

文章编号: 1673-0062(2010)02-0061-07

## 一种新的基于倒谱法和 Richardson-Lucy 算法的 运动图像盲复原方法

邹文洁

(南华大学 机械工程学院, 湖南 衡阳 421001)

**摘要:** 运动图像的盲复原, 一直是图像处理领域的难点, 本文根据运动模糊图像特点, 提出了一种鲁棒、高效保留图像细节和纹理特征的图像盲复原算法。在图像的复原过程中运用了基于最大似然函数的 Richardson-Lucy 滤波方法只需知道模糊类型, 不需要其它任何先验知识, 就能做到有效复原, 适用范围广, 能对线性匀速运动类型的模糊、振动模糊、旋转模糊都有效, 鲁棒性好, 抗噪能力强。

**关键词:** 图像盲复原; 倒谱法; 运动模糊; 鲁棒性

**中图分类号:** TP302.7      **文献标识码:** A

## A New Method of Blind Restoration of Motion Image Based on Cepstrum Method and Algorithm of Richardson-Lucy

ZOU Wen-jie

(School of Mechanical Engineering, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China)

**Abstract** Blind restoration of motion image always is a challenging problem in image processing. The paper, in view of the characteristic of motion image, puts forward a algorithm of blind restoration of motion image with good robustness and preserving image details and texture characteristic efficiently. The algorithm applies Richardson-Lucy filter based on the maximum-likelihood function during image restoration. It can restore efficiently a motion blurred image without any prior knowledge as long as the type of blur is known. Its applicability for processing motion blurred images has a more wide range including the uniform linear motion images, vibration blurred images and rotation blurred images and it has a good robustness, strong anti-noise ability.

**Key words** blind restoration of image; cepstrum method; motion blur; robustness

收稿日期: 2010-03-29

作者简介: 邹文洁 (1971-), 男, 湖南衡阳人, 南华大学机械工程学院工程师。主要研究方向: 数字图像处理、信息检索与知识科学。

## 0 引言

图像复原就是根据观测的退化图像重建原始图像的过程,它是图像理解、模式识别、机器视觉等的基础,近年来随着计算机技术和通信技术的发展,得到了广泛的研究,并大量地应用于天文、军事、医学、交通等领域<sup>[1]</sup>.经典的图像复原技术都是假定系统的点扩散函数是已知的,但是在实际过程中,点扩散函数一般是未知的,因此经典的方法往往不能解决实际问题,必须采用图像盲复原方法.所谓图像盲复原就是只使用退化图像和图像系统的部分信息,从退化图像特征中估计原图和污损的过程<sup>[2]</sup>.

根据图像模糊的机理,学者们提出了一系列的盲复原方法,并取得了一定的效果.如基于 Richardson-Lucy 算法的盲复原方法,该方法假定噪声服从泊松分布,以最大似然函数作为目标函数通过循环迭代来求解原始图像和点扩散函数<sup>[3-4]</sup>,实验表明这种方法跟点扩散函数初始值的选取有关:当点扩散函数初始值比较接近真实值时,用这种方法是有效的,但实际中点扩散函数初始值的准确估计往往是很困难的,因此不适宜做运动图像盲复原;汪雪林等人提出了基于小波域的局部高斯模型的图像盲复原方法,这种方法是假定图像的小波系数服从局部高斯模型<sup>[5]</sup>,这对于自然图像来说这种复原方法具有一定的合理性,但对天文图像、医学图像来说一般不满足该模型,因此其适用范围有很大的局限性;Tony F. Chan和 Chiu-Kwong Wong提出了基于 TV (total variation)总变分的盲复原方法<sup>[6]</sup>,但实验表明该方法只对基于散焦造成的模糊图像比较有效,对运动模糊图像、高斯模糊图像复原效果较差.由于这些方法一般都要求比较充足的先验知识和附加

条件,因此有很大的局限性.邓泽峰和熊有伦根据模糊图像频谱的特点,提出了基于傅里叶变换的模糊参数识别方法<sup>[7]</sup>,这种方法对噪声比较敏感,当图像中存在噪声时,误差比较大,因此这种方法很难应用于实际;陈滨宁、张贤达等人提出了基于倒谱理论的系统辨识方法<sup>[8]</sup>,由于该方法具有较好的鲁棒性<sup>[9-10]</sup>,因此被广泛地应用于语音信号处理和图像处理等领域<sup>[11-12]</sup>,并取得了较好的效果.

本文根据目前图像盲复原的研究现状,提出了一种鲁棒性好、能高效保留图像细节和纹理特征的运动图像盲复原算法,其整体框图如图 1 所示,它不同于一般的基于频谱的盲复原方法的地方是:对点扩散函数的估计采用倒谱法,在图像恢复时采用基于最大似然函数的 Richardson-Lucy 算法.本方法与文献 [13] 中的方法都采用倒谱理论,但模糊参数的识别方法不同:文献 [13] 中的方法是基于经验加权的 Bessel 方法,本方法是一种基于最小值理论的识别方法,因此本文的算法简单,不需要经验知识,具有更大的适用性,实验表明本方法在图像的峰值信噪比高于 23.5 db 时,仍然能准确识别模糊尺度和模糊方向.在图像复原方面,本文采用 Richardson-Lucy 算法,因为这是一种快速的、具有很好的鲁棒性的图像复原方法,在进行图像恢复时不仅能保留图像细节和纹理,而且对噪声具有较强的鲁棒性,而常规的复原算法如维纳滤波法、投影法等在有噪声时恢复效果不够理想,对图像的细节和纹理保留较差,往往会产生振铃效应和鬼影效应<sup>[13-14]</sup>.仿真和实拍图像的处理效果说明本文的方法自适应性强,鲁棒性好,图像的细节和纹理特征能够得到有效地保留,具有很强的适用性和应用价值.



图 1 运动模糊图像盲复原的整体框图

Fig 1 Whole frame diagram of blind restoration of motion blurred image

## 1 运动图像模糊模型

本文采用的图像模糊模型如式 (1) 所示:

$$g(x, y) = h(x, y) * f(x, y) + n(x, y) \quad (1)$$

其中  $g(x, y)$  表示模糊图像,  $h(x, y)$  表示点扩散

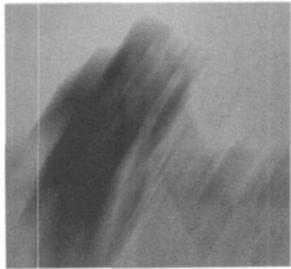
函数,  $f(x, y)$  表示原始图像,  $n(x, y)$  表示噪声,  $*$  表示卷积运算, 以下同.

对式 (1) 进行傅里叶变换可得其频率模型如下:

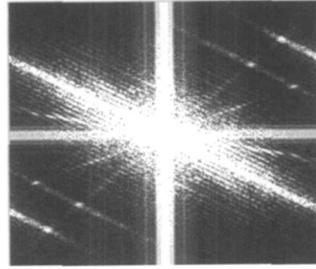
$$G(u, v) = H(u, v)F(u, v) + N(u, v) \quad (2)$$

在实际拍摄过程中, 由于相机的曝光时间相当短, 可以认为运动物体做匀速直线运动, 则运动方向为  $\theta$  模糊长度为  $L$  的点扩散函数可以表示为

$$h(x, y) = \begin{cases} \frac{1}{L} & \text{if } \sqrt{x^2 + y^2} \leq L \text{ and } \tan\theta = \frac{y}{x} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$



(1) 模糊图像



(2) 傅里叶变换的频谱图像

图 2 模糊图像与频谱的关系

Fig 2 Relation between blurred image and spectrum

## 2 基于倒谱法的点扩散函数辨识机理和算法

### 2.1 倒谱法的引出

为分析方便, 假设运动模糊图像的模糊长度为  $L$ , 角度  $\theta$  为  $0$  则

$$h(x, y) = \begin{cases} \frac{1}{L} & 0 \leq x \leq L - 1 \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \quad (4)$$

其离散的傅里叶变换为

$$H(u) = \frac{e^{-j\frac{\pi u}{N}} \sin(\frac{Lu\pi}{N})}{e^{-j\frac{\pi u}{N}} L \sin(\frac{u\pi}{N})} \quad 0 \leq u \leq N - 1 \quad (5)$$

其频谱图如图 3 所示, 从图中可以看出频谱的零点近似周期性地出现。

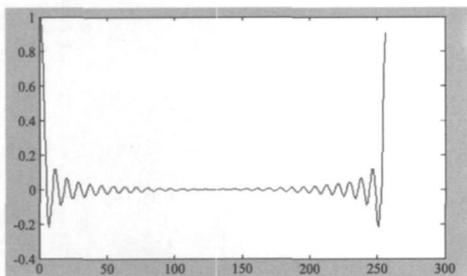


图 3  $H(u)$  频谱  $L=30 N=256$

Fig 3 Spectrum of  $H(u)$   $L=30 N=256$

图 2 是模糊图像与频谱的关系图, 图 (1)、图 (2) 分别是模糊尺度  $L=60$  像素, 模糊  $\theta=60^\circ$  的模糊图像和其对应的傅里叶变换频谱图像, 从图 2 的 (2) 中可以看到黑白相间的平行条纹, 做这些线的平行的垂线, 其与水平方向的夹角约为  $60^\circ$ , 这就是其模糊方向。

由式 (5) 知在最靠近原点的两个零点分别为  $\frac{N}{L}, -\frac{N}{L}$ , 在不考虑噪声影响即式 (2) 中的  $N(u, v) = 0$  时, 这时由式 (2) 知:

$$G(u, v) |_{u=\pm\frac{N}{L}} = 0 \quad (6)$$

因此会在频谱图像中出现黑条纹, 可根据过原点的亮条纹宽度来确定模糊尺度. 设过原点的亮条纹宽度为  $W$ , 则有

$$W = \frac{2N}{L} \quad (7)$$

此方法在没有噪声干扰时, 用这种方法可以简单地确定模糊尺度, 但当有噪声时,

$$G(u, v) |_{u=\pm\frac{N}{L}} \neq 0$$

可见, 此时该方法已经不能有效地解决这个问题了, 而且在实际应用中, 噪声总是存在的, 这就决定了该方法的实用性比较差. 尽管后来在此基础上提出了一些改进的方法, 如取对数, 但亮条纹阈值的选取会直接影响其估计的准确度, 因此需要一种新的有效的估计方法, 基于倒谱法的辨识方法就是在这个基础上提出的。

### 2.2 倒谱的定义和性质

根据应用背景的不同, 倒谱的定义也是不同的, 本文采用的倒谱定义如下:

$$\hat{c}(x, y) = F^{-1}(\ln |C(u, v)|) \quad (8)$$

其中  $|C(u, v)|$  表示  $c(x, y)$  的傅里叶变换的幅度谱,  $\hat{c}(x, y)$  表示与  $c(x, y)$  相对应的倒谱, 为了

表述方便将其记为:

$$\hat{c}(x, y) = (c(x, y)) \quad (9)$$

倒谱具有很多重要的性质,受篇幅的限制,只讨论跟本文有关的二维倒谱的性质并假定其二维倒谱是存在的.

性质 1 将二维卷积运算变成加法运算

若

$$g(x, y) = h(x, y) * f(x, y) \quad (10)$$

则

$$\hat{g}(x, y) = \hat{h}(x, y) + \hat{f}(x, y) \quad (11)$$

性质 2 等角旋转性<sup>[15]</sup>

若在极坐标系中,有  $(c(r, \theta)) = \hat{c}(r, \varphi)$ ,

则

$$(c(r, \theta - \alpha)) = \hat{c}(r, \varphi - \alpha) \quad (12)$$

该性质表明函数  $c(r, \theta)$  旋转角度  $\alpha$  后所得的倒谱等于将其倒谱  $\hat{c}(r, \varphi)$  朝同一个方向旋转同样的角度  $\alpha$

性质 3 原点对称性

如果  $c(x, y)$  是实函数,则  $\hat{c}(x, y)$  具有原点对称性.

$$\hat{c}(x, y) = \hat{c}(-x, -y) \quad (13)$$

性质 4 周期性

$$\hat{c}(x + M, y + N) = \hat{c}(x, y) \quad (14)$$

其中  $M, N$  分别为图像的行数、列数.

$\hat{c}(x, y)$  良好的性质使得倒谱方法得到了广泛的应用,本文所推导的对称性和周期性,不仅可以简化计算,同时也为本文算法的可靠性提供了理论论据.

### 2.3 基于倒谱法的点扩散函数辨识原理

据式(5)可知,它的零点出现以  $\frac{2\pi}{L}$  为周期,

因此  $h(x, y)$  的倒谱会出现较大的负颠峰<sup>[15-17]</sup>,最大负颠峰会在  $L$  与  $N - L$  处出现,据此可以确定其模糊尺度.图 4 中显示的是  $L = 30, N = 256$  时的情形,从图中可看出  $x = 30$  和  $x = 226$  处出现两个最大的负颠峰,其倒谱关于中心对称.

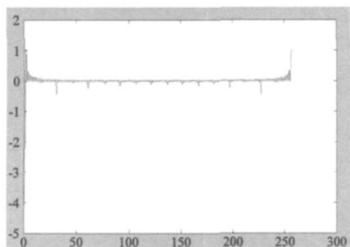


图 4  $h(x, y)$  的倒谱  $L = 30, N = 256$

Fig 4 Cepstrum of  $h(x, y)$   $L = 30, N = 256$

令式(1)中的  $n(x, y) = 0$  由倒谱的性质 1 可知:

$$\hat{g}(x, y) = \hat{h}(x, y) + \hat{f}(x, y) \quad (15)$$

一般原始清晰图像的傅里叶变换不会周期地出现零点<sup>[17]</sup>,因此它的倒谱不会在  $L$  处和  $N - L$  处产生较大的负颠峰,原始图像对  $h(x, y)$  的最大负颠峰的影响可以忽略不计,模糊图像倒谱的最大负颠峰表征了点扩散的特征,所以通过确定  $\hat{g}(x, y)$  的最大负颠峰的位置就可以确定运动模糊图像的模糊尺度.

对于模糊方向为  $\theta$  的运动模糊,利用性质 2 可以确定模糊方向和模糊尺度.

### 2.4 基于倒谱的系统辨识算法

基于上面的分析,提出了如下的系统辨识算法:

Step1 对模糊图像  $g(x, y)$  进行二维傅里叶变换  $\text{fft2}$  得到  $G(u, v)$ .

Step2 取  $G(u, v)$  的幅度谱  $|G(u, v)|$ ,为了保证  $|G(u, v)| = 0$  时有意义,对式(16)取对数得  $\hat{G}$ .

$$\hat{G}(u, v) = \ln(1 + |G(u, v)|) \quad (16)$$

Step3 通过反傅里叶得模糊图像  $g(x, y)$  的倒谱  $\hat{G}(x, y)$ .

Step4 将  $\hat{g}(x, y)$  分成大小相等的四部分,并按图 5 所示的方向进行相互交换,使原点从左上角移到中心位置.

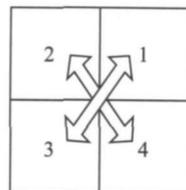


图 5 数据交换示意图

Fig 5 Schematic diagram of data exchange

Step5 基于性质 2,确定模糊尺度和模糊方向.

由性质 3 知其倒谱具有对称性,所以取图 5 所示的 1、4 部分数据用来确定倒谱最小值位置  $(i, j)$  即负颠峰的位置,则模糊尺度  $L$ :

$$L = \text{int}(\sqrt{i^2 + j^2} - 1 + 0.5) \quad (17)$$

模糊方向  $\theta$

$$\theta = \text{int}(\arctan(\frac{j}{i}) \times (\frac{180}{\pi}) + 0.5) \quad (18)$$

### 3 噪声对点扩散函数的影响分析

基于倒谱法的系统辨识方法具有较强的抗噪能力, 但当噪声的强度过大时会影响系统辨识的准确度. 为了研究噪声对点扩散函数的影响, 选取典型的均值为 0 的高斯白噪声作为研究对象并对大量图像进行了研究, 下面以图 6 所示的原始图像来加以分析说明.

将图 6 所示的原始图像变成模糊带噪图像, 其模糊参数及高斯白噪声情况见表 1, 对该模糊带噪图像采用本文方法的处理结果见表 1, 表 1 以及所有的其他图像的研究结果表明随着噪声的增大, 负巅峰的值有不断变小的趋势, 当 M atlab

加的噪声标准差大于 0.07 时, 在向量  $\bar{L}$  附近没有出现负的巅峰, 此时采用本方法去辨识必然失效.

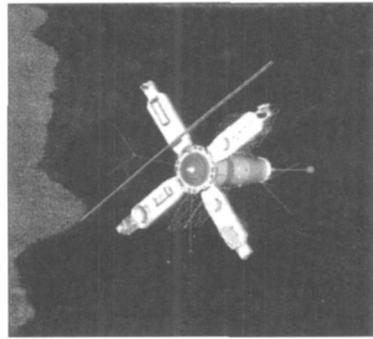


图 6 原始图像  
Fig 6 Original image

表 1 噪声对点扩散函数的辨识的影响 ( $L = 30 \theta = 45^\circ$ )

Table 1 Effect of noise on identification of point spread function ( $L = 30 \theta = 45^\circ$ )

噪声标准方差	0	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07
负巅峰的位置	(22, 21)	(22, 21)	(22, 21)	(22, 21)	(22, 21)	(22, 21)	(21, 21)	(2, 24)
负巅峰的值	-0.0951	-0.0357	-0.0231	-0.0177	-0.0137	-0.0111	-0.0119	-0.0117
估计的模糊尺度	29	29	29	29	29	29	29	23
估计的角度	44°	44°	44°	44°	44°	44°	45°	85°

### 4 基于 Richardson-Lucy 算法的复原原理和算法

#### 4.1 基于 Richardson-Lucy 算法的复原原理

基于 Richardson-Lucy 算法的图像复原方法现已广泛地应用到图像复原的各个领域, 它是一种基于噪声模型为泊松分布的方法. 它的原理可以归结为最大化似然函数的问题:

$$\max p(g|f) = \prod_{x,y} \frac{(h^* f)^g \exp(-h^* f)}{g(x,y)!} \quad (19)$$

其中  $h, g, f$  分别表示点扩散函数、模糊图像、清晰的原始图像.

对式 (19) 分别关于  $h, f$  取偏导得:

$$h = \left( \frac{g}{h^*} * f^{\leftarrow} \right) h \quad (20)$$

$$f = \left( \frac{g}{h^*} * h^{\leftarrow} \right) f \quad (21)$$

其中  $\leftarrow$  表示取共轭运算.

用 picard 迭代得:

$$h^{n+1} = \left( \frac{g}{h_n^*} * f_n^{\leftarrow} \right) h^n \quad (22)$$

$$f^{n+1} = \left( \frac{g}{h_n^*} * h_n^{\leftarrow} \right) f^n \quad (23)$$

其中  $h^n, h^{n+1}$  分别表示第  $n$  次、第  $n+1$  次迭代的点扩散函数,  $f^n, f^{n+1}$  分别表示第  $n$  次、第  $n+1$  次迭代的复原图像.

式 (22)、式 (23) 表明采用交叉迭代方法就能求出点扩散函数和复原图像, 实现图像的盲复原, 但实验结果表明如果没有上一步点扩散的估计, 复原效果很差.

#### 4.2 基于 Richardson-Lucy 方法的图像复原算法

根据以上理论, 本文提出了基于交叉迭代法的复原方法, 具体步骤如下:

step1 根据倒谱法确定的模糊尺度和模糊方向, 确定点扩散函数  $h$ .

step2 初始化:

迭代次数  $m$ , 令

$$n = 0$$

$$h^n = h$$

$$f^n = g$$

step3 定点迭代:

判定  $n$  是否大于  $m$ , 若是转 step4 否则据式

(22)、式(23)求  $h^{n+1}, f^{n+1}$ ,  $n = n + 1$  并转 step3.

Step4输出复原图像  $f$  结束程序.

### 5 实验结果及结论

为验证本文所提算法的有效性和可靠性,进行了如下实验:原始图像如图 6所示,图 7(a)是模糊尺度为 30 方向为 135°的仿真图像,图 7(b)是其处理后的图像,对比图 6可以看出图 7(b)中

的天线细节都能得到很好的恢复,说明本文的方法能够很好地保留图像细节和纹理;图 7(c)是模糊尺度为 30 方向为 135°,所加的高斯白噪声的标准差是 0.05 的仿真图像,图 7(d)是其处理后的图像,从图中可以看出在有较强噪声的情况下,图像细节和纹理仍然能够很好地恢复,说明本方法抗噪能力强,鲁棒性好.

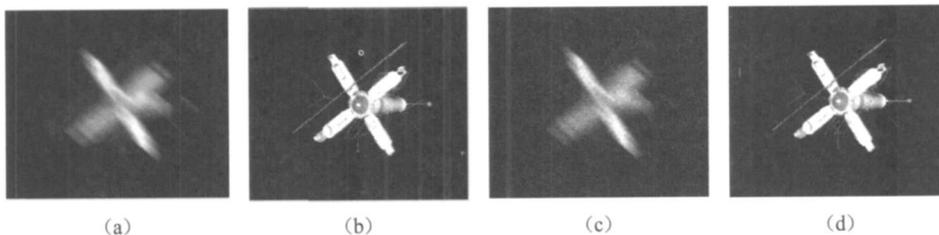


图 7 仿真图像及其处理效果图

Fig 7 Simulated image and its treatment effect image

为了进一步验证本算法的可靠性和适用性,将相机固定在平动/转动的平台上,曝光时间、平

动/转动速度、所拍的图像及其处理结果见图 8

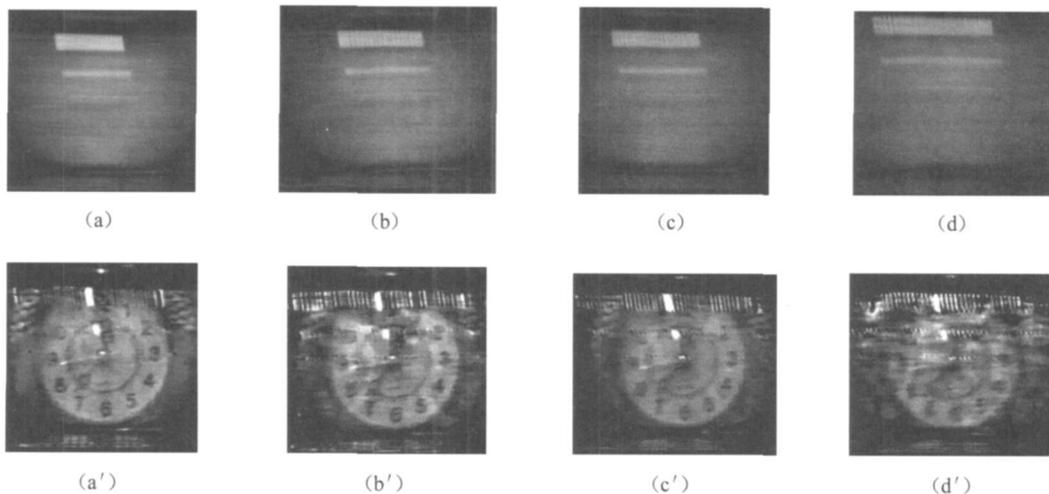


图 (a) 实拍图(运动速度 50 cm/s 拍摄时间 0.8 s), 图 (a') 是图 (a) 的复原图;  
图 (b) 实拍图(运动速度 60 cm/s 拍摄时间 0.8 s), 图 (b') 是图 (b) 的复原图;  
图 (c) 实拍图(运动速度 50 cm/s 拍摄时间 1.0 s), 图 (c') 是图 (c) 的复原图;  
图 (d) 实拍图(运动速度 60 cm/s 拍摄时间 1.0 s), 图 (d') 是图 (d) 的复原图;

图 8 平动平台/转动平台上的实拍图像及其处理效果图

Fig 8 Real shooting image and its treatment effect image on translation motion / rotation platform

从图 8 可看出本文所研究的模糊图像盲复原方法效果显著,图像细节和纹理特征恢复得较好,没有出现一般处理方法中的振铃和鬼影效应.

恢复上有很强的优势,抗噪能力强,鲁棒性好,同时在恢复过程中,不会产生振铃和鬼影效应.这是因为:一采用了新的基于倒谱理论的点扩散函数辨识方法,保证了点扩散函数的准确估计;二在图像恢

以上实验结果表明,本方法在图像细节和纹理

复过程中采用了基于 Richardson-Lucy 的恢复方法, 这就保证了图像细节和纹理得到有效地恢复。因此该方法可靠性好、适用性广、实用性强。

#### 参考文献:

- [1] 张航, 罗大庸. 图像盲复原算法研究现状及其展望 [J]. 中国图象图形学报, 2004, 9(10): 1145-1152
- [2] Andrzej CICHOCKI, Shun-ichi AMARI. 自适应盲信号与图像处理 [M]. 吴正国, 唐劲松, 章林柯, 等译. 北京: 电子工业出版社, 2005: 47-52
- [3] Richardson W H. Bayesian-based iterative method of image restoration [J]. Journal of optical society of America, 1972, 62: 55-59.
- [4] Lucy L B. An iterative technique for rectification of observed distributions [J]. The Astronomical Journal, 1974, 79: 745-754.
- [5] 汪雪林, 韩华, 彭思龙. 基于小波域局部高斯模型的图像复原 [J]. 软件学报, 2004, 15(3): 443-450.
- [6] Tony F Chan, Chi-Kwong Wong. Total variation blind deconvolution [J]. IEEE TRANSACTIONS ON IMAGE PROCESSING, 1998, 7(3): 370-375.
- [7] 邓泽峰, 熊有伦. 基于频域方法的运动模糊方向识别 [J]. 光电工程, 2007, 34(10): 98-101.
- [8] 陈滨宁, 张贤达. 基于倒谱的非最小相位 FIR 系统的自适应辨识 [J]. 信号处理, 1997, 13(2): 169-175.
- [9] LIX, YU H. Transparent and robust audio data hiding in cepstrum domain [C] // IEEE International Conference on Multimedia and Expo (ICME 2000), 2000: 397-399.
- [10] Chen J, Palival K K, Nakamura S. Cepstrum derived from differentiated power spectrum for robust speech recognition [J]. Speech Communication, 2003, 41(2): 469-484.
- [11] Childers D G, Shinner D P, Kerner R C. The Cepstrum: A Guide to Processing [J]. IEEE Proceeding, 1977, 65(10): 1428-1443.
- [12] Taxt T. Restoration of medical ultrasound images using two-dimensional homomorphic deconvolution [J]. IEEE Trans Ultrason Ferroelec Freq Control, 1995, 42: 543-554.
- [13] 周曲, 颜国正, 王文兴. 倒谱在混合模糊图像分析中的应用研究 [J]. 光学技术, 2007, 33(6): 910-917.
- [14] 刘微, 朱明, 李向荣, 等. 运动模糊图像恢复过程中的几个关键问题 [J]. 电子器件, 2005, 28(3): 111-114.
- [15] Raphael R. On the cepstrum of two-dimensional functions [J]. IEEE Transactions on information theory, 1975: 214-217.
- [16] Cannon J M. Blind deconvolution of spatially invariant images blurs with phase [J]. IEEE Trans Acoust, Speech, Signal Processing, 1976, 24(1): 58-63.
- [17] Chen Y W, Kodama R, Nakao Z. Penumbra imaging of laser-impacted targets and its blind reconstruction [J]. IEEE transactions on nuclear science, 1998, 45(3): 992-996.