢复图像^[27]。

2.5 基于机器学习的方法

随着查表法在逆半色调图像转换中被深入研究,神经网络、稀疏表示字典学习等机器学习方法也得到了广泛关注。Mese 等^[28]在逆半色调研究中运用了 LUT(Look-up Table)方法。该方法将特定类半色调图像以及相应连续调图像分块形成训练集,然后通过训练建立半色调与连续调图像之间的映射关系,用于逆半色调恢复。针对查表法的关键问题,文献[29-33]中对 LUT 逆半色调算法进行了改进。在选择二值模板大小和形状研究方面,Mese^[29]采用递归方法求取与半色调图像相关性最大的二值模板,并探讨了彩色图像逆半色调变换中不同色调之间二值模板值间的关系。文献[30-31]中对构建表的对应关系进行了细化,将训练图像块的纹理、边缘信息与图像块的像素值一起建立表,在逆半色调变换的映射关系中加强了细节信息的恢复能力。另外,一些研究从减少表存储容量、提高学习算法效率方面对逆半色调查表算法进行了改进^[32-33]。

将图像的半色调和逆半色调过程概括为一种特殊的神经网络模型,通过训练网络获取相应的加网和去网参数,实现图像半色调与连续调之间的转换。Jimenez^[34]在研究中采用基于 Backpropagation (BP)算法的多层感知机神经网络进行逆半色调变换,亦得到较高质量的恢复图像。

Son 等^[35-36]将稀疏表示的字典学习方法应用于逆半色调技术研究,以解决在图像去网过程中消除网点噪声与保护纹理、边缘等细节信息相冲突这个关键问题。Son^[36]提出的基于联合字典学习的逆半色调算法的基本框架包含基于稀疏表示的字典学习和逆半色调图像恢复两个部分。字典学习部分主要是将半色调图像和对应的连续调图像分块形成训练集 \mathbf{Y}^c 和 \mathbf{Y}^h ,运用 K-SVD 或 MOD 方法进行信号稀疏表示和超完备字典 \mathbf{D}^c 和 \mathbf{D}^h 学习。目标函数可表示为:

$$\min_{\mathbf{D}^c, \mathbf{D}^h, \mathbf{X}} \{ \|\mathbf{Y}^c - \mathbf{D}^c \mathbf{X}\|_2^2 + \|\mathbf{Y}^h - \mathbf{D}^h \mathbf{X}\|_2^2 \} \text{ s. t. } \forall i, \|\mathbf{x}_i\|_0 \leq T = \min_{\mathbf{D}, \mathbf{X}} \{ \|\mathbf{Y} - \mathbf{D}\mathbf{X}\|_2^2 \} \text{ s. t. } \forall i, \|\mathbf{x}_i\|_0 \leq T \quad (2)$$

式(2)中 $\mathbf{Y} = [\mathbf{Y}^c; \mathbf{Y}^h] \in \mathbf{R}^{2n \times N}$,表示将训练集的两个样本集连接在一起, $\mathbf{D} = [\mathbf{D}^c; \mathbf{D}^h] \in \mathbf{R}^{2n \times K}$ 表示超完备字典连接,具有相同稀疏系数 $\mathbf{X} = \{\mathbf{x}_i\}_{i=1}^N \in \mathbf{R}^{K \times N}$ 。在逆半色调变换中,给定一幅待恢复的半色调图像 \mathbf{H} ,可以通过在训练过程中获得的 \mathbf{D}^c 和 \mathbf{D}^h 进行重构, $\mathbf{H} = \mathbf{D}^h \mathbf{X}$,其中 \mathbf{X} 可以通过最小化以下目标函数获得:

$$\forall i \min_{\mathbf{x}_i} \|\mathbf{x}_i\|_0 \text{ s. t. } \|\mathbf{R}_i \mathbf{H} - \mathbf{D}^h \mathbf{x}_i\|_2^2 \leq \epsilon^2 \quad (3)$$

\mathbf{R}_i 是一个 $n \times M$ 的矩阵,可以提取半色调图像中的第 i 个图像块。这样可以使用正交匹配追踪法 (OMP) 解式(3),得到优化的稀疏系数 \mathbf{x}_i ,未知的连续调图像 \mathbf{C} 可以由如下公式直接计算获得:

$$\mathbf{C}^* = \min_{\mathbf{C}} \sum_i \|\mathbf{R}_i \mathbf{C} - \mathbf{D}^c \mathbf{x}_i\|_2^2 = \frac{\sum_i \mathbf{R}_i^T \mathbf{D}^c \mathbf{x}_i}{\sum_i \mathbf{R}_i^T \mathbf{R}_i} \quad (4)$$

式(4)中显示未知连续调图像 \mathbf{C} 可以由待恢复的半色调图像优化获得的稀疏系数 \mathbf{x}_i 和通过训练获得的连续调空间的超完备字典 \mathbf{D}^c 重构。随后,为了进一步强调恢复图像中的纹理、边缘等细节信息, Son 又提出了局域字典的学习方法。由多组字典中对应结构信息的字典进行逆半色调图像变换,恢复的连续调图像的纹理细节信息得到了进一步加强。

3 逆半色调算法评测

针对不同的半色调图像类型,不同的应用领域,所提出的逆半色调方法的研究模型、方法和关键技术亦各异。本节对提出典型逆半色调算法的重要文献进行总结,并对各类算法进行性能评价。

3.1 代表性文献总结

本节根据第 2 节的分类方法,从发表时间、逆半色调处理的半色调图像类别、图像类型、算法涉及核心技术以及是否需要先验知识等方面对综述中文献进行了归纳总结,见表 1。

从时间上讲,上世纪九十年代,逆半色调研究主要采用的是滤波法、矢量法和迭代法,并形成了比较成熟的研究模型。到本世纪初,逆半色调研究中引入了反褶积方法。该类方法是将加网过程看作一个特定滤波核对连续图像的卷积以及有色噪声组成的线性模型,由此逆半色调处理就是在一定约束下消除滤波影响获得清洁信号的一种逆滤波过程。从本世纪初开始,查表法、神经网络法等机器学习方法在逆半色调研究得到了深入应用,近几年基于稀疏表示字典学习的逆半色调算法获得了高质量的恢复图像。

从核心技术上讲,各类算法体现了对逆半色调问题解决的不同思路。滤波法中的自适应滤波主要涉及多组滤波器系数的确定以及控制函数输出的关系;在非线性滤波中应用到能够反映二值像素空间位置和秩序关系的二值置换滤波器的构造。在迭代逆半色调方法中,在已知加网参数的先验条件下,运用 MMES、MAP 等估计方法逐次迭代优化恢复图像;在机器学习的逆半色调方法中引入查表法、神经网络法通过训练建立半色调和连续调图像关系,进而获得恢复图像。

表 1 按照文中提出的分类方法对综述文献进行汇总
Tab. 1 Summary of methods for inverse halftoning based on proposed taxonomy

分类法	文献	算法简称	发表时间	核心技术	适用对象		先验知识
					半调类别	图像类型	
滤波法	自适应	[9] [13] Fast_IH RWFL	2000 2011	多尺度梯度估计,多组空间可变的线性滤波 随机步长模型,分段线性滤波器	ED OD	数字 数字	图像类别 加网参数
	非线性	[14] PBPF	1994	二值置换滤波	DD	数字	图像类别
		[15] BPF	1995	二值置换滤波	ED	数字	图像类别
[16] SMB/DIM		1995	构建打印和扫描模型	—	扫描	无	
[17] RSD-SUSAN		2007	分辨率合成去噪,SUSAN 非线性滤波	—	扫描	无	
变换域	[18] Wavelet	1999	非正交小波变换,跨尺度相关去噪	ED	数字	加网参数	
反褶积法	小波分解	[19] [20] Wavelet-V WInHD	2000 2002	基于模型的 wavelet-vagueleue 反褶积 反向卷积和小波域尺度收缩处理	ED ED	数字 数字	加网参数 加网参数
	多项式近似	[22] LPA-ICI	2004	局域多项式近似和交叉置信区间尺度选择	ED	数字	加网参数
矢量法	[23] CVQ	1998	分类矢量量化	ED	数字	图像类别	
迭代法	优化估计	[24] Kernel [25] MAP [26] Bayesian	1995 1997 2011	误差滤波核估计,最大后验投影 马尔可夫随机模型,最大后验估计 贝叶斯理论	ED OD,ED OD,ED,DD	数字 数字 数字	加网参数 加网参数 图像类别
	凸集投影	[27] POCS	2000	凸集投影	OD,ED,DD	数字	图像类别
机器学习法	查表法	[28] LMS-MMSE	2001	LSM 滤波,MMSE 建表	OD,ED	数字	图像类别
		[29] LUT	2001	查表法	OD,ED,DD,etc.	数字	图像类别
		[32] TLUT	2002	树结构存储表	OD,ED,DD,etc.	数字	图像类别
		[30] ELUT	2005	边缘信息增强的查表法	OD,ED,DD,etc.	数字	图像类别
		[31] VLUT	2011	纹理信息增强的查表法	OD,ED,DD,etc.	数字	图像类别
神经网络	[34] RBFNN	2008	单层感知机和径向基网络	ED	数字	图像类别	
稀疏表示	[35] GRDP	2012	稀疏表示,字典学习	ED	数字	图像类别	
	[36] LLDP	2014	分组字典学习,图像块融合	ED	数字	图像类别	

从适用对象上讲,逆半色调处理对象的类别和类型也不尽相同。图像类型是指逆半色调方法接收的输入图像是数字或扫描的半色调图像。由表 1 可见,针对扫描图像的逆半色调方法主要集中在滤波方法研究中,主要有 SMB/DIM^[16] 和 RSD-SUSAN^[17] 两种方法,其他方法的输入图像类型均为数字半色调图像。逆半色调方法处理的半色调图像类别也受到算法本身一定条件的限制,一些算法仅适合特定类半色调图像的逆变换处理,这类算法往往需要特定类半色调图像的加网参数,如滤波法的 RWFL^[13] 方法、迭代法的 Kernel^[24] 方法等。

3.2 对算法性能的客观评价

为了测试综述文献中各类逆半色调算法的性能,本文依据综述文献中所提出算法使用的客观评价方法,对一些代表性的算法进行了实验,分别从图像质量、计算复杂度以及所使用的训练和测试集的角度进行了归纳总结,以便能够提供各类算法性能的纵向比较。从算法实现的角度分析,逆半色调算法可以分为由待恢复图像直接转换和通过一定训练集优化学习获取系统参数再进行转换两种过程。在

逆半色调算法中使用的训练集图像基本来源于网上收集,没有通用的图像训练集,只有在查表法中使用了 Mese 提出的包含 30 幅图像的训练集^[37]。逆半色调算法测试的图像集通常使用的是数字图像处理中经典图像,包括 Lena、Peppers、Airplane、Goldhill 等。在此基础上,现有逆半色调算法的客观评价方法是借鉴通用图像质量评价的相关指标,包括均方误差 (Mean Squared Error, MSE)、峰值信噪比 (Peak Signal-to-noise Ratio, PSNR) 和结构相似度 (Structural Similarity, SSIM)^[38],其中 PSNR 是各类逆半色调算法比较通用的图像质量评价指标。可以看出,在滤波法中相较于非线性滤波和变换域滤波,自适应滤波逆半色调算法恢复的连续调图像的 PSNR 较高。反褶积和基于稀疏表示字典学习的逆半色调方法恢复的连续调图像的 PSNR 比其他逆半色调算法均高。在查表法逆半色调算法中,由于各种算法是在相同的训练集和测试集上进行评价,通过客观评价指标 PSNR,比较好地反映了查表法算法的逐步改进。

对于算法的复杂度评价,计算机视觉中一般使

用时间复杂度和空间复杂度进行度量,逆半色调算法的复杂度评价常用的是空间复杂度,即算法运行时按需申请的内存空间。通过空间复杂度反映, Fast_IH^[9], WInHD^[20] 和查表类^[29-32]方法计算复杂度低,属于快速、高效的逆半色调图像恢复方法。

3.3 对算法性能的主观评价

对逆半色调图像的主观评价是最常用和最直接的质量评价方法,主要是通过观察者根据经验或规定的评价尺度对图像做出判断和评价。针对典型的逆半色调算法,本文在误差扩散类半色调图像上进行了测试,实验结果见图4。

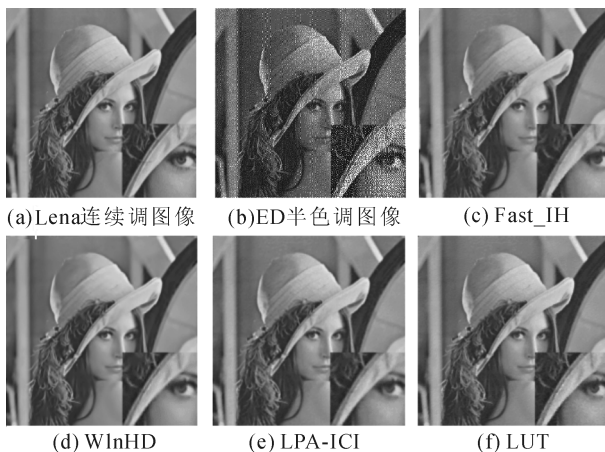


图4 逆半色调算法结果比较

Fig. 4 Result comparison of inverse halftoning

图4(a)为测试图像Lena的连续调图像,(b)为对应的误差扩散图像,(c)~(f)是四种典型的逆半色调算法恢复的连续调图像。可见,WInHD^[20]和LPA-ICI^[22]反褶积算法恢复图像视觉效果最接近原始连续调图像,平滑区域去除网点噪声的效果最佳, Fast_IH^[9]自适应滤波逆半色调法恢复图像的质量次之,LUT查表法^[29]得到的逆半色调图像在平滑区域可见比较明显的网点噪声,并存在一些不连续阶调信息。从纹理、边缘等细节角度观察, Fast_IH^[9]和LUT^[29]逆半色调算法恢复的连续调图像中细节信息更丰富、清晰。

4 未来研究方向

随着半色调技术在印刷、显示、传真等硬拷贝设备上的广泛应用,逆半色调图像恢复成为半色调图像转换加网、数字档案管理、半色调图像高精度识别中的必不可少的环节。在已发表的文献中,提出了一些高效、快速、精度较高的逆半色调图像算法,获得了人眼视觉感官度较好的恢复图像,但在理论研究和实际应用中还存在以下问题。

1) 逆半色调问题的研究角度还需扩展。现有的研究中,大多数算法将图像半色调过程看作是一种特定的系统噪声,但在实际应用中各类半色调算法系统模型是未知的,半色调加网参数加难以确定,这就给逆半色调系统去噪参数确定带来了困难。

2) 模型化逆半色调算法缺少研究。逆半色调研究主要以误差扩散类半色调图像为对象展开。在已提出的算法中,仅查表法和迭代优化法能够针对所有类别的半色调图像进行恢复,其它类别算法缺少模型化算法研究。

3) 彩色图像的逆半色调算法的研究有待深入。现有的逆半色调的研究多集中在对灰度图像恢复的处理,文献[22]中讨论了彩色图像的逆半色调变换,但仅仅是将彩色图像R、G、B三个通道分别逆半色调处理再进行合成,获得连续调彩色图像。

4) 逆半色调图像质量的评价方法单一。由此,逆半色调算法需要在以下几个方面开展深入研究:

4.1 半色调图像分类识别

逆半色调算法的研究包括系统识别和逆半色调处理两个部分。对半色调图像类别的识别是逆半色调变换的前提,也是关键的环节。只有准确地判别待恢复半色调图像的类别,甚至是更精确地估计某个半色调类别中某种具体加网方法参数,才能切实提高逆半色调算法的精度。

4.2 基于机器学习的逆半色调算法研究

查表法、神经网络等机器学习方法已经应用到了逆半色调研究中。近几年基于稀疏表示的字典学习方法在逆半色调图像恢复也取得了较好的效果。将逆半色调问题归纳为半色调图像与连续调图像的不同模态图像恢复,在一定规模的训练样本集上进行学习。在给定观察向量下,运用学习得到的逆半色调转换模型恢复连续调图像,是逆半色调算法研究的未来方向之一。

4.3 彩色逆半色调图像算法研究

在实际应用中,大部分待处理图像是彩色图像,因此彩色逆半色调算法研究是该项技术实用化推广的必然环节。选择合适的色彩空间模型,在特定模型通道上或寻找不同色调之间的关联性进行逆半色调处理是彩色逆半色调图像恢复研究的重要方面。

4.4 逆半色调图像的质量评价

在目前的逆半色调研究中,对恢复的连续调图像的质量评价问题关注较少,通常使用通用的图像质量主客观评价方法,常常不符合人眼视觉特性评价,或不符合算法性能的实际情况。另外,针对扫描半色调图像,由于二次输入的位置和形状的变化,全

参考型的图像质量评价方法已不再适用,所以研究满足人眼视觉特性的半参考或无参考型逆半色调图像评价方法,也是提高逆半色调图像算法性能的必然保证。

逆半色调技术是半色调图像深入推广应用的关键技术之一。在已开展的逆半色调研究的基础上加强模型化、系统化的算法开发,增强逆半色调算法系统学习能力,拓宽逆半色调图像恢复在彩色图像上的应用,提升对逆半色调图像质量评价是进一步深入研究的方向。

参考文献:

- [1] NEUHOFF D I, PAPPAS T N. Perceptual coding of images for halftone display [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1994, 3(4): 341-354.
- [2] 郑海红, 孔月萍, 曾平, 等. 误差分散类逆半调技术综述 [J]. *中国图象图形学报*, 2008, 13(1): 1-6.
ZHENG Haihong, KONG Yueping, ZENG Ping, et al. A review of inverse halftoning algorithms for error diffusion [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2008, 13(1): 1-6.
- [3] MICELI C M, PARKER K J. Inverse halftoning [J]. *Journal of Electronic Imaging*, 1992, 1(2): 143-151.
- [4] 刘欣. 扫描输入逆半调方法研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2009.
LIU Xin. Research on inverse halftoning of scanned image [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2009.
- [5] 王娜. 扫描图像逆半调恢复研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2008.
WANG Na. Research of inverse halftoning for scanned image [D]. Xi'an: Xidian University, 2008.
- [6] BAKUSHINSKIY A, GONCHARSKY A. Ill-posed problems: theory and applications [M]. Netherlands: Springer Science & Business Media, 2012.
- [7] LAVRENT'EV M M, ROMANOV V G, SHISHATSKII S P. Ill-posed problems of mathematical physics and analysis [M]. USA: American Mathematical Society, 1986.
- [8] CHEN Liming, HANG Hsuehming. An adaptive inverse halftoning algorithm [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1997, 6(8): 1202-1209.
- [9] KITE T D, DAMERA-VENKATA 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.
- [10] KEKRE H B, SANGE S R, KOLHE A K, et al. Restoration of color halftone image by using fast inverse half toning algorithm [C]//2009 International Conference on Advances in Recent Technologies in Communication and Computing, 2009: 650-656.
- [11] GUO J M, CHEN J H. Inverse halftoning with variance classified filtering [C]//2009 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, 2009: 1293-1296.
- [12] CHANG P C, YU C S, LEE T H. Hybrid LMS-MMSE inverse halftoning technique [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2001, 10(1): 95-103.
- [13] FREITAS P G, FARIAS M, ARAUJO A. Fast inverse halftoning algorithm for ordered dithered images [C]//2011 24th SIBGRAPI Conference on Graphics, Patterns and Images (Sibgrapi), 2011: 250-257.
- [14] KIM Y T, ARCE G R. Inverse ordered dithered halftoning using permutation filters [C]//Image Processing (ICIP-94), IEEE International Conference, 1994: 1017-1021.
- [15] KIM Y T, ARCE G R, GRABOWSKI N. Inverse halftoning using binary permutation filters [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1995, 4(9): 1296-1311.
- [16] CHAO T Y, HANG H M. Inverse halftoning of scanned images [C]//International Conference on Proceedings of the Image Processing, 1995: 420-423.
- [17] SIDDIQUI H, BOUMAN C A. Training-based de-screening [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2007, 16(3): 789-802.
- [18] XIONG Zixiang, ORCHARD M T, RAMCHANDRAN K. Inverse halftoning using wavelets [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1999, 8(10): 1479-1483.
- [19] NEELAMANI R N, NOWAK R, BARANIUK R. Model-based inverse halftoning with wavelet-vaguelette deconvolution [C]//2000 International Conference on Image Processing, 2000: 973-976.
- [20] NEELAMANI R, NOWAK R D, BARANIUK R G. WInHD: Wavelet-based inverse halftoning via deconvolution [DB/OL]. <https://scholarship.rice.edu/handle/1911/20144/>, 2002, 10: 1-22.
- [21] EASLEY G R, PATEL V M, HEALY D M. Inverse halftoning using a shearlet representation [J]. *Proceedings of SPIE* 2009, 7446.
- [22] FOI A, KATKOVNIK V, KAREN E, et al. Inverse halftoning based on the anisotropic LPA-ICI deconvolution [C]//Proceedings of The 2004 International Ticsp Workshop on Spectral Methods and Multirate Signal Processing, Smmsp 2004: 49-56.
- [23] LAI J Z C, YEN J Y. Inverse error-diffusion using classified vector quantization [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1998, 7(12): 1753-1758.
- [24] WONG P W. Inverse halftoning and kernel estimation for error diffusion [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1995, 4(4): 486-498.
- [25] STEVENSON R L. Inverse halftoning via MAP estimation [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1997, 6(4): 574-583.
- [26] LIU Y F, GUO J M, LEE J D. Inverse halftoning based on the Bayesian theorem [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2011, 20(4): 1077-1084.
- [27] MESE M, VAIDYANATHAN P P. Optimized halftoning using dot diffusion and methods for inverse halftoning [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2000, 9(4): 691-709.

(下转第 315 页)

- nal of Xi'an Jiaotong University, 2012, 46(1): 86-90.
- [9] 刘善慧,梅雪松,杜喆,等. 放卷张力系统解耦控制器的设计 [J]. 西安交通大学学报, 2012, 46(9): 55-59.
LIU Shanhui, MEI Xuesong, DU Zhe, et al. Decoupling controller design for unwinding tension system [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2012, 46(9): 55-59.
- [10] 肖超. 凹版印刷机张力控制系统的研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2010.
XIAO Chao. Tension control system of gravure printing machine [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2010.
- [11] 钟亮,包能胜,于文平. 模糊自适应 PID 控制在凹版印刷机收卷张力控制中的应用 [J]. 轻工机械, 2012, 30(4): 65-68.
ZHONG Liang, BAO Nengsheng, YU Wenping. Application of fuzzy self-adaptive PID control for winding tension process control in gravure printing machine [J]. Light Industry Machinery, 2012, 30(4): 65-68.
- [12] 王瑞超,孙宇,胥小勇. 基于模糊神经网络的薄膜收卷锥度张力控制系统 [J]. 化工自动化及仪表, 2013, 40(3): 316-320.
WANG Ruichao, SUN Yu, XU Xiaoyong. Research of cone tension control system in film winding based on fuzzy-neural network [J]. Control and Instruments in Chemical Industry, 2013, 40(3): 316-320.
- [13] 张永芳,畅亚利,高阳阳,等. 模糊自抗扰控制在凹印机放卷张力中的应用 [J]. 西安理工大学学报, 2015, 31(2): 144-149.
ZHANG Yongfang, CHANG Yali, GAO Yangyang, et al. Fuzzy ADRC applied in gravure press tension control system [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2015, 31(2): 144-149.
- [14] SONG S, SUL S. A new tension control for continuous strip processing line [J]. IEEC Transactions on Industry Applications, 2000, 36(2): 633-639.
- [15] 张海燕,徐金苓. 凹印机变频收卷张力控制系统建模研究 [J]. 轻工机械, 2010, 28(4): 60-63.
ZHANG Haiyan, XU Jinling. Research on modeling frequency conversion winding tension control system in gravure press [J]. Light Industry Machinery, 2010, 28(4): 60-63.
- (责任编辑 王绪迪)

(上接第 289 页)

- [28] MESE M, VAIDYANATHAN P P. Look-up table (LUT) method for inverse halftoning [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2001, 10(10): 1566-1578.
- [29] MESE M, VAIDYANATHAN P P. Template selection for LUT inverse halftoning and application to color halftones [C]//2000 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (2000 ICASSP), 2000: 2290-2293.
- [30] CHUNG K L, WU S T. Inverse halftoning algorithm using edge-based lookup table approach [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2005, 14(10): 1583-1589.
- [31] HUANG Y H, CHUNG K L, DAI B R. Improved inverse halftoning using vector and texture-lookup table-based learning approach [J]. Expert Systems with Applications, 2011, 38(12): 15573-15581.
- [32] MESE M, VAIDYANATHAN P P. Tree-structured method for LUT inverse halftoning and for image halftoning [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2002, 11(6): 644-655.
- [33] 孔月萍,曾平,何波,等. LUT 与 Elman 网络相结合的图像逆半调算法 [J]. 中国图象图形学报, 2007, 12(11): 1988-1991.
KONG Yueping, ZENG Ping, HE Bo, et al. Inverse halftoning algorithm based on look up table and Elman network [J]. Journal of Image and Graphics, 2007, 12(11): 1988-1991.
- [34] JIMENEZ F P, ROLDAN L R, MIYATAKE M N, et al. Inverse halftoning using a multilayer perceptron neural network [C]//2012 22nd International Conference on Electrical Communications and Computers, 2012: 202-206.
- [35] SON C H. Inverse halftoning based on sparse representation [J]. Optics Letters, 2012, 37(12): 2352-2354.
- [36] SON C H, CHOO H. Local learned dictionaries optimized to edge orientation for inverse halftoning [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2014, 23(6): 2542-2556.
- [37] MESE M, VAIDYANATHAN P P. More example images [DB/OL]. <http://www.systems.caltech.edu/mese/halftone/>, 2002, 11.
- [38] WANG Zhou, LU Ligang, BOVIK A C. Video quality assessment based on structural distortion measurement [J]. Signal Processing: Image Communication, 2004, 19(2): 121-132.
- (责任编辑 王绪迪)