

数字图像复原技术综述

沈 垠 李舜酩 毛建国 辛江慧

(南京航空航天大学能源与动力学院, 南京 210016)

摘 要 数字图像复原的目的是将所观测到的退化图像恢复到退化前的原始图像,该恢复过程在很多图像处理应用中至关重要。近年来,图像复原技术虽已得到广泛研究,但仍有值得改进之处。为了使该领域的研究人员对当前各种图像复原方法有较全面的了解,在众多技术文献中选取了具有典型性的 95 篇来对各种图像复原方法进行分类综述。首先通过对复原技术问题的描述,揭示了复原技术的数学背景;其次以数字图像复原技术发展为主线,将复原方法归结为两大类进行详细讨论。一类是经典图像复原方法,另一类是现代图像复原方法。前者反应复原技术背景与发展过程,后者体现复原技术的发展趋势与面临的困难。最后,在总结全文的基础上,指出在今后进一步研究中值得关注的 7 项问题。

关键词 数字图像复原 模糊辨识 神经网络 正则化 小波 支持向量机

中图法分类号: TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-8961(2009)09-1764-12

Digital Image Restoration Techniques: A Review

SHEN Huan, LI Shun-ming, MAO Jian-guo, XIN Jiang-hui

(College of Energy & Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016)

Abstract The goal of digital image restoration is to reconstruct an original scene from a degraded observation. This recovery process is critical to many image processing applications. The digital image restoration approaches has been thoroughly studied in recent years. This problem, however, still has numerous research possibilities. In order to give people a comprehensive knowledge of digital image restoration, some typical approaches are presented and discussed in this paper based on 95 references selected from various literatures in this field. We first describe problems in the digital image restoration and discuss its mathematics background. And then, the review is divided into two parts and discussed thoroughly, according to the development of digital image restoration approaches. One is the classical image restoration approaches, and the other is the modern ones. The former is developed based on the objective that provides an overview on the basic principles and methodologies behind the existing algorithms, and the later is arranged to examine the current trends and the potential of this challenging problem. After the survey is discussed in detail, we make a conclusion for this paper and follow by addressing 7 key issues which remain open in this field.

Keywords digital image restoration, blur identification, neural network, regularization, wavelet, support vector machines

1 引 言

数字图像复原技术(以下简称复原技术)是数

字图像处理的重要组成部分。

最早的复原技术研究可以追溯到 19 世纪 50 至 60 年代早期美国和前苏联的空间项目。恶劣的成像环境、设备的振动,飞行器旋转等因素使图像产生

基金项目:国家自然科学基金项目(50675099);江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(CX08B_044Z);江苏省自然科学基金项目(BK2007197)

收稿日期:2007-10-18;**改回日期:**2008-07-15

第一作者简介:沈 垠(1980 ~),男。南京航空航天大学车辆工程专业博士研究生。主要研究方向为数字图像复原,图像处理与模式识别,智能车辆信号检测与分析。E-mail:huan_shen@nuaa.edu.cn

不同程度的退化。在当时的技术背景下,这些退化造成了巨大的经济损失。为此,业内人士围绕着解决退化问题展开了复原技术的研究。

复原技术早期的成果主要归功于数字信号处理领域中一些技术和方法的引入,例如逆滤波技术。随后一些学者发现退化问题可以利用状态空间、ARMA(auto regressive and moving average model)模型、非线性参数辨识、自适应理论等方法很好地描述和解决,这些方法都具有典型的现代控制技术特点。控制技术在复原技术领域的成功应用推进了复原技术的发展。目前,一些现代方法极大地丰富了复原技术的研究内容,典型的有小波分析,神经网络等。复原对象也不再是单一的灰度图像,彩色图像复原技术的研究得到了重视;应用领域也不再局限于空间探测,而是扩大到了医学、通信、天文、艺术、气象、消费电子等诸多领域,成为各界人士广泛关注的焦点。这些成果意味着复原技术的发展已进入相对成熟的阶段。

本文以复原技术的发展为主线,将其大体归结为经典复原技术和现代复原技术两大部分进行分类讨论。在第1部分当中,首先介绍复原技术的一些相关概念,给出图像退化问题的数学描述,接着从3个方面讨论经典复原技术的发展,揭示复原问题中的关键技术和常规的解决方法,并讨论其各自的优缺点;在第2部分当中,讨论目前比较流行的几种方法在复原技术中的应用情况。反映复原技术的发展现状和趋势。考虑到彩色图像复原问题的特殊性,也归入到该部分进行讨论;最后,对复原技术的研究方法进行总结与展望。

2 图像复原问题的描述

各种退化因素的存在使现有的图像系统都存在某种程度的缺陷。这些退化可以归结为两类:(1)空间退化,又称为模糊。成像系统中某些元件失常、图像传感器与成像目标之间的相对移动、摄像机失焦,不良天气影响等因素都会造成模糊。(2)点退化,通常指噪声。最常见的点退化来自于电子元件或数字化噪声。

与数字图像增强技术不同,图像复原的目的是将观测到的退化图像,以最大的保真度,恢复到退化前的状态。研究内容主要是对退化图像中的模糊和噪声进行建模,通过逆向过程来估计原始图

像。这种估计往往是近似的,通过某种最佳准则作为约束的。而图像增强技术则是以提高图像的视觉效果,增强可观赏性为目的,处理过程中未涉及退化模型。

如图1所示,图像退化过程可以被模型化为一个退化函数和一个加性噪声项,共同作用于原始图像 $f(x,y)$,产生一幅退化的图像 $g(x,y)$ 。给定 $f(x,y)$,退化因子 H 和噪声 $n(x,y)$ 的一些先验知识,便可以获得原始图像的一个近似估计 $\hat{f}(x,y)$ 。

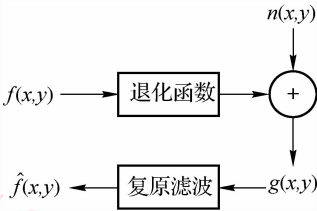


图1 基本图像退化/复原模型

Fig. 1 Basic model of digital image degradation and restoration

根据该模型,退化图像的数学描述为

$$g(x,y) = H[f(x,y)] + n(x,y) \tag{1}$$

如果用2维冲击函数 δ 表示 $f(x,y)$,即令

$$f(x,y) = \int\int_{-\infty}^{\infty} f(\alpha,\beta)\delta(x-\alpha,y-\beta)d\alpha d\beta \tag{2}$$

假设 H 是线性的,把式(2)代入式(1)得

$$g(x,y) = \int\int_{-\infty}^{\infty} f(\alpha,\beta)H\delta(x-\alpha,y-\beta)d\alpha d\beta + n(x,y) \tag{3}$$

若记

$$h(x,\alpha;y,\beta) = H\delta(x-\alpha,y-\beta) \tag{4}$$

式(3)变为

$$g(x,y) = \int\int_{-\infty}^{\infty} f(\alpha,\beta)h(x,\alpha;y,\beta)d\alpha d\beta + n(x,y) \tag{5}$$

若 H 是空间不变的,式(5)又可以表达成式(6)

$$g(x,y) = \int\int_{-\infty}^{\infty} f(\alpha,\beta)h(x-\alpha,y-\beta)d\alpha d\beta + n(x,y) \tag{6}$$

式(6)的卷积形式为

$$g(x,y) = f(x,y) ** h(x,y) + n(x,y) \tag{7}$$

式中, $h(x,\alpha;y,\beta)$ 表示系统对脉冲函数的响应,因此被称作系统的点扩展函数(PSF)。**表示2维

卷积。式(5)为移变连续模型,式(6)是空间不变连续模型,式(7)是连续模型的卷积形式。

为便于计算机处理,还需把连续模型离散化。假设 x, y 取 $0, 1, 2, \dots, M-1$, 离散化的退化模型可表示为

$$g(x, y) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{M-1} f(m, n) h(x-m, y-n) + n(x, y) \\ = h(x, y) * f(x, y) + n(x, y) \quad (8)$$

为便于描述,将式(8)改写为矩阵形式:

$$\mathbf{g} = \mathbf{H}\mathbf{f} + \mathbf{n} \quad (9)$$

式中, $\mathbf{f}, \mathbf{g}$ 和 $\mathbf{n}$ 为 $M^2 \times 1$ 维向量, $\mathbf{H}$ 是 $M^2 \times M^2$ 矩阵。

3 经典数字图像复原技术

归结起来,经典复原技术发展主要经历了直接复原法、正则化法,自适应法3个阶段。直接法主要出现在早期的研究中,在目前应用当中已经非常少见。正则化和自适应方法仍沿用至今,其思想渗透在大多数的现代复原技术中,因而称为经典方法。

3.1 直接复原法

直接复原主要包括两种方法:代数法和频率域法。改写式(9)为

$$\mathbf{n} = \mathbf{g} - \mathbf{H}\mathbf{f} \quad (10)$$

用 $\hat{f}(x, y)$ 作为 $f(x, y)$ 的估计,最佳准则选为实际图像与估计的模方,即

$$J < \hat{f}(x, y) \geq \|g(x, y) - \mathbf{H}\hat{f}(x, y)\|^2 \quad (11)$$

显然,复原问题转化为最小二乘法最佳估计问题。

$$\text{即} \quad \frac{\partial J(\hat{f})}{\partial \hat{f}} = \frac{\partial}{\partial \hat{f}} (\mathbf{g} - \mathbf{H}\hat{f})^T (\mathbf{g} - \mathbf{H}\hat{f}) \\ = -2\mathbf{H}^T (\mathbf{g} - \mathbf{H}\hat{f}) \\ = -2\mathbf{H}^T \mathbf{g} + 2\mathbf{H}^T \mathbf{H} \hat{f} = 0 \quad (12)$$

于是有

$$\hat{f} = (\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{g} \quad (13)$$

如果 x 和 y 方向上的采样点数相同,并且 $\mathbf{H}$ 非奇异,式(13)简化为

$$\hat{f} = \mathbf{H}^{-1} \mathbf{g} \quad (14)$$

如 $\mathbf{H}$ 已知,则可以通过退化图像 $\mathbf{g}$ 得到真实图像的最小平方差估计。

利用频率域的方法,可以得到同样的结果。式(8)两边取傅里叶变换,有

$$G(u, v) = H(u, v) G(u, v) + N(u, v)$$

经过变换,有

$$F(u, v) = \frac{G(u, v)}{H(u, v)} - \frac{N(u, v)}{H(u, v)} \quad (15)$$

在噪声未知或不可分离的情况下,可近似取

$$\hat{F}(u, v) = G(u, v) / H(u, v) \quad (16)$$

对式(16)求傅里叶逆变换便可得到退化图像的估计。这一结果实际上可以通过对式(14)求傅里叶变换得到,证明也非常简单。因此,两种方法实质上是统一的。

以下4个模型^[1]常常用来描述模糊退化,代表退化算子。

(1) 运动模糊

$$h(x, y) = \begin{cases} \frac{1}{d} & -\frac{d}{2} \leq x \leq \frac{d}{2}, y=0 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (17)$$

式中, d 表示水平方向的位移。

(2) 大气湍流模糊

$$h(x, y) = K \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right) \quad (18)$$

其中, K 是一个规范化常数,确保模糊为单位体积, σ^2 用来决定模糊的程度。

(3) 相机失焦模糊

$$h(x, y) = \begin{cases} \frac{1}{\pi R^2} & \sqrt{x^2 + y^2} \leq R \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (19)$$

式中, R 表示模糊光圈半径。

(4) 2维模糊

$$h(x, y) = \begin{cases} \frac{1}{d^2} & -\frac{1}{d} \leq x, y \leq \frac{1}{d} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (20)$$

式中, d 必须为奇整数。

直接复原法主要出现在早期的研究中,在当时,常用逆滤波技术来解决这类问题。为了避免求解大尺寸逆矩阵,在复原滤波器的设计当中,迭代法被广泛使用^[2]。例如,Brigham研究了迭代法在逆滤波中的应用问题^[3],Springer则对收敛性问题进行了讨论和证明^[4]。递归法在去卷积中具有特别的计算优势,也得到了充分的研究。文献[5]的贡献是比较了当时流行的递归算法,对其在图像复原中的应用进行了详细的讨论。此外,还提出了一种设计递归滤波器的一般框架。而Hsiao用高阶积累量方法进行2维逆滤波器设计,提出一种最大积累量评

判准则,能够稳定滤波过程^[6]。该方法后来被 Chi 等用于设计图像复原滤波器,实验结果与预期相符合^[7]。

由于复原问题的病态特性,此类复原算法显然不是最优的,在目前的实际应用当中,除一些简单的需求外,已经非常少见。

3.2 正则化方法

从数学角度分析,出现小的扰动便有可能导致方程解的不稳定。在大多数的研究当中,要么忽略噪声影响,要么假设为零均值高斯白噪声,因而在复原过程中,噪声会呈现不同程度的放大。所以,式(8)描述的问题在实际应用时往往是病态的,无法直接求解。针对这个问题,人们研究了许多方法,在已知 $\mathbf{g}$, $\mathbf{H}$ 与 $\mathbf{n}$ 有关知识的前提下,去求原图像的逼近解。在这些方法中,正则化方法最具优势^[8]。它将等式(8)变为带约束条件的优化解,即

$$L(\mathbf{A}, f) = \|\mathbf{g} - \mathbf{H}f\|^2 + \mathbf{A} \|\mathbf{C}f\|^2$$

式中, $\|\mathbf{g} - \mathbf{H}f\|^2$ 代表噪声能量, $\mathbf{C}$ 为高通滤波算子, $\mathbf{A} = \mathbf{A}(f)$ 为正则化参数用以控制噪声能量与高通滤波图像 $\mathbf{C}f$ 能量的空间分布。理论上 $L(\mathbf{A}, f)$ 的最小化,即 $\frac{dL(\mathbf{A}(f), f)}{df} = 0$ 条件下的解 $\hat{f}(x, y)$ 就是原图像 $f(x, y)$ 的最优的逼近解。

人们先后提出过许多不同的正则化方法,例如: Galatsanos 等提出基于均方差(MSE)评判标准的正则化参数选择和噪声变量估计^[9]。Nakano 等提出用权矩阵的方式优化正则化效果,而局部正则化优化权矩阵从迭代过程获得^[10]。Reeves 给出了在限制性条件下,用交叉有效性准则判断正则化最优度的方法^[11]。后来,Reeves 又提出一种改进的交叉有效性准则,扩展到空变的情况^[12]。Molina 等人将等级贝叶斯方法应用到图像复原,提出了一个3步迭代方法。该方法在每个步骤中完成一个正则参数的确定,降低了对噪声先验知识的依赖性^[13]。Leung 提出用 L 曲线作为选取正则化参数的依据,通过实验证明了 L 曲线的曲率与正则化参数的优异性有关。其结论是,当曲率最大化时,取得的参数是最优的^[14]。Fan 等人在人脸识别应用中,将人脸的形状和特征合成一个统计模型,作为正则化先验知识,无论从主观还是客观都取得满意的结果^[15]。关于正则化发展的详细情况,Demoment 给出了综述^[16]。关于正则化参数选择问题,Thompson 等在二次方正则化评判标准下,对代数法和其他一些统计学方法

进行了评估和比较^[17]。

Tikhonov 正则化方法是一个在 L^2 空间的最小方差近似问题,能够平衡精确性和平顺性^[18]。因而被广泛研究,例如:Murli 提出基于 Tikhonov 正则化的维纳滤波方法,能够将复原病态问题转为良态求解^[19]。之后,Barakat 等改进了 Tikhonov 方法,为算法增加了一个关于解的先验模型。与传统模型比较,该模型包含了局部信息,所以效果比较理想。但如果图像中存在不连续,则这种方法不是最佳选择^[20]。Zervalds 等给出的方法,在正则化过程中,可同时处理多个参数。由于正则化参数在频率域确定,该方法可以更好地平衡精确性和平顺性^[21]。Kempen 等将最大似然估计和 Tikhonov 两种正则化方法用于复原共焦显微镜图像中的衍射效应。这两种算法具有非线性特性,都取得了较好的复原效果,但对于具有明显泊松分布噪声时,最大似然估计方法要优于限制型 Tikhonov 方法^[22]。

正则化在解决复原病态问题时往往产生振铃,针对这类问题的研究有很多。其中,Qureshi 提出的方法是用先验知识限制正则化过程,利用卡尔曼滤波进行复原。结果显示该方法可以减少振铃效应^[23]。Biemond 等的解决方法是加入一个确定的关于原始图像的先验知识到原算法中,用图像边缘信息做局部正则化,限制噪声放大与消除振铃。然后,利用凸集投影映射理论(POCS)求解。实验结果证实该方法能有效地减少振铃并抑制噪声放大^[24]。Karayiannis 提出基于 Bayes-Markov 模型的复原方法,用 Markov 先验知识正则化。利用马尔可夫随机场(MRF),图像中的部分破损也得到较好的恢复,且时间响应也比较理想^[25]。

与上一小节讨论的直接法不同,正则化方法凭借自身种种优异特性,有效地解决了若干实际问题。最近, Tikhonov 正则化应用取得了更进一步的发展^[26]。

3.3 自适应复原

自适应方法具有较好的局部特性,在模糊和噪声参数变化的情况下,自适应正则化方法优于非自适应正则化方法,能够克服正则化方法的全局性限制。很多自适应方法仅基于空变平滑算子,在平坦区域的平滑不够。因此,空变自适应方法被广泛提倡。Moulin 等研究了高斯、泊松非线性变换的情况,得出正则化的复杂性与失真率之间的关系。Moulin 把自适应递归复原算法分别用于空变平滑和空变复

原,取得了满意的视觉和测量结果^[27]。You 等用分段平缓图像方法,采用基于度和方向选择的自适应复原方法,来平滑图像的空间模糊,保护边界信息,减少了振铃效应^[28]。Kang 等研究了基于限制性最小方差(CLS)的图像复原方法。该算法突破正则参数以往全局的限制,将信号中的每个点都用于正则化参数选择。由于考虑了局部统计特性,该方法取得了较好的效果^[29]。Berger 等提出一种空变自适应方法^[30-31]。该方法将正则化和幻影抑制约束同时集成到算法当中,利用凸集投影映射方法(POCS)推导解算。这不仅提高了复原质量,还消除了振铃效果。后来 Sezan 的实验又证实了该方法的有效性^[32]。Ogawa 等利用光流来解决复原问题。他为光流表达式增加了一个参数,代表被选流的可靠性,称为可靠性指数。改造后的算法能较好地保护图像边缘信息^[33]。这是一种比较新的思路。

从以上的讨论中可以看出,复原质量在很大程度上取决于研究者对退化过程中先验知识的了解程度和精确性,而在很多实际应用中,退化信息是未知的,必须从观测图像本身估计,这类问题称为盲目图像复原,简称盲复原^[34]。根据复原过程的不同,盲复原问题可分为两类:一类是首先利用观测图像估计点扩展函数,然后根据第一阶段估计到的 PSF,采用经典或者新的复原算法完成复原任务。Leung 等提出一种具有两个阶段的盲复原算法:(1)从退化图像的子图像部分估计功率谱;(2)利用阶段(1)的结果复原图像^[35]。Kang 等建立新的模型,能够适应动态目标^[36]:(1)从背景中获取模糊对象;(2)用功率谱方法估计 PSF 参数;(3)利用维纳滤波复原。该方法的缺点是不能自动识别模糊参数。这类复原算法计算简单,结构清晰,但动态性能较差。另一类是将参数辨识和复原滤波两个过程统一在同一个过程当中完成,因此具有较好的动态性能,但算法结构较复杂,实现困难。有关文献通过计算退化图像的奇值分解(SVD)来完成模糊识别和复原过程^[37]。无需 PSF 和噪声的先验知识,把奇值向量用于估计点扩展函数,用最小奇异值估计噪声。该方法特别适用于低信噪比的空不变情况。仿真和实验结果均证实了该方法的有效性。Moulin 等研究空间自适应盲复原,将图像和 PSF 进行分段平滑,解决了先验知识不充分的问题,具有空间自适应特性。实验表明该方法能够提高复原质量^[38]。Kaveh 等提出一种能够自适应选择正则化参数的方法。在该方法

中,先验信息从上一步的迭代数据中提取,不依赖先验知识,并且每次迭代过程都复原一部分图像。实际上这是用正则化函数取代正则化参数^[39]。

如果从同一原始图像的多幅退化图像中估计退化参数,这类问题即所谓的多通道复原。在低信噪比情况下,利用多幅退化的图像构造复原算法比单幅静态图像复原效果要理想^[40]。针对多光谱退化问题,Hadhoud 提出了一种具有启发性的自适应多通道复原方法,在对退化信息了解较少的情况下同样有效。其思想是:令通道数等于多光谱图像 L 的值,每个通道含有两个并行的自适应滤波器,其工作原理类似于 LP-BP 型神经网络。实验证实该方法优于单通道法,具有较好的振铃和噪声抑制效果,对图像细节也起到了很好的增强和保护作用^[41]。

在各种正则化和复原滤波器的设计与实现当中,常常用到迭代、递归、FFT 变换等费时但单调的操作。这类问题目前有两种解决途径:一是研究快速算法。例如,Joan 等研究提高递归算法效率:(1)通过改善搜索方向来提高收敛速度;(2)在预处理算法中,通过 FIR(finite impact response)滤波结构实现快速自适应迭代^[42]。而 Wu 等人的实现方法与 Joan 不同,并非以提高收敛速度为方式,而是直接对整幅图像进行复原,在大尺寸图像复原时更加突出其有效性。该方法虽然没有从理论上得到证明,但实践效果良好^[43]。Reeves 提出了一种改进的基于快速傅里叶变换(FFT)的复原方法。该方法无需循环卷积假设,也不依赖边缘信息,在保证算法有效性和实时性的同时,还可抑制振铃^[44]。另一方面,可以利用固件或者硬件来实现复原算法,保证其实时性。Ogrenci 等用现场可编程门阵列(FPGA)实现复原算法,从硬件层优化算法,提高了一定的执行效率^[45]。

很多实际问题都属于二值图像复原问题。例如文档、传真、签名、车牌识别等。相关文献给出了介绍^[46]。

4 现代数字图像复原技术

近年来,随着控制理论与数字信号处理技术的迅速发展,复原技术领域出现了一些新的方法和新的趋势。例如:神经网络、小波分析等。

4.1 神经网络法

神经网络多以与经典复原方法结合的形式出

现,在复原中用作参数辨识器和复原滤波器。目前,复原技术中常用的神经网络为基于 Hopfield 的类型,它能够实现快速稳定的收敛,复原精度也非常高^[47]。文献[48]对几个典型的基于 Hopfield 的神经网络复原算法进行了综合性的对比分析。

神经网络具有很强的平行运算能力,非线性映射能力和自适应能力,尤其适合于描述复杂的非线性系统。Wu 等人设计了一种基于神经网络的复原算法^[49]。该方法在复原图像的同时能够保护图像边缘,比传统算法中的拉普拉斯算子视觉效果更佳。Wang 等人研究了基于模式学习的神经网络复原算法。该算法对于噪声消除具有较强的鲁棒性,其并行处理特性改善了算法的实时性^[50]。

Wong 等人使用神经网络方法实现了无需预先指定参数的自适应正则化复原算法。根据不同的噪声类型和空间分布,网络自动调整参数^[51]。Bao 等人用多层感知模型神经网络进行图像复原,实现边缘保护正则化。该方法利用子带编码和人工神经网络感知图像参数,有效地消除了噪声,适用于具有高对比度的图像复原。实验显示,该算法能够保护边缘信息,且鲁棒性较强^[52]。Talevski 等人在研究非线性复原问题时,推导出一个通用的非线性模型,建立了退化图像空间到真实图像空间的映射函数,并用神经网络实现了该算法。实验结果显示,该方法具有较好的动态特性,能较好地纠正非线性失真,对随机噪声具有鲁棒性^[53]。

神经网络的很多优异特性,使其非常适合在复原算法中应用,曾多次被学者认为是最佳复原方法之一。Celebi 等研究将 Lyapunov 方程由离散时域扩展到连续时域神经网络的方法,结果证明了连续时域神经网络是图像复原问题的最佳方法之一^[54]。Sun 在海面特征的测量跟踪时利用到了基于 Hopfield 的神经网络,认为神经网络是目前最适合,也是开发海面特征复原测量系统的最佳途径之一^[55]。

4.2 小波分析法

用小波分析法研究图像复原问题是一项比较新,但受到各界广泛关注的课题。近年来,小波复原成为国内外研究的一个热点方向^[56-58]。多分辨率理论被广泛研究^[59-60],不仅使得噪声抑制^[61]、摄像机失焦^[62]、CTLS(constrained total least squares)正则化^[63]、自适应^[64]等经典方法都可以得到更好的解决,在处理非平稳问题和保护图像边缘信息方面也非常方便和灵活^[65]。

Charles 等人利用小波替换能量密度函数中的梯度算子,不仅改善了纹理提取效果,还消除了多余的迭代步骤,这都得益于小波多分辨率结构特性^[66]。Stephanakis 等用 2 维可分离小波取代传统的平滑算子,改善了平滑效果^[67]。Cao 等人将小波分析用于图像复原,能够及时地反馈图像参数,并进一步指导复原操作^[68]。Premaratne 等人提出了一种用小波分解的方法,能够自动地判断复原是否完成^[69]。Liu 等人将非参数估计理论用于限制正则化过程,进而利用多分辨率理论进行求解。这种估计算法在小波域中得到,属于复杂正则化方法^[70]。

4.3 彩色图像复原

彩色图像处理的兴起主要在于两方面原因的推动:(1)颜色是一个强有力的描绘算子,常常起到简化目标区分的作用,为目标提取提供更加丰富的信息;(2)人可以辨别几千种颜色的色调和亮度,但只能辨识几十种灰度层次。这对于人工分析非常重要。彩色图像又分为全彩色和伪彩色两种,目前的大多数彩色复原方法主要针对伪彩色图像。

由于彩色图像的特殊性——多个彩色通道相关,凸集投影映射方法(POCS)是一个好的协调多通道的方法。Fung 等提出基于 POCS 的伪彩色图像复原方法^[71],充分利用彩色调色板获得复原先验信息,取得了很好的复原效果。之后,Fung 等同样基于 POCS 理论,在不同的实验中^[72-73]得出了相同的结论。最近,Fung 等在研究中将半色调因素考虑在内,将基于 POCS 的彩色复原方法推广到更加普遍的形式^[74]。

目前,彩色数码相机,摄像机普遍使用,促进了彩色复原技术的发展。Lukac 设计了一种双向多级滤波器,能有效除去彩色视频图像中的马赛克,但算法的动态性不佳^[75]。Wu 等的研究则关注算法的动态性能,在连续的动态图像复原中取得了较好的应用^[76]。Plataniotis 等利用 Bayer 模型,设计了一个彩色滤波阵列,可用于自动变焦。该算法直接运行在硬件层,因而降低了成本和设计复杂度,并取得满意的视觉效果^[77]。Jia 等人研究了摄像机非标定缺损信息修复问题。提出的算法能够自动修复视频图像非标定缺损,在摄像机静止或运动情况下都取得了良好效果^[78]。多路视频系统由于视点差异,光源不稳定等因素都会造成光照强度不同。传统的亮度补偿方法效果不佳,需要研究新的彩色修正方法,Shao 等人的研究解决了这类问题^[79]。

4.4 支持向量机与图像分割法

支持向量机(SVMs)是机器学习领域中的一种分类方法,但较传统的方法更为高效。近年来,基于支持向量机的方法出现在图像复原领域中。该方法打破了传统的滤波思路,加入了图像退化的先验知识,利用学习机制来进行图像复原,较为新颖。

Lin 等人提出一种新的自适应滤波器,该滤波器基于支持向量机,由一个噪声决策机和双通道中值滤波器构成^[80]。该方法的创新之处在于巧妙地利用支持向量机设计噪声检测器,用于判断当前像素是否为噪声。如果是噪声,则进行滤波,否则不做任何处理。从而,能够在有效抑制脉冲噪声的同时,保护更多的图像细节。试验结果显示,该方法不论对随机噪声还是固定比例噪声都具有理想的效果。

文献[81]提出一种基于局部自适应最小方差支持向量机的图像复原方法。通过建立适当的非线性映射核函数,将退化图像映射到一个高维特征空间,然后通过维纳滤波器进行滤波。仅需使核函数个数满足 Mercer 条件,即可将非线性维纳滤波问题转换为特征空间的线性滤波问题来处理。此外,该方法中的核函数还可以更换为小波或者其他类型的核函数。Li 等人基于支持向量回归机(SVR)提出一种模糊加噪声退化图像的复原方法^[82]。利用支持向量机实现退化图像中 $(2R+1) \times (2S+1)$ 大小的邻域到未退化图像中像素点的映射,对各种退化图像的学习之后,将该映射用于图像复原。在该方法中,SVR 实际上用来寻找低分辨率窗口与高分辨率窗口中心像素之间的映射,因此,支持向量机的个数远小于培训样本的数量,这使得该方法非常高效。

加权顺序统计(WOS)滤波器由于窗口结构简单,在信号处理方面非常高效,但其设计相对复杂。Yao 等将支持向量机用于设计加权顺序统计滤波器,提出一种新的设计 WOS 的方法,利用分叉技术将布尔函数从 255 层降到 2 层,由最佳超平面相隔,而超平面由支持向量机技术获取^[83]。试验显示该方法较神经网络方法有效。

中值滤波方法是一种非常有效的非线性滤波方法,特别适合于随机噪声和周期噪声的情况。然而,在非噪声区域,中值滤波会错误地平滑图像细节,使图像产生模糊和失真。Pankajakshan 等人提出一种基于支持向量机的方法来提高中值滤波算法的适应性^[84]。

Bar 等人提出一种将图像复原与图像分割相结

合的方法^[85],该方法利用 T 收敛近似推导,交替最小化方法进行迭代优化。这种方法的创新之处在于统一了复原与图像分割问题。该思想最先由 Jeong 在 1988 年提出^[86]。最近,同样的思想也出现在 Mignotte 的论文中^[87]。

4.5 超分辨率复原法

超分辨率复原(super resolution image reconstruction)是一种通过某种信号处理技术,从多幅退化的、低分辨率图像获取一幅高分辨率图像的方法。基于 Bayes 估计的最大后验概率(MAP)方法和凸集投影映射(POCS)方法是最有效的两种方法。

凸集投影映射方法最先由 Startk 等人提出^[88],实际上是一种将先验信息引入复原过程的迭代复原方法。该方法用先验知识作为解的约束,使其限制在一个封闭凸集中,利用迭代法求解。具有结构简单,求解方便的优点。

当原始图像的后验概率密度已知时,基于 Bayes 估计的 MAP 方法取得了较好的应用。Schultz 等人^[89]用 MAP 方法来解决视频序列图像的超分辨率复原问题,用 Huber-Markov Gibbs 先验模型,将复原问题转变为一个具有唯一解的带约束最优化问题。最大似然估计(ML)是 MAP 估计的特例,Katasaggelos 等人^[90]利用该方法同时估计亚像素位移和图像噪声,用最大期望方法求解 ML 估计问题,取得了较好的复原效果。

5 结 语

5.1 总 结

通过上面的回顾,可以了解到数字图像复原技术发展的一个大致情况。从最早的空间项目,发展到目前的众多应用领域,取得了很大的进步。归结起来,复原技术主要关注两项关键技术:(1)参数识别;(2)复原滤波器设计。前者利用不同先验知识获取适当的退化参数,后者则根据这些参数估计真实图像。如果先验知识事先未知,则需要从观测图像本身进行估计,这类问题即为盲复原。复原过程既可以先识别参数再进行复原的顺序结构,也可以是参数识别和复原滤波同时进行的并行结构。

在经典复原算法当中,除直接复原法外,正则化和自适应在目前的复原应用中仍相当普遍。正则化主要用于解决复原病态问题,但终究因为全局化限制,在处理工程中会产生振铃,模糊图像边界

等副作用。自适应方法则可以突破全局性限制,起到局部平滑的效果。然而,用它们作为基本框架,配合现代复原技术来获取各种参数,将具有更好的复原效果。

神经网络具有非常优秀的非线性自适应特性,因而在参数辨识方面的表现比较出色;此外,由于网络本身的结构非常适合于并行处理和硬件实现,因而在实时性方面也具有很大的优势。许多硬件生产厂家提供集成神经网络特性的芯片,只需提供模板参数便可完成运算,极大地简化了计算用时开销和算法实现的复杂度。用可编程逻辑芯片动态的调整模板参数,能提供更好的算法适应性。该方法的缺点是模板参数不具备普适性,需要根据不同的应用项目进行调整。尽管如此,该方法仍被认为是最适合的复原方法之一^[57-58]。

彩色图像复原与其说是一项技术,不如说是一类问题,一类与灰度图像复原既有区别又有联系的新问题。由于彩色图像的特殊性——多个色彩通道合成,增加了这类问题的解决难度,导致这方面的研究发展相对缓慢。

支持向量机主要用来处理二分类问题。通常情况下,分类依据是一个优化(通过学习)好的分类函数。在没有附加先验知识的情况下,状态机仍具有很好的普适性能,是一种优秀的设计分类器的方法,特别适合于高维输入信号。是图像复原领域中的一项比较新颖的方法。

湍流是长距离成像的主要退化原因之一,而湍流模糊的主要影响因素是大气折射率的随机波动,该随机过程已被前人模型化为式(18)。根据该模型,如果模糊指数 σ 已知,非盲复原方法即可解决问题^[91]。当模糊指数未知时,需要用盲复原方法^[92]。针对噪声放大问题,可将 Lucy-Richardson 算法集成到复原过程中,提高算法对噪声的鲁棒性。此外,主成分分析方法(PCA)用于解决此类问题时,具有快速、对噪声不敏感等优点,在单通道或多通道应用中,都具有理想的效果^[93]。

5.2 展 望

图像复原是一项具有广阔发展和应用前景的技术。随着现代信号处理技术、控制技术、估计理论、数值分析等方法的进步,新的复原方法将会不断涌现。以下是一些值得关注的问题:

(1) 针对特定应用优化退化/复原模型

一方面,现有的退化模型大都基于线性、空间不

变假设,而实际情况并非如此。另一方面,掌握先验信息的情况直接影响着复原质量。因此,根据不同的应用环境,进行合理简化,充分挖掘先验知识,将其直接集成到退化模型当中,这是一种值得考虑的方法。这样做的结果可能会增加模型的复杂度,提高解的复杂性,但换来的是更加准确的估计结果和更高的复原质量。在特定的需求下,这种代价是合乎情理,也是符合需求发展的。

(2) 提高退化参数自动辨识技术

从理论上说,如果退化参数(模糊、噪声)完全已知,便可精确地复原图像。因此,复原质量在某种程度上取决于模糊辨识的水平。虽然已有不少文献先后给出过不少关于模糊估计方法的讨论和总结,但至今为止,并无成熟的能够自动辨识参数的模型出现。早在 20 世纪 80 年代就有人曾预言:模糊图像在 10 年后将不再会存在。而实践却证实这种预言夸大了复原技术的发展速度。事实上,这是从另一个角度证明了模糊辨识技术不仅是复原问题中的一项关键技术,更是一个研究的难点。因此,在此投入大量的精力,进行持续研究是有必要的,也是迫切的。

(3) 充分挖掘小波多分辨率理论的优势

目前,图像复原技术在很大程度上依赖于离散傅里叶变换完成频率域的表达与分析。尽管小波分析已引入近 20 年,在图像处理应用中比较成功的领域仍仅限于图像压缩编码,而在复原技术中的应用并不理想。大多研究主要通过构造小波函数来提高算法对噪声的鲁棒性,利用多分辨率理论进行图像描述和分析的文献十分少见。时变频率分析的潜力没有被很好地挖掘。因此,小波的优势并未得到很好的利用,还有广阔的发展空间。

(4) 彩色图像复原

目前有关彩色复原的研究,大多数限于降低噪声敏感。虽有些学者讨论了模糊复原方法,但效果不佳。彩色图像与灰度图像虽有联系,但灰度图像的复原算法直接用于彩色图像时存在种种困难,原因在于彩色成像系统具有多个色彩通道,不同通道之间往往具有某种交叉性,因而这种交叉性研究值得重视。彩色复原技术的研究尚未成熟,还有很多值得研究的内容。但可以预见,随着彩色数码摄像技术的发展,这类需求将迅速增加。

(5) 提高复原算法的实时性

目前,提高实时性的研究没有得到充分的重视。

虽有一些应用场合对实时性的要求不是很高,但有更多重要的应用环境对实时性的要求是苛刻的。例如机器视觉、导航与制导,在这些领域中,实时性是算法应用的前提。另外,动态复原问题也会对实时性提出新的挑战。

(6) 研究综合评价复原质量的通用标准

目前,广泛采用改善信噪比(ISNR)来衡量复原质量。这种方法只能给出复原前后的客观对比,无法判断复原的程度,属于客观评价标准^[8,82]。很多情况下,数学意义上的最佳,并非真实意义上的最佳。例如,视觉效果等主观性因素往往被忽略。文献[94]、[95]的研究虽考虑了人眼的视觉特性,提出的评价指标含有一定的主观因素,但并不完善,有待于进一步研究。此外,算法的复杂性、可靠性,实时性等因素也是评价一个算法质量的重要标准。实践证明,统一的衡量标准是否存在、是否有效,是衡量一项技术成熟度的重要标志。因此,研究并提出综合的评价准则应该受到重视。

(7) 重视湍流模糊在航天方面的应用

作为图像退化的一种特殊类型,湍流模糊在航天、空间探测,遥感等领域普遍存在。图像复原技术起源于解决空间探测图像退化问题,至今已有长足的发展。然而,在目前大力发展航天事业的背景下,该方向的研究重要性就显得更加突出,应给予足够的重视。

总之,数字图像复原技术是一门实践性和应用性很强的技术,有着广泛的应用空间。除数学基础外,数字图像复原技术本身并没有复杂的理论背景,其发展主要靠其他学科的推动。早期的发展主要依靠数字信号处理,后来又借助控制理论使其得到更进一步的发展。希望今后能有更多其他学科的学者能够将其领域里适合的研究方法和研究思路引入到图像复原技术中,为其注入新的活力,使其向更高一级的方向发展。

致 谢 向对本文的工作给予支持和提出过宝贵建议的人员表示感谢。

参考文献 (References)

- Banham M R, Katsaggelos A K. Digital image restoration [J]. Signal Processing, 1997, **14**(2): 24-41.
- Robbins G M, Huang T S. Inverse filtering for linear shift-variant imaging systems [J]. Proceedings of IEEE, 1972, **60**(7): 862-872.
- Brigham E O, Smith H W, Bostick F X, *et al.* An iterative technique for determining inverse filters [J]. IEEE Transactions on Geoscience Electronics, 1968, **6**(2): 86-96.
- Springer T, Torres J, Pearce J A, *et al.* Restoration of thermographic images using iterative inverse filtering [J]. Engineering in Medicine and Biology Society, 1989, **2**(2): 365-366.
- Chottera A, Jullien G. Recursive digital filters in image processing [A]. In: Proceedings of IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing [C], Tulsa, OK, USA, 1978: 757-760.
- Hsiao C C, Chi C Y. Image modeling and restoration by higher-order statistics based inverse filters [A]. In: Proceedings of IEEE Seventh SP Workshop on Statistical Signal and Array Processing [C], Quebec, Canada, 1994, 203-206.
- Chi C Y, Wu M C. A unified class of inverse filter criteria using two cumulants for blind deconvolution and equalization [A]. In: Conference on ICASSP-95 [C], Detroit, MI, USA, 1995, **3**: 1960-1963.
- Chen W F, Li C, Chen H Y. An effective restoration algorithm of degenerated image in spatial domain [J]. Chinese journal of computer, 1999, **22**(12): 1268-1271. [陈武凡, 李超, 陈和晏. 空域中退化图像恢复的有效算法 [J]. 计算机学报, 1999, **22**(12): 1268-1271.]
- Galatsanos N P, Katsaggelos A K. Methods for choosing the regularization parameter and estimating the noise variance in image restoration and their relation [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1992, **1**(3): 322-336.
- Nakano K, Eguchi M, Toyota Y, *et al.* On regularization for image restoration problems from the viewpoint of a bayesian information criterion [A]. In: Proceedings of International Conference on IECON [C], Maui, HI, USA, 1993: 2257-2261.
- Reeves S J. Optimal regularized image restoration with constraints [A]. In: Proceedings of IEEE International Conference on ICASSP [C], San Francisco, CA, USA, 1992, **3**: 301-304.
- Reeves S J. Optimal space-varying regularization in iterative image restoration [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1994, **3**(3): 319-324.
- Molina R, Katsaggelos A K, Mateos J. Bayesian and regularization methods for hyperparameter estimation in image restoration [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1999, **8**(2): 231-246.
- Leung C M, Lu W S. An l-curve approach to optimal determination of regularization parameter in image restoration [J]. Electrical and Computer Engineering, 1993, **2**(2): 1021-1024.
- Fan X, Zhang Q, Liang D Q, *et al.* Face image restoration based on statistical prior and image blur measure [A]. In: Proceedings of Conference on ICME '03 [C], Baltimore, MD, USA, 2003, **3**: 297-300.
- Demoment G. Image reconstruction and restoration: overview of common estimation structures and problems [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1989, **37**(12): 2024-2036.
- Thompson A M, Brown J C, Kay J W, *et al.* A study of methods of choosing the smoothing parameter in image restoration by

- regularization [J]. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1991, **13**(4):326-339.
- 18 Leung C M, Lu W S. Optimal determination of regularization parameters and the stabilizing operator [J]. Signal Processing, 1995, **1**(7): 403-406.
- 19 Murli A, D'Amore L, De Simone V. The Wiener filter and regularization methods for image restoration problems [J]. Image Analysis and Processing, 1999, **11**(2):394-399.
- 20 Barakat V, Guilpart B, Goutte R, *et al.* Model-based tikhonov-miller image restoration [A]. In: Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing [C], Barbara, CA, USA, 1997: 310-313.
- 21 Zervalds M E, Tack M K. A generalized study of the weighted least-squares measure for the selection of the regularization parameter in inverse problems [J]. Circuits and Systems, 1993, **3**(6):415-418.
- 22 Kempen V, Voort V D, Bauman J G J, *et al.* Comparing maximum likelihood estimation and constrained tikhonov-miller restoration [J]. Engineering in Medicine and Biology Magazine, 1996, **15**(1): 76-83.
- 23 Qureshi A G. Constrained kalman filtering for image restoration [A]. In: Proceedings of the Conference on ICASSP-89 [C], Glasgow, Scotland, 1989:1405-1408.
- 24 Legendijk R L, Biemond J, Boeke D E. Regularized iterative image restoration with ringing reduction [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1988, **36**(12):1874-1888.
- 25 Karayiannis N B, Venetsanopoulos A N. Regularization theory in image restoration-the stabilizing functional approach [J]. Signal Processing, 1990, **38**(7):1155-1179.
- 26 Bouhamid A, Jbilou K. Sylvester Tikhonov-regularization methods in image restoration [J]. Journal of Computational and Applied Mathematics, 2007, **206**(1): 86-98.
- 27 Moulin P, Liu J. Statistical imaging and complexity regularization. Information theory [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2000, **46**(5):1762-1777.
- 28 You Y L, Kaveh M. A regularization approach to joint blur identification and image restoration [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1996, **5**(3):416-428.
- 29 Moon G K, Katsaggelos A K. General choice of the regularization functional in regularized image restoration [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1995, **4**(5):594-602.
- 30 Berger T, Stromberg J O, Eltoft T. Adaptive regularized constrained least squares image restoration [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1999, **8**(9):1191-1203.
- 31 Sezan M I, Tekalp A M. Adaptive image restoration with artifact suppression using the theory of convex projections [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1990, **38**(1):181-185.
- 32 Sezan M I, Tekalp A M. Adaptive nonlinear image restoration using the theory of convex projections [J]. Circuits and Systems, 1988, **7**(9):959-962.
- 33 Ogawa T, Haseyama M, Kitajima H. Restoration method of missing image data using modified optical flow [A]. In: Proceedings of EMBS Asian-Pacific Conference on Biomedical Engineering [C], Kyoto, Japan. 2003:130-131.
- 34 Gerace I, Panolfi R, Pucci P. A new estimation of blur in the blind restoration problem [J]. Image Processing, 2003, **1**(7): 261-264.
- 35 Leung C M, Lu W S. A two-phase blind restoration algorithm [A]. In: Proceedings of the Conference on Electrical and Computer Engineering [C], Edmonton, Canadian, 1993, **2**:1029-1032.
- 36 Kang X, Peng Q, Thomas G, *et al.* Blind image restoration using the cepstrum method [A]. In: Proceedings of the Conference on Electrical and Computer Engineering [C], Saskatoon, Canada, 2006: 1952-1955.
- 37 Devic Z, Loncaric S. Blind restoration of space-invariant image degradations in the singular value decomposition domain [J]. Image Processing, 2001, **2**(7): 49-52.
- 38 Moulin P, Liu J. Statistical imaging and complexity regularization [J]. Information Theory, 2000, **46**(5):1762-1777.
- 39 You Y L, Kaveh M. Ringing reduction in image restoration by orientation-selective regularization [J]. Signal Processing Letters, 1996, **3**(2):29-31.
- 40 Giannakis G B, Heath R W J. Blind identification of multichannel FIR blurs and perfect image restoration [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2000, **9**(11):1877-1896.
- 41 Hadhoud M M. Restoration of multichannel images with limited a priori information using multichannel parallel-like adaptive filters [A]. In: Proceedings of the Radio Science Conference on 17th NRSC'2000 [C], Minufiya, Egypt, 2000: C1801-C1810.
- 42 Joon I M, Sang K K, Joon K P, *et al.* Fast iterative image restoration algorithms [A]. In: Proceedings of the IEEE Asia Pacific Conference on Circuits and Systems [C], Seoul, Korea, 1996: 361-364.
- 43 Wu H, Li M J, Zhang H J, *et al.* Fast image restoration in large digital photos [A]. In: Proceedings of the Fourth Pacific Rim Conference on Multimedia [C], Singapore, 2003:537-540.
- 44 Reeves S J. Fast image restoration without boundary artifacts [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2005, **4**(10):1448-1453.
- 45 Ogrenci S, Bazargan K, Sarrafzadeh M. Image analysis and partitioning for FPGA implementation of image restoration [A]. In: Proceedings of the IEEE Workshop on SiPS'2000 [C], Lafayette, LA, USA, 2000: 346-355.
- 46 Lam E Y. Blind Bi-level image restoration with iterated quadratic programming [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems, 2007, **54**(1):52-56.
- 47 Wu Y D, Chen Y H, Zhang H Y. An improved algorithm for image restoration based on modified hopfield neural network [J]. Machine Learning and Cybernetics, 2005, **48**(7): 4720-4723.
- 48 Sun Y. Hopfield neural network based algorithms for image restoration and reconstruction II: Performance analysis [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2000, **8**(7):2119-2131.
- 49 Wu Y D, Zhang H Y. A Novel Image Restoration Algorithm Using Neural Network Based on Variational PDE Model [A]. In: Proceedings of the Conference on Communications, Circuits and Systems [C], San-Francisco, CA, USA, 2006:433-436.

- 50 Wang D H, Dillon T, Chang E. Pattern learning based image restoration using neural networks [A]. In: Proceedings of the Conference on IJCNN [C], Honolulu HI, USA, 2002:1481-1486.
- 51 Wong H S, Ling G. A neural learning approach for adaptive image restoration using a fuzzy model-based network architecture neural networks [J]. Neural Networks, 2001, **12**(3):516-531.
- 52 Bao P, Wang D H. Edge-preserving neural network based image restoration [A]. In: Proceedings of the Conference on Signals, Systems & Computers [C], Phoenix, AZ, USA, 1999, **2**:981-985.
- 53 Wang D H, Talevski A, Dillon T S. Edge-preserving nonlinear image restoration using adaptive components-based radial basis function neural networks [A]. In: Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks [C], Portland, OR, USA, 2003, **2**:1243-1248.
- 54 Celebi M E, Guzelis C. Lyapunov function based design of dynamical neural networks for restoration of blurred and noisy images [A]. In: Proceedings of the Conference on Neural Networks [C], Durham, NC, USA, 1995:1913-1918.
- 55 Sun Y. Hopfield neural network based algorithms for image restoration and reconstruction II: Algorithms and simulations [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2000, **48**(7):2105-2118.
- 56 Rajpoot N, Yao Z, Wilson R. Adaptive wavelet restoration of noisy video sequences. [A]. In: Proceedings of the Conference on ICIP [C], Singapore, 2004: 957-960.
- 57 Fukuma S, Ikuta S, Ito M, *et al.* An ROI image coding based on switching wavelet transform [A]. In: Proceedings of the Symposium on ISCAS [C], London, UK, 2003, **2**: II-420-II-423.
- 58 Jin W. Image restoration in neutron radiography using complex-wavelet denoising and Lucy-Richardson deconvolution [J]. Signal Processing, 2006, **2**(9): 16-20.
- 59 Gupta P K, Kanhirodan R. Wavelet transform based error concealment approach for image denoising [A]. In: Proceedings of the Conference on ICIEA [C], Singapore, 2006:1-6.
- 60 Zhang X J, Zhu W P. Wavelet domain image restoration using adaptively regularized constrained total least squares [A]. In: Proceedings of the Symposium on ISIMP [C], Hong Kong, China, 2004:567-570.
- 61 Ray S, Chan A, Mallick B. Bayesian wavelet shrinkage in transformation based normal models [A]. In: Proceedings of the Conference on ICIP [C], New York, NY, USA, 2002, **1**: 876-879.
- 62 Fujiwara H, Zhang Z, Miyake T. Defocused image restoration using translation invariant wavelet transform [A]. In: Proceedings of the Conference on SICE-ICASE [C], Busan, Korea, 2006:3293-3297.
- 63 Figueiredo M A T, Nowak R D. An EM algorithm for wavelet-based image restoration [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2003, **12**(8):906-916.
- 64 Xu J, Guan J H, Wang X D, *et al.* An OWE-based algorithm for line scratches restoration in old movies [A]. In: Proceedings of the IEEE Symposium on ISCAS [C], New Orleans LA, USA, 2007: 3431-3434.
- 65 Zhu Y P, Shen T Z, Cui Y. Wavelet domain image restoration algorithm using classified hidden Markov tree model [A]. In: Proceedings of the Sixth World Congress on WCICA [C], Dalian, China, 2006:9570-9573.
- 66 Charles K, Wang J Z. Wavelet-based minimal-energy approach to image restoration [J]. Applied and Computational Harmonic Analysis, 2007, **23**(1):114-130.
- 67 Stephanakis I M, Kollias S. Generalized-cross-validation estimation of the regularization parameters of the subbands in wavelet domain regularized image restoration [A]. In: Proceedings of the Thirty-Second Asilomar Conference on Signals, Systems & Computers [C], Pacific Grove, CA, USA, 1998:938-940.
- 68 Cao D D, Guo P. Blind image restoration based on wavelet analysis [A]. In: Proceedings of the Conference on ICMLC [C], Guangzhou, China, 2005:4977-4982.
- 69 Premaratne P, Burnett I. Role of wavelet transforms in image restoration [A]. In: Proceedings of the IEEE Region 10 Conference on TENCN [C], Chiang Mai, Thailand, 2004:243-246.
- 70 Liu J, Moulin P. Complexity-regularized image restoration [J]. Image Processing, 1998, **1**(4): 555-559.
- 71 Fung Y H, Chan Y H. An iterative algorithm for restoring color-quantized images [J]. Image Processing, 2002, **1**(3): 313-316.
- 72 Fung Y H, Chan Y H. POCS-based algorithm for restoring colour-quantised images [J]. IEE Vision Image Signal Processing, 2004, **151**(2):119-127.
- 73 Fung Y H, Chan Y H. Restoration of halftoned color-quantized images using projection onto convex sets [J]. Image Processing, 2004, **1**(1):325-328.
- 74 Fung Y H, Chan Y H. A POCS-based restoration algorithm for restoring halftoned color-quantized images [J]. Image Processing, 2006, **15**(7):1985-1992.
- 75 Lukac R, Plataniotis K N. Adaptive spatiotemporal video demosaicking using bidirectional multistage spectral filters [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2006, **52**(2):651-654.
- 76 Wu X L, Zhang L. Temporal color video demosaicking via motion estimation and data fusion [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2006, **16**(2):231-240.
- 77 Lukac R, Plataniotis K N, Hatzinakos D. Color image zooming on the Bayer pattern [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2005, **15**(11):1475-1492.
- 78 Jia J Y, Tai Y W, Wu T P, *et al.* Video repairing under variable illumination using cyclic motions [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2006, **28**(5):832-839.
- 79 Shao F, Jiang G Y, Yu M, *et al.* A new image correction method for multiview video system [A]. In: Proceedings of the Conference on Multimedia and Expo [C], Toronto, Ontario, Canada, 2006: 205-208.
- 80 Lin T C, Yu P T. Adaptive two-pass median filter based on support vector [J]. Machines for Image Restoration, Neural Computation, 2004, **16**(2):333-354.
- 81 Peng D Q, Tian J W. Image denoising using local adaptive least squares support vector regression [J]. Geo-Spatial Information Science, 2007, **10**(3):196-199.

- 82 Li D, Mersereau R M, Simske S. Blind image deconvolution through support vector regression [J]. *Neural Networks*, 2007, **18**(3): 931-934.
- 83 Yao C C, Yu P T. The optimal design of weighted order statistics filters by using support vector machines [J]. *EURASIP Journal on Applied Signal Processing*, 2008, **2006**(1):1-6.
- 84 Pankajakshan P, Kumar V. Detail-preserving image information restoration guided by SVM based noise mapping [J]. *Digital Signal Processing*, 2007, **17**(3):561-577.
- 85 Bar L, Sochen N, Kiryati N. Semi-blind image restoration via mumford-shah regularization [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2006, **15**(2):483-493.
- 86 Jeong D S, Beex A A. Nonlinear image restoration using a segmentation-oriented expert system [A]. In: *Proceedings of the Conference on ICASSP*[C], New York, NY, USA, 1988, **2**: 984-987.
- 87 Mignotte M. A segmentation-based regularization term for image deconvolution [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2006, **15**(7):1973-1984.
- 88 Stark H, Oskoui P. High resolution image recovery from image-plane arrays, using convex projections [J]. *Journal of Optical Society of America. A*, 1989, **6**(1):1715-1726.
- 89 Schulz R R, Stevenson R L. Extraction of high-resolution frames from video sequences[J]. *Image Processing*, 1996, **5**(6):996-1011.
- 90 Tom B C, Katsaggelos A K. Reconstruction of a high-resolution image by simultaneous registration, restoration, and interpolation of low-resolution images [A]. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Image Processing*[C], Washington, DC, USA, 1995, **2**:539-542.
- 91 Lucy L B. An iterative technique for the rectification of observed distributions [J]. *Astronomical*, 1974, **79**: 745-754.
- 92 Kundur D, Hatzinakos D. Blind image deconvolution revisited [J]. *IEEE Signal Process.* 1996, **13**(6):61-63.
- 93 Mersereau R M, Simske S. Atmospheric turbulence degraded image restoration using principal components analysis [J]. *Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2007, **4**(3):340-344.
- 94 Lin Q. Halftone image quality analysis based on a human vision model [J]. *SPIE*, 1993, **1913**: 378-389.
- 95 Damera V N. Image quality assessment based on a degradation model [J]. *Image Proceedings*, 2000, **9**(4):636-665.