

图像盲复原算法研究现状及其展望

张 航 罗大庸

(中南大学信息科学与工程学院,长沙 410075)

摘 要 当点扩展函数未知或不确定的情况下,从观察到的退化图像中恢复原始图像的过程称为图像盲复原。近年来,图像盲复原算法得到了广泛的研究。本文首先根据点扩展函数的特点,将图像盲复原算法分为单通道盲复原算法、空间不变多通道盲复原算法和空间变化图像盲复原算法等3种类型;然后讨论了3种算法的研究现状并指出了现有各种算法的优缺点,最后通过研究总结出以下结论:现有算法的改进以及新的算法研究、基于非线性退化模型的算法研究、去噪处理算法研究、实时处理算法以及算法的应用研究是今后进一步研究的发展方向。

关键词 图像盲复原 模糊先验辨识 点扩展函数 空间变化模糊 迭代算法

中图分类号: TN911.73 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-8961(2004)10-1145-08

Status and Development of Study on Blind Image Restoration Algorithm

ZHANG Hang, LUO Da-yong

(School of Information Science & Engineering, Central South University, Changsha 410075)

Abstract When point spread function (PSF) is not known or only partially determined, restoration of the degraded images is called blind image restoration (BIR). In recent years, BIR algorithms (BIRA) have been studied widely. In this paper, BIRA is classified into three kinds: single channel BIRA with space-invariant PSF, multi-channel BIRA with space-invariant PSF and BIRA with space-variant PSF, according to the characteristic of PSF. The actual research status of BIRA is discussed in detail. Here, advantages and disadvantages of BIRA are also pointed out. After researching on the techniques, some results and conclusions are given as follow: improvement for the existing BIR methods, development a new techniques, the research based on degradation model with non-linear characteristic, the removal noise, the real time algorithm and their applications are the challenges and further research tendency.

Keywords blind image restoration, priori blur identification, PSF, space-variant blur, iterative algorithm

1 引言

图像复原的目的是从观测到的退化图像重建原始图像,它是图像处理、模式识别、机器视觉等的基础,因而受到广泛的研究。在天文学^[1]、遥感成像^[2]、医疗图像^[3-5]等领域获得应用。图像复原技术都是以图像退化的某种先验知识为基础,当假定系统的脉冲响应(即点扩展函数 PSF)已知时,这一类图像复原称为经典的图像复原。但是,在许多实际情况下点扩展函数难以确定,必须从观察图像中以某种方式抽出退化信息,找出图像复原方法,这种方法就是图像盲复原。通常图像盲复原过程如图 1 所示。图像

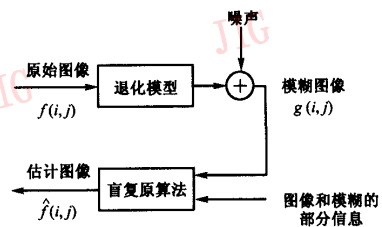


图 1 图像盲复原过程

盲复原问题可描述为通过观测到的模糊图像 $g(i, j)$ 以及有关原始图像 $f(i, j)$ 和模糊的先验知识,获得对原始图像的估计 $\hat{f}(i, j)$ 。

一般情况,为简化计算将噪声视为加性噪声,点

扩展函数采用线性时不变系统加以描述,退化模型可用下式表示:

$$g(i, j) = \sum_m \sum_n h(i, j; m, n) f(m, n) + n(i, j)$$

其中, $g(i, j)$ 、 $h(i, j; m, n)$ 、 $f(m, n)$ 、 $n(i, j)$ 分别表示退化的模糊图像、点扩展函数、原始图像和噪声。更进一步, 如果点扩展函数 $h(i, j; m, n)$ 只与该点输入有关, 与该点的位置无关, 称为空间不变系统, 其退化模型可简化为

$$g(i, j) = h(i, j) * f(i, j) + n(i, j)$$

在图像复原处理中, 空间变化的模型比空间不变的模型更具普遍性和标准性, 但处理工作有更大难度和计算要求。

图像盲复原不仅要用到原始图像以及 PSF 的部分先验知识, 而且在实际恢复过程中, 由于加性噪声的影响, 图像盲复原是一个病态问题, 即直接采用对 PSF 求逆进行恢复, 通常会带来高频噪声放大问题而导致算法性能的恶化。另外, 噪声的信息难以获得, 所以要从退化的图像中完全去除噪声是不可能的, 图像的恢复只能是近似的。由于原始图像以及 PSF 的先验知识只是部分已知的, 造成图像复原的解往往不是唯一的, 而且解的好坏与初始条件的选择以及附加的图像假设等都有关。因此, 图像盲复原算法往往较复杂, 只能针对具体的情况采用相应的算法。图像盲复原算法有很多, 对算法的选择和比较往往要针对不同的应用场合具体分析, 算法的比较主要是在计算的复杂性、算法的稳定性以及应用的适应性等方面进行。

2 图像盲复原算法现状

针对不同的假设, 总体来说, 图像盲复原方法主要分为以下两类: 一是首先利用真实图像的特殊特征估计 PSF, 然后借助估计得到的 PSF, 采用经典的图像复原方法进行图像的复原。这类方法将 PSF 的估计与图像的复原过程分为 2 个不同的过程, 因而具有较少计算量的特点; 二是将 PSF 辨识和真实图像估计相结合, 同时辨识 PSF 和真实图像。这类算法较为复杂, 计算量较大。

对单幅、静态、单色图像的盲复原, 文献[6]、文献[7]进行了很好的综述。近年来, 人们利用获得的同一原始图像的多幅模糊图像进行盲复原的算法进行了研究[8~14], 这类问题可归为多通道的图像盲复

原问题。另外, 对于点扩展函数也考虑了空间变化的复杂情况[15~17]。针对目前的盲复原算法的现状, 根据退化模型的特点, 重新将算法分为空间不变的单通道盲复原算法、空间不变多通道盲复原算法和空间变化图像盲复原算法 3 类, 结构如图 2 所示。

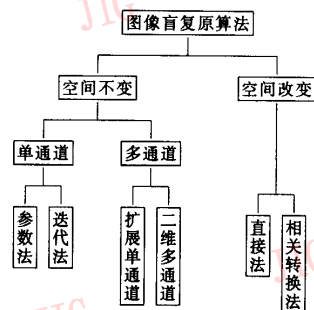


图2 图像盲复原算法分类

2.1 单通道空间不变图像盲复原算法

针对单通道空间不变的情况进行图像的盲复原, 是算法研究最为深入的部分。其退化模型如图 3 所示。

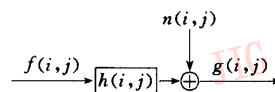


图3 单通道空间不变退化模型

在这类算法中, 最为常用的是参数法和迭代法。

2.1.1 参数法

所谓参数法, 即模型参数法, 就是将 PSF 和真实图像用某一类模型加以描述, 但模型的参数需要进行辨识。在参数法中, 典型的有先验模糊辨识法和 ARMA 参数估计法, 前者先辨识 PSF 的模型参数, 后辨识真实图像, 属于第 1 种类型的图像盲复原算法, 因而计算量较小; 后者同时辨识 PSF 和真实图像模型参数, 属于第 2 种类型图像盲复原算法。

先验模糊辨识法, 建立在几类已知 PSF 的模型结构前提下, 如摄像机散焦或摄像机水平运动等引起的模糊等[18]。将时域中的退化模型转到频域中, 即将

$$g(x, y) = f(x, y) * h(x, y) \quad x, y \in \mathbf{Z}$$

通过离散傅里叶变换化为

$$G(u, v) = F(u, v)H(u, v) \quad u, v \in \mathbf{R}$$

当已知退化图像的频域零点 ($G(u, v)$ 的零点) 和 PSF 的结构时, 图像盲复原问题可归结为求解 PSF 的零点, 一旦 PSF 的零点确定, 根据相应的

PSF 表达式,就可确定 PSF 的参数。确定了 PSF 后,就可利用经典的图像复原算法求出估计的图像。

对于模型中参数的估计,可利用真实图像的点源^[19]、边^[20]以及退化图像频率域^[21]。其中利用退化图像频率域的方法是最常用的方法,它的基本思想是将退化图像分割为包含 PSF 的若干帧,然后计算各帧的功率谱,再根据功率谱的尖峰位置,结合模糊类型估计 PSF 的参数。常用的两种模糊过程的 PSF 公式^[22]如下:

(1) 对于摄像机与对象之间水平相对运动引起的模糊,它的 PSF 的傅里叶变换可表示如下:

$$H(u, v) = \frac{\sin(\pi VTu)}{\pi Vu}$$

其中, T 为摄像机快门开启时间, V 为摄像机与对象水平相对运动的速度。

(2) 对于镜头散焦引起的模糊,它的 PSF 的傅里叶变换可表示如下:

$$H(u, v) = \frac{J_1(ar)}{ar}$$

其中, $r = \sqrt{u^2 + v^2}$, J_1 为一阶贝塞尔函数, a 为模型是否为空间不变的修正系数。

这类算法的优点是算法简单、计算量小,对于高信噪比的图像有较好效果,但它没有考虑加性噪声的影响,对噪声敏感;另外算法中需要确知 PSF 的结构,在应用时条件过于苛刻,缺乏一般性,而且无法处理功率谱中没有零点的情况如高斯型的 PSF。

ARMA 参数估计法,是将真实图像用一个二维自回归(AR)模型,将 PSF 用一个二维移动平均(MA)模型加以描述^[23]。图像盲复原的过程主要是辨识模型的参数。辨识模型参数有多种方法,如基于二阶统计特性的最大似然估计法^[24]、广义交替有效法^[25]、神经网络法^[26]、基于高阶统计特性方法^[27]等等。

真实图像的自回归模型可表示为

$$f(x, y) = \sum a(l, m)f(x-l, y-m) + v(x, y)$$

其中, $f(x, y)$ 表示真实图像, $a(l, m)$ 为自回归模型的参数,一般取 $a(0, 0) = 1$, $v(x, y)$ 为模型误差,一般认为它的均值为 0, 协方差为 Q 。对于基于二阶统计特性的方法, $v(x, y)$ 设为高斯型误差;对于基于高阶统计特性的方法^[27], $v(x, y)$ 设为非高斯型的误差。写成矩阵形式为

$$f = Af + v$$

由于真实图像往往具有平滑性和单连通性,根

据文献[28]的研究,模型参数只要辨识 $a(0, 1)$ 、 $a(1, 0)$ 、 $a(1, 1)$ 等 3 个参数即可,这将大大简化计算量。因而退化模型为

$$g = H(I - A)^{-1}v + n$$

需辨识模型参数包括 $a(l, m)$ 和 $h(l, m)$ 。

实际应用时,计算量太大、解非唯一以及估计算法往往不稳定,故一般还要对 PSF 加以约束,如利用二阶统计特性,有:(1)PSF 为正,且 $\sum h(l, m) = 1$, 利用这个特性可限制解的数量;(2)PSF 是对称的和零相位,利用这个特性可保证估计算法的唯一性和稳定性。

文献[6]对最大似然估计法和广义交替有效法做了较深入的分析、比较。这两种方法由于考虑了加性噪声,减少了噪声在复原时的放大,具有对噪声不敏感的优点;缺点是要估计的参数较多,计算量较大,方法容易陷入局部最小,只能处理最小相位系统等。

在最大似然估计法中,由于参数的估计是一个非线性的优化问题,有多种求解方法,如梯度法、期望最大值法^[29]以及最小二乘法^[30]等,文献[31]对这些方法进行了综述,总的思路是将非线性优化问题转化为线性优化问题。

对于广义交替有效法,最近文献[32]提出了基于高斯二次准则和 Lanczos 算法的改进的广义交替有效算法估计模型参数,算法改进了文献[25]对 PSF 的矩阵的二次性和循环性要求,增加了算法的鲁棒性和有效性。另外也有许多学者提出采用神经网络技术估计 ARMA 参数的方法,如文献[26]采用多层神经网络辨识参数。

2.1.2 迭代法

所谓的迭代法,不是通过建立模型而是通过算法的迭代过程,加上有关真实图像和 PSF 的约束来同时辨识 PSF 和真实图像的方法。迭代法是单通道图像盲复原算法中应用最广泛的一类算法,它不需建立模型,也不要求 PSF 为最小相位系统,因而跟实际更为接近。在这类算法中,迭代盲复原算法(IBM)^[33~35],基于非负性和决策域的递归逆滤波器算法(NAR-RIF)^[6,36~38],基于高阶统计特性的最小熵算法^[39]等最为典型。

IBM 算法的主要思想利用真实图像和 PSF 的有关知识,如 PSF 在已知的支持域中具有非负性以及频率域中 PSF 与真实图像估计之间的约束等,在随机选取真实图像的初始估计后,算法在时域和对应的频率域交替进行迭代,直到执行了一定的迭

代次数或估计开始收敛。性能指标为

$$\min_{f,h} J(f,h) = \min_{f,h} \frac{1}{2} \|h * f - g\|_{L_2(\Omega)}^2 +$$

$$a_1 \int_{\Omega} |\nabla f| dx dy + a_2 \int_{\Omega} |\nabla h| dx dy$$

其中, Ω 为图像范围, a_1, a_2 为正参数, 它主要是调节 f 和 h 的规范性, 为保证图像的可靠复原, 必须仔细选择。当考虑如上的性能指标最小化时, 在频率域中的约束可用下式表示:

$$H_{i+1}^{(\omega)} = \frac{F^{*(\omega)} \cdot G}{\|F^{(\omega)}\|^2 + a_2 \left(\frac{(2\pi)^2 (u^2 + v^2)}{|\nabla h_i^{(\omega+1)}|} \right)}$$

$$F_{i+1}^{(\omega+1)} = \frac{H^{*(\omega+1)} \cdot G}{\|H^{(\omega+1)}\|^2 + a_1 \left(\frac{(2\pi)^2 (u^2 + v^2)}{|\nabla f_i^{(\omega+1)}|} \right)}$$

在时域中的约束可用下式表示:

$$\int_{\Omega} h(x,y) dx dy = 1, f(x,y) \geq 0, h(x,y) \geq 0$$

文献[6]对 IBD 算法进行了分析和仿真研究, 结果表明, IBD 算法因为在频率域中具有类似维纳滤波器的形式, 因而对噪声不敏感, 但它的收敛性与初始条件有关, 不能保证算法的收敛性^[35]和解的唯一性。为此, 文献[40]提出先采用 IBD 算法估计退化模型的 PSF 的类型和参数, 然后再采用基于 Hopfield 神经网络的图像复原方法, 从而保证了算法的收敛。

NAR-RIF 算法是一种逆滤波的方法。算法的具体流程如图 4 所示。

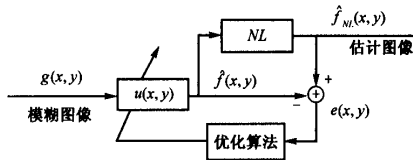


图 4 NAR-RIF 算法流程

图中, $u(x,y)$ 为逆滤波, NL 为限制图像非负性和支撑域范围的非线性函数。性能指标如下:

$$J(u) = \sum_{(x,y) \in D_{SUP}} \hat{f}^2(x,y) \left[\frac{1 - \text{sgn}(\hat{f}(x,y))}{2} \right] +$$

$$\sum_{(x,y) \in D_{SUP}} [\hat{f}(x,y) - L_B]^2 +$$

$$\gamma \left[\sum_{V(x,y)} u(x,y) - 1 \right]^2$$

其中, $\hat{f}(x,y) = g(x,y) * u(x,y)$, D_{SUP} 表示所有的像素在支持域内, L_B 为背景。第 3 项防止背景为全

黑时滤波器 $u(x,y)$ 的系数为全零解, γ 只在 L_B 为零时, 为非零。

优化算法可采用共轭梯度法^[38]。该算法结构简单, 代价函数为凸函数, 收敛性较好^[37], 但它对噪声敏感^[6], 只适用于均匀背景的情况。针对 NAR-RIF 算法的不足, 文献[41]提出采用分块奇异值分解去噪后, 再采用 NAR-RIF 算法进行图像复原; 文献[42]、[43]提出在代价函数中加入空间自适应正则化项改进算法的抗噪性能。

2.2 多通道空间不变图像盲复原算法

在有些应用中, 通过多部摄像机摄像、一部摄像机多次聚焦以及透过不同介质的多次曝光等, 可以获得同一原始图像的多幅模糊图像, 对这一类图像复原属于多通道的盲复原问题。具有 m 个通道的空间不变退化模型如图 5 所示。

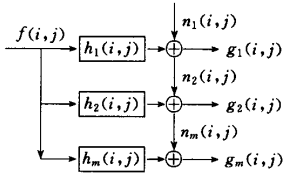


图 5 多通道空间不变退化模型

多通道空间不变图像盲复原算法^[8]可分为两类: 一类是将单通道的盲复原算法扩展到多通道; 另一类是将通讯领域的多通道一维信号估计算法扩展到多通道二维图像处理。

2.2.1 扩展单通道算法

扩展单通道算法, 又可分为参数法扩展算法和迭代法扩展算法。

在参数法扩展算法中, 扩展单通道算法的基本思想和单通道图像盲复原的参数法一样, 首先建立真实图像、PSF 以及噪声的模型, 而对模型的参数采用如期望最大值算法、广义交替有效算法等进行估计。不同之处是将参数法应用到多通道的情况。

文献[44]将单通道的期望最大值算法扩展到多通道, 并对应用过程中, 可能出现的小物理意义的小解问题采用惩罚函数进行避免, 算法能保证收敛, 运算量也较少, 但易收敛到局部最小, 而且参数初始估计需要仔细选择。

在迭代法扩展算法中, 扩展单通道算法的基本思想也是利用对真实图像、PSF 以及噪声的先验约束, 如非负性和支持域等, 对图像以及模糊同时进行迭代估计。

文献[45]将单通道的IBD算法扩展到多通道的情况,在时域中利用了图像和模糊函数的非负性约束,在频率域中采用维拉滤波器约束,而且在每个通道的迭代过程中通过建立评价函数增加一个约束以提高图像恢复的质量。这类算法的计算量相对较少,但算法对初始图像的估计敏感且收敛性较差。

2.2.2 多通道二维图像盲复原

多通道二维图像盲复原,这类方法将数字通讯领域应用的一维多通道盲原分离算法^[46~48]扩展到二维情况^[9,49,50]并用于图像的盲恢复。这类算法中有两种代数方法,一种是先辨识模糊函数,再采用常规的恢复算法进行复原;另一种是直接对逆滤波器进行估计。此类算法的优点在于不需对初始图像进行估计,也不存在稳定性和收敛性问题,对图像以及模糊函数的约束是松弛的,算法具有一般性。但是第1种算法要求采用复原算法具有收敛性;第2种算法对噪声敏感。

2.3 空间改变的图像盲复原方法

在许多实际的应用中,模糊往往是空间变化的,但由于处理工作的难度,目前的研究较少^[15~17],基本有相关转换恢复和直接法两类。

相关转换恢复的基本思想是区域分割,即将整幅图像分为若干局部区域,然后假设在各个局部区域模糊是空间不变的,利用空间不变的图像复原有关算法进行复原。这类方法都是基于窗口的模糊辨识技术,图像的估计取决于窗口的大小,由于模糊参数是连续变化的,在范围较大时空间不变的假设是不成立的,因而模糊的估计精度较差,而且这种方法只能针对部分空间变化的模糊进行处理,缺乏通用性;其次在区域的边上存在振铃现象。文献[16]提出将图像分为不连续的若干区域,在小区域中采用改进的期望最大值算法,即将算法的结构改进为两步迭代算法(包括期望和最大化两步),然后采用空间自适应算法对整幅图像进行复原。

直接法的基本思想是直接对图像进行处理。如文献[51]提出采用简化的二维递推卡尔曼滤波器进行图像模型和模糊模型的直接转换方法,其缺点是只能针对有限的模型,而且模型数增加,计算量会显著增大;文献[52]提出采用共轭梯度迭代算法,但只见到一个 31×31 的文本图像处理的结果报道,对于大图像处理效果尚需进一步的研究;文献[17]提出将空间变化图像系统建立成马尔科夫随机模型,对复原过程,采用模拟退火算法进行最大后验估计的

方法,这种方法避免了图像的窗口化,并能克服模糊参数不连续性造成的影响,但这种方法只能局限于将模糊过程建立成单参数的马尔科夫随机模型的情况,而且计算量也较大。

3 结 论

图像盲复原算法的研究尚处于起步阶段,主要集中在退化模型属于线性且不考虑噪声的情况,还未形成系统的分析方法和滤波器设计方法,基础理论和应用研究远未成熟。进一步,算法的研究方向大致分为以下几个方面:

(1) 现有算法的改进以及新的算法研究

由上述讨论知,现有各种算法还存在许多不足,有必要对算法进一步改进。如IBD算法中,如何选择初始条件才能保证算法的收敛;如何选择算法终止条件才能保证恢复的质量;如何选择滤波器中的噪声参数才能减少噪声的影响。又如NAR-RIF算法中,如何进一步解决噪声敏感问题,支持域的确定以及如何将算法扩展到非均匀背景的情况等。提出新的算法更好地解决图像盲复原问题,也是今后研究的热点,在采用神经网络的方法中,文献[53]提出采用脉冲耦合神经网络解决二值图像重建;文献[54]提出采用基于连续Hopfield网络的方法进行精确图像复原;其他方法还包括遗传算法^[55]、基于小波理论^[56]、基于独立组件分析方法^[57,58]迭代条件编码算法^[59]等。

(2) 基于非线性退化模型的图像盲复原算法

在实际应用中,严格来讲,所有的退化模型都是非线性的。对模型采用线性化的方法进行近似处理,虽然算法简单,但对非线性严重的情况处理效果并不理想。文献[60]提出了基于多项式以及神经网络两种参数模型处理非线性信号盲分离算法,算法扩展到二维图像情况需要进一步研究。研究基于非线性退化模型的图像盲复原算法也是下一步研究方向之一。

(3) 去噪处理算法研究

加性噪声的存在,使图像的复原问题变成了一个病态问题,而且由于一般假设只知道噪声的统计特性,因此要从退化图像中完全去除噪声是不可能的。另外,由于噪声的存在,恢复的效果并不理想,结合降噪的图像盲复原的算法研究有很现实的意义,这方面也进行了部分工作。为克服噪声的影响,一般

采用先进行降噪,后进行复原^[41];二是将降噪和复原同时进行^[33~35]这两类方法。目前,大多数算法中将噪声描述成高斯噪声进行研究,在实际应用时有较大局限性。对于非高斯情况的研究采用基于噪声的高阶统计特性的去噪算法研究也是很重要的研究方向,也可采用其他类型的方法进行降噪,文献[61]提出了利用自组织映射的非线性独立组件分析方法进行图像降噪处理算法。

(4) 实时处理算法

算法的的复杂性是制约算法应用的一个重要方面。文献[62]、[63]提出了采用正则化的离散周期 Radon 变换的方法将二维的卷积转化为一维进行处理,以提高算法的速度;文献[64]提出采用神经网络的实时处理算法。算法的实时性是算法实际应用的先决条件。

(5) 应用研究

算法的应用是推动算法研究的动力。虽然图像盲复原算法在天文学、医学、遥感等方面获得了较大的应用,但将算法应用到一般的工业图像实时检测、机器视觉、网络环境下的图像传输恢复、刑事侦破等方面还有大量的工作要做。

参 考 文 献

- Starck J L, Pantin E. Deconvolution in Astronomy: A Review [J]. Publications of the Astronoical Society of the Pacific, 2002, 114(800):1051~1069.
- Muller J P. Digital Image Processing in Remote Sensing [M]. Philadelphia, USA: Taylor & Francis, 1988: 226~269.
- Krishnamurthi V, Liu Y H, Bhattacharyya S, et al. Blind deconvolution of fluorescence micrographs by maximum-likelihood estimation [J]. Applied Optics, 1995, 34(29): 6633~6647.
- Michel Jean, Peix Gilles. On-line x-ray focal spot assessment based on deconvolution using standard image devices [J]. NDT&E International, 2003, 36(5): 303~317.
- Skoglund Ulf, Öfverstedt. Lars-Göran, Burnett, Roger M. Bricogne, et al. Maximum-Entropy Three-Dimensional Reconstruction: A Test Application with Adenovirus [J]. Journal of Structural Biology, 1996, 117(3): 173~188.
- Kurdur D, Hatzinakos D. Blind image deconvolution [J]. IEEE Single Processing Magazine, 1996, 13(3): 43~64.
- Kurdur D, Hatzinakos D. Blind image deconvolution revisited [J]. IEEE Single Processing Magazine, 1996, 13(6): 61~63.
- Pai Hung-Ta, Bovik Alan C. Multichannel Blind Image Restoration [J]. IEEE Signal Processing Letters, 1997, 4(8): 217~220.
- Giannakis Georgios B, Heath Robert W. Blind identification of multichannel FIR blurs and perfect image restoration [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2000, 9(11): 1877~1896.
- Kang Moon Gi, Katsaggelos K. Simultaneous multichannel image restoration and estimation of the regularization parameters [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1997, 6(5): 774~778.
- Gazzah Houcem, Regalia Phillip A, Delmas Jean-Pierre, et al. A blind multi-channel identification algorithm robust to order overestimation [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2002, 50(6): 1451~1458.
- Hendekli Mehmet C, Aysin Ertüzün. Design a multichannel two-dimensional delta-domain lattice filter for noise removal [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2001, 49(7): 1581~1593.
- Vrhel Michael J, Unser Michael. Multichannel restoration with limited a priori information [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1999, 8(4): 527~536.
- Eland Michael, Feuer Arie. Restoration of a single superresolution image from several blurred, noisy and undersampled measured images [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1997, 6(12): 1646~1658.
- You Y L, Kaveh M. A regularization approach to blind restoration of images degraded by shift-variant blurs [A]. In: Proceedings of IEEE Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing [C], Michigan, USA, 1995: 2607~2610.
- Guo Y P, Lee H P, Teo C L. Blind restoration of images degraded by space-variant blurs using iterative algorithms for both blur identification and image restoration [J]. Image and Vision Computing, 1997, 15(5): 399~410.
- Rajagopalan A N, Chaudhuri S. MRF model-based identification of shift-variant point spread function for a class of imaging systems [J]. Signal Processing, 1999, 76(3): 285~299.
- Fabian R, Malah D. Robust identification of motion and out-of-focus blur parameters from blurred and noisy images [J]. Graphical Models and Image Processing, 1991, 53(5): 403~412.
- 于亦凡, 陈维真, 黄海龙等. 图像传输方法测量海水的点扩展函数 [J]. 光学学报, 2000, 20(12): 1647~1651.
- Nishi K, Ando S. Blind superresolving image recovery from blur-invariant edges [A]. In: Proceedings of International Conference on Acoustics, Speech, Signal Processing'94 [C], Adelaide Australia, 1994, 5: 85~88.
- Cannon T M. Blind deconvolution of Spatially Invariant Blurs with Phase [A]. In: Multidimensional Digital Signal Processing [M], New York: IEEE press, 1986.
- Sonka Milan, Hlavac Vaclav, Boyle Roger. Image Processing, Analysis and Machine Vision (Second Edition) [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2002: 104~105.
- Telalp A M, Kaufman H. On statistical identification of a class of linear space-invariant blurs using non-minimum-phase ARMA models [J]. IEEE Transactions on Acoust Speech and Signal

- Processing, 1988, **36**(8):1360~1363.
- 24 Legendijk R L, Tekalp A M, Biemond J. Maximum likelihood image and blur identification: A unifying approach[J]. Optical Engineering, 1990, **29**(5):422~435.
- 25 Reeves S, Mersereau R. Blur identification by the method of generalized cross-validation [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1992, **1**(3):301~311.
- 26 Choand C M, Don H S. Blur identification and image restoration using a multilayer neural network[A]. In: IEEE International Joint Conference on Neural Networks [C], Singapore, 1991, **3**:2558~2563.
- 27 Qidwai. Uand Chen C-H. Blind Image Restor-ation for Ultrasonic C-Scan Using Constrained 2D-HOS[A]. In: IEEE International Conference on Acoustics Speech and Signal Processing[C], Salt Lake, UT, USA, 2001, **6**:3405~3408.
- 28 Jain A K. Advances in mathematical models for image processing [J]. Proceedings of IEEE, 1981, **69**(5):502~528.
- 29 Anarirn Ernin, Ucar Hakan, Istefanopulos. Identification of image and blue parameters in frequency domain using the EM algorithm[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1996, **5**(1):159~164.
- 30 Law N F, Lane R G. Blind deconvolution using least squares minimisation [J]. Optics Communications, 1996, **128** (4-6): 341~352.
- 31 Legendijk R L, Tekalp A M, Biemond J. Maximum likelihood image and blur identification; a unifying approach[J]. Optical Engineering, 1990, **29**(5):422~435.
- 32 Nhat Nguyen, Peyman Milanfar. Efficient generalized cross-validation with application to parametric image restoration and resolution enhancement [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2001, **10**(9):1299~1308.
- 33 Ayers G R, Dainty J C. Iterative blind deconvolution method and its applications[J]. Optics Letters, 1988, **13**(7):547~549.
- 34 Chan Tony F, Wong Chiu-Kwong. Total variation blind deconvolution [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1998, **7**(3):370~375.
- 35 Chan Tony F, Wong Chiu-Kwong. Convergence of the alternating minimization algorithm for blind deconvolution[J]. Linear Algebra and its Applications, 2000, **316**(1-3):259~285.
- 36 Kurdur D, Hatzinakos D. Blind image restoration via recursive filtering using deterministic constraints [A]. In: IEEE International Conference on Acoustics Speech and Signal Processing[C], Atlanta, GA, USA, 1996, **4**:2283~2286.
- 37 Kurdur D, Hatzinkos D. On the use of lyapunov criteria to analyze the convergence of blind deconvolution algorithms[J]. IEEE Transactions on signal Processing, 1998, **46**(11):2918~2925.
- 38 Kurdur D, Hatzinkos D. A novel blind deconvolution scheme for image restoration using recursive filtering [J]. IEEE Transactions on signal Processing, 1998, **46**(2):375~390.
- 39 Fiori S. Blind intrinsically stable 2-pole IIR filtering [J]. Electronics Letters, 2002, **38**(23):1482~1483.
- 40 屈志毅, 沃焱, 任志宏. 基于交替迭代和神经网络的盲目图像恢复[J]. 计算机学报, 2000, **23**(4):410~413.
- 41 刘璐, 何振亚. 利用 SVD 对带噪声的模糊图像进行盲复原[J]. 数据采集与处理, 2002, **17**(1):1~4.
- 42 薛梅, 邹采荣, 杨娟等. 一种空间自适应正则化图像盲复原算法 [J]. 中国图象图形学报, 2002, **7**(4):356~362.
- 43 余昕, 杨绿溪, 邹采荣. 基于确定性约束和局部空间自适应正则化的图像盲复原算法[J]. 数据采集与处理, 2002, **17**(2):121~125.
- 44 Schulz T J. Multiframe blind deconvolution of astronomical image[J]. Journal of the Optical Society of America A; Optics and Image Science and Vision, 1993, **10**(1-3):1064~1073.
- 45 Miura N, Baba N. Extended-object reconstruction with sequential use of the iterative blind deconvolution method[J]. Optics Communications, 1992, **89**(1):375~379.
- 46 Xu G, Liu H, Tong L, *et al.* A least-squares approach to blind channel identification [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1995, **43**(12):1982~1993.
- 47 Slock D T M, Papadias C B. Further results on blind identification and equalization of multiple FIR channels[A]. In: Proceedings of International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing[C], Detroit MI USA, 1995:1964~1967.
- 48 Giannakis G B, Halford S. Blind fractionally-spaced equalization of noisy FIR channels; Adaptive and optimal solutions[A]. In: Proceedings of International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing[C], Detroit MI USA, 1995:1972~1975.
- 49 Harikumar G, Bresler Y. Exact image deconvolution from multiple FIR blurs[J]. IEEE Transaction on Image Processing, 1999, **8**(6):846~862.
- 50 Harikumar G, Bresler Y. Blind restoration of images blurred by multiple filters: Theory and efficient algorithms [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1999, **8**(2):202~219.
- 51 Tekalp A M, Kaufman H, Woods J W. Model-based segmentation and space-variant restoration of blurred images by decision-directed filtering[J]. Signal Processing, 1988, **15**(1): 259~269.
- 52 Angel E S, Jain K K. Restoration of images degraded by spatially varying point spread functions by a conjugate gradient method [J]. Applied Optical, 1978, **17**(14):259~269.
- 53 Gu Xiaodong, Wang Haiming, Yu Daoheng. Binary image restoration using pulse coupled neural network [A]. In: 8th International Conference on Neural Information Processing[C], Shanghai, China, 2001:835~840.
- 54 王磊, 戚飞虎, 莫玉龙. 精确复原退化图像的连续 Hopfield 网络研究[J]. 上海交通大学学报, 1997, **31**(12):43~46.
- 55 Johnson Eric G, Abussahur Mustafa A G. Image deconvolution using a micro genetic algorithm [J]. Optics Communications, 1997, **140**(1-3):6~10.
- 56 Rooms F, Ronsse M, Pizurica A, *et al.* PSF estimation with application in autofocus and image restoration [A]. In: Proceedings of 3rd IEEE Benelux Signal Processing Symposium

- [C], Leuven, Belgium, 2002.
- 57 Shinji Umeyama. Blind Deconvolution of Images using Gabor Filters and Independent Component Analysis [A]. In: 4th International Symposium on Independent Component Analysis and Blind Signal Separation[C], Nara, Japan, 2003; 319~324.
- 58 Harold Szu, Ivica Kopriva. Artificial neural networks for noisy image super-resolution [J]. *Optics Communications*, 2001, **198**(1-3): 71~81.
- 59 Zhang Bing, Shirazi Mehdi N, Noda Hideki. Blind restoration of degraded binary markov random field images [J]. *Graphical Models and Image Processing*, 1996, **58**(1): 90~98.
- 60 Jordi Solé, Anisse Taleb, Christian Jutten. Parametric Approach to Blind Deconvolution of Nonlinear Channels[A]. In: ESANN*2000-European Symposium on Artificial Neural Networks[C], Bruges, Belgium, 2000; 26~28.
- 61 Haritopoulos Michel, Yin Hujun, Allinson M. Image denoising using self-organizing map-based nonlinear independent component analysis[J]. *Neural Networks*, 2002, **15**(8-9): 1085~1098.
- 62 Lun Daniel P K, Hsung T C, Shen T W. Orthogonal discrete periodic Radon transform. Part I: Theory and realization [J]. *Signal Processing*, 2003, **83**(5): 941~955.
- 63 Lun Daniel P K, Hsung T C, Shen T W. Orthogonal discrete periodic Radon transform. Part I: applications [J]. *Signal Processing*, 2003, **83**(5): 957~971.
- 64 Krell Gerald, Herzog Andreas, Michaelis Bernd. An artificial nervous network for real-time image restoration[A]. In: IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference[C], Brussels, Belgium, 1996.



张航 1966年生,副教授,2001年于中南大学获硕士学位,现为中南大学信息科学与工程学院博士研究生。研究领域包括图像处理、过程控制、机器人控制以及智能控制等。

E-mail: Zhang22@mail.csu.edu.cn



罗大庸 1944年生,教授,博士生导师。主要研究领域为图像处理、控制理论及应用等,在国内外刊物和国际学术会议上发表了论文60多篇,出版教材和著作3部。