

文章编号: 0253-2239(2008)09-1703-07

# 基于微分图像自相关的离焦模糊图像盲复原

赵琳 金伟其 陈翼男 苏秉华

(北京理工大学信息科学技术学院光电工程系, 北京 100081)

**摘要** 针对离焦模糊图像的盲复原算法的研究具有重要的实际意义和实用价值。根据光学离焦成像模型, 研究提出了一种基于微分图像自相关的离焦模糊图像超分辨率盲复原算法, 即首先采用拉普拉斯算子对离焦模糊图像进行二阶微分并求微分图像的自相关, 然后从自相关结果所包含的信息中确定离焦模糊半径, 最后以离焦模糊模型结合 MPMAP 超分辨率复原算法对离焦模糊图像进行盲复原。实验证明: 算法能够以较高的精度估计出离焦模糊半径并实现离焦模糊图像的盲复原, 该算法较其它同类算法在减少计算过程中需要考虑的各类因素的同时也减少了计算量, 提高了结果精度, 依靠超分辨率复原算法获取更多的复原图像信息, 已在实际刑侦和物证鉴定的离焦模糊图像判读和鉴定中获得成功应用。

**关键词** 图像复原; 离焦模糊图像; 自相关; 拉普拉斯算子; 超分辨率

**中图分类号** TN922.73 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20082809.1703

## Blind Restoration for Defocus Blurred Image Based on Autocorrelation of Derivative Image

Zhao Lin Jin Weiqi Chen Yanan Su Binghua

(Department of Optical Engineering, School of Information Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract** The research on the blind restoration for the images blurred by defocus effect has important meaning and actual metric. A super-resolution blind restoration algorithm for defocus blurred images was suggested according to the model of optical defocusing by using autocorrelation of derivative image. The autocorrelation of the second-order derivative blurred image received by Laplacian was computed, the radius of defocusing blur was confirmed via the information contained in the result of the autocorrelation, and the restoration was finally achieved by MPMAP super-resolution method using the estimated defocusing radius as parameter. Experiments illuminate that the proposed algorithm can accurately estimate the radius of defocusing blur and restore clear images. Compared with other methods, the proposed algorithm declines the computation quantity, improves result precision and obtains more detailed information by using the super-resolution restoration algorithm. It has been successfully applied into judging or appraisal of defocus images in practice works.

**Key words** image restoration; defocus blurred image; autocorrelation; Laplacian; super-resolution

### 1 引言

在刑侦与物证鉴定的实际工作中, 面对的往往是由于照相机或摄像机等成像设备对焦不准而导致的离焦模糊图像, 且由于离焦量较大, 使得肉眼难以

直接判读或识别, 因此, 采用数字图像处理技术从模糊图像中提取更多的有价值信息, 对于提高刑侦和物证鉴定的准确性和有效性具有重要的现实意义。对于此类光学离焦图像盲复原的关键是离焦模糊半

**收稿日期**: 2007-11-02; **收到修改稿日期**: 2008-01-22

**基金项目**: 中国信息安全产品测评认证中心开放基金(P2006019EF)资助课题。

**作者简介**: 赵琳(1979—), 男, 博士研究生, 主要从事光电成像与数字图像处理等方面的研究。

E-mail: destiny419@bit.edu.cn

**导师简介**: 金伟其(1961—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事夜视与红外技术、光电图像处理、光电检测与仪器等方面的研究。E-mail: jinwq@bit.edu.cn

径参数的估算以及选择有效的复原处理算法。

离焦模糊图像盲复原算法一直是国内外图像处理算法研究与应用的重要内容:如 1991 年 K. Liu 和 J. Quan 等<sup>[1]</sup>提出采用梯度法粗略估计离焦模糊半径,再用最小二乘法和 Fibonacci 法精确确定模糊半径;2004 年郑楚君等<sup>[2]</sup>利用模糊图像的频域中的零点位置来估计模糊半径,采用维纳(Wiener)滤波对模糊图像进行复原;2006 年日本 Fujiwara 等<sup>[3]</sup>采用小波变换的方法研究了离焦模糊半径对于图像高频细节信息的影响;2007 年李征等<sup>[4]</sup>采用二元树复小波变换法结合 Wiener 滤波法对离焦模糊图像进行复原;同一年杨鑫等<sup>[5]</sup>采用遗传算法结合逆滤波法对离焦模糊图像进行复原。此外,孙杰于 2007 年对目前所使用的聚焦评价函数进行了横向综合性比较,可以使用聚焦评价函数定性地去判定图像是否存在离焦以及离焦程度的高低<sup>[6]</sup>。超分辨率图像复原方法<sup>[7]</sup>凭借其在复原图像频带限制内信息的同时兼有部分复原图像频带限制以外信息的能力最近获得广泛的关注。刘扬阳等<sup>[8,9]</sup>研究提出了一种基于超分辨率图像处理的模糊图像盲复原算法,其利用推定复原图像的拉普拉斯算子获得参数的估计,算法用于遥感图像复原取得较好的效果。本文将通过微分图像自相关运算与超分辨率图像复原算法结合,研究适合刑侦和物证鉴定应用的光学离焦模糊图像盲复原算法。

## 2 离焦模糊退化模型

对于线性空间不变成像系统,图像退化过程可表示为

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

式中  $g(x, y)$  为模糊图像,  $h(x, y)$  为点扩散函数(Point spread function, PSF),  $f(x, y)$  为清晰图像,  $n(x, y)$  为加性噪声,  $*$  表示卷积。

当光学系统离焦时,物空间点映射到像空间成一圆斑,PSF 可简化为一个均匀分布的圆盘函数,即

$$h(x, y) = \frac{1}{\pi r^2} \text{rect}\left(\frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{r}\right) = \begin{cases} 1/(\pi r^2), & x^2 + y^2 \leq r^2 \\ 0, & \text{other} \end{cases} \quad (2)$$

式中  $\text{rect}(x) = \begin{cases} 1, & |x| \leq 0.5 \\ 0, & |x| > 0.5 \end{cases}$  为单位盒型函数; $r$

是模糊半径对于离焦模糊图像的盲复原, $r$  是需要辨识的主要参数。

## 3 基于自相关的离焦模糊图像的盲复原算法

### 3.1 一维盒型函数的分析

由于拉普拉斯算子是一个无方向性的微分算子,常用于提取图像中的边缘信息,而离焦图像 PSF (2)式是一个理想的二维圆盒形函数,提取盒形函数的边缘进行判断,就有望确定离焦 PSF 的特征参数。不失一般性,我们先分析一维盒型函数,这里以离散步长  $h=1/4$  和  $h=1/5$  对  $\text{rect}(x)$  进行离散采样,图 1(a)和图 1(b)分别给出对应的离散  $\text{rect}(x)$  函数及其在一维拉氏算子  $[1, -2, 1]$  作用下的离散  $\nabla^2 \text{rect}(x)$  函数曲线,图 1(c)和图 1(d)分别给出离散  $\nabla^2 \text{rect}(x)$  函数进一步进行离散自相关  $S_{\nabla^2 \text{rect}(x)}^2$  的函数曲线(数值已归一化)。可以看出:自相关函数存在中心最大值和 4 个对称的最小值,其中内部一对最小值之间的采样点数  $N_1 = N_0 - 2$  [ $N_0$  为  $\text{rect}(x)=1$  部分的的采样点数,定义为  $N_0 = 1/h + 1$ ],外侧一对最小值之间的采样点数  $N_2 = 2N_0 + 1$ 。

不难验证,如果  $S_{\nabla^2 \text{rect}(x)}^2$  与一个对称的单峰函数卷积,卷积后的曲线主体形状和峰值位置并不变,只是由于  $S_{\nabla^2 \text{rect}(x)}^2$  内侧一对最小值峰距离中心最大值峰较近,其绝对值较外侧一对最小值峰将有一定的减小,因此,外侧一对最小值峰成为卷积曲线的最小值峰,图 2 给出了以一维高斯分布卷积模拟的曲线。由此可根据卷积结果的最小值位置之间的距离(离散点数)确定  $\text{rect}(x)$  的半径对应的离散点数:

$$N_r = \frac{N_2 - 3}{4}, \quad (3)$$

类似的结果可以推广到二维情况,图 3 给出了半径  $N_r=3$  的二维离焦图像的 PSF 函数及其在无方向

性的八邻域拉氏微分算子  $\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$  作用后的自

相关曲面图。可以看出:利用在径向方向的最小峰值对之间位置的判断,仍可通过(3)式确定离焦半径  $N_r$ 。

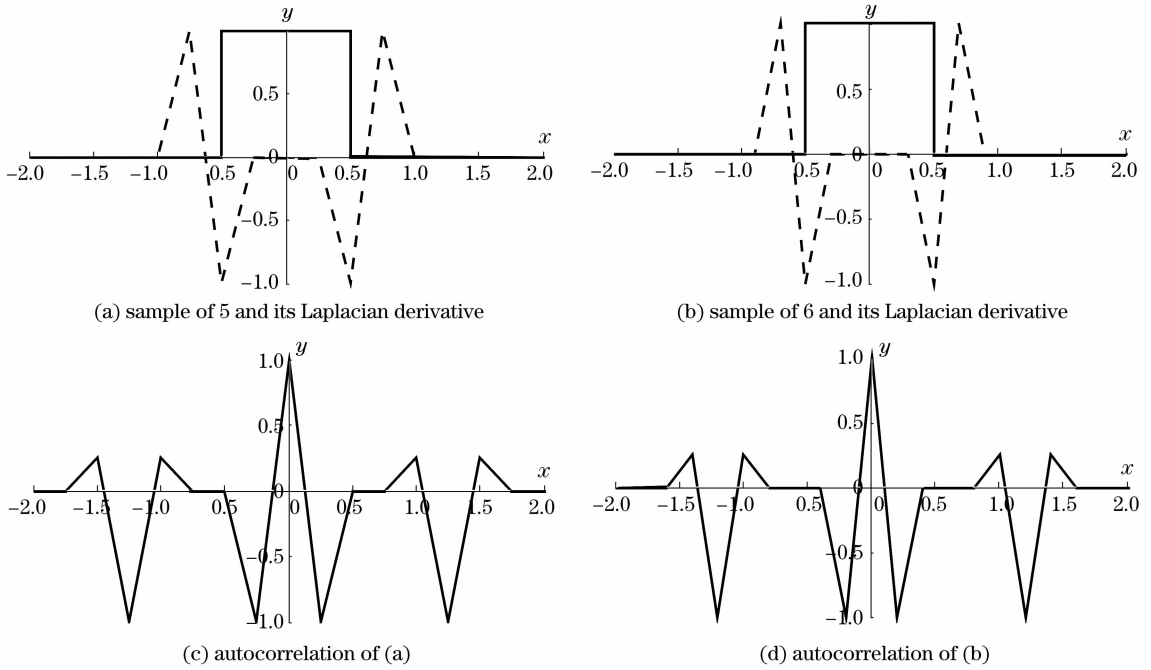


图 1 不同长度信号的 Laplace 卷积及其自相关

Fig. 1 Laplace convolution and their autocorrelation of different length signals

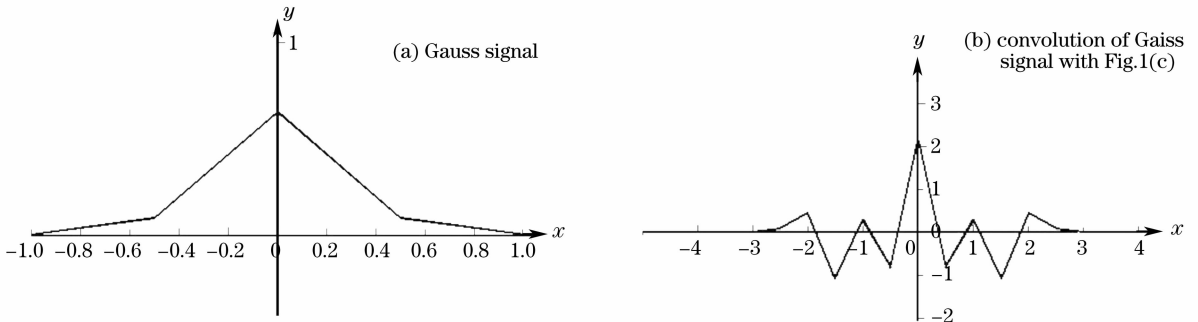


图 2 Gauss 信号与自相关信号进行卷积

Fig. 2 Convolution of Gaussian signal with autocorrelation signal

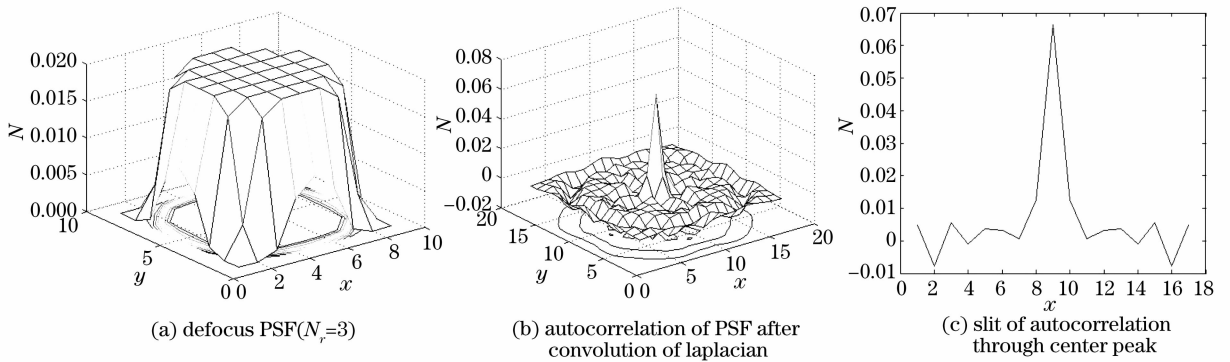


图 3 离焦点扩散函数的自相关

Fig. 3 Autocorrelation of defocus PSF

### 3.2 退化图像的模型分析

为了利用离焦点扩散函数的性质,假设不考虑噪声,对(1)式进行拉氏算子微分,得

$$\nabla^2 g(x, y) = \iint f(\alpha, \beta) \nabla^2 h(\alpha - x, \beta - y) d\alpha d\beta = f(x, y) * \nabla^2 h(x, y), \quad (4)$$

利用求卷积与求相关的转换关系,对(4)式求自相关,可以得到

$$S = \nabla^2 g(x, y) \otimes \nabla^2 g(x, y) = S_f * S_{\nabla^2 h}, \quad (5)$$

式中 $\otimes$ 表示二维相关运算; $S_f = f(x, y) \otimes f(x, y)$ 为清晰图像的自相关,通常表现为对称单峰函数; $S_{\nabla^2 h} = \nabla^2 h(x, y) \otimes \nabla^2 h(x, y)$ 是二维离焦 PSF 经过拉氏算子微分后的自相关函数,据上讨论,我们可望从  $S$  中心附近的最小极小点位置确定光学离焦的参数。

为了验证这一结论,图 4 给出实际图像的模拟

处理结果,其中图 4(a)和图 4(b)分别为清晰图像  $f(x, y)$ 及其自相关图像  $S_f$ ,图 4(c)和图 4(d)分别为经  $N_r=3$  离焦 PSF 作用的模糊图像  $g(x, y)$ 及其微分自相关图像  $S$ ,图 4(d)和图 4(e)分别为过图 4(d)主峰沿坐标轴的自相关曲线及其局部放大曲线。由图 4(e)及(4)式,即可判断出离焦模糊图像的特征半径值  $N_r$ 。表 1 给出由图 4(a)在不同离焦半径模糊下估计得到的特征半径值。可以看出算法可很好地预估出特征半径,最大相对误差不大于 10%。

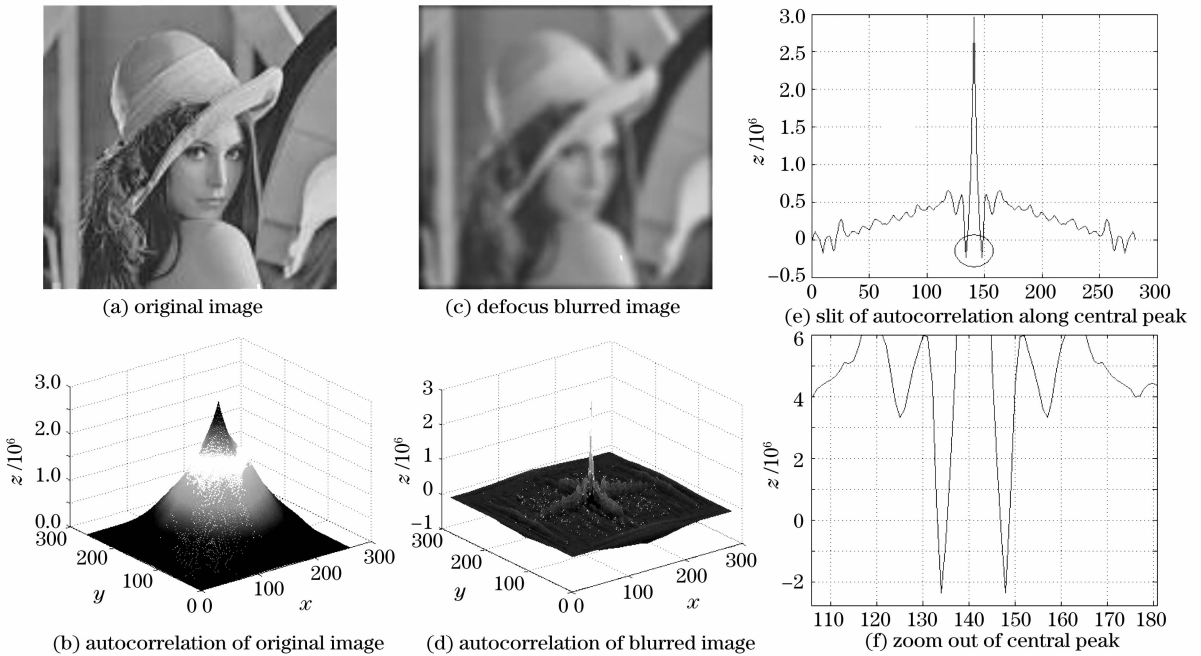


图 4 离焦模糊图像的自相关

Fig. 4 Autocorrelation of defocus blurred image

表 1 不同离焦模糊的相关估计

Table 1 Estimation of different defocus blur by autocorrelation

Experimental $N_r$	2.0	2.5	3.0	4.0	5.0	6.0
Calculated $N_r$	2.2	2.7	3.0	4.0	5.0	6.5
Relative error / %	10.0	8.0	0.0	0.0	0.0	8.3

### 3.3 MPMAP 超分辨力图像复原方法

在预估点扩散函数及其特征参量后,优选有效的复原算法是实现模糊图像盲复原的另一个重要内容。通过对目前常用的传统算法以及近年来迅速发展的神经网络法、小波算法、遗传算法和超分辨力算法等的比较分析研究,最终选择基于 Markov 约束的 Poisson-MAP 图像复原算法(MPMAP)<sup>[7]</sup>进行复原处理,算法的表达式为

$$f_{ij}^{n+1} = f_{ij}^n \exp \left\{ \beta \left\{ \left[ \frac{g_{ij}}{(f^n * h)_{ij}} - 1 \right] \oplus h_{ij} - \alpha \frac{\partial}{\partial f_{ij}} U(f^n) \right\} \right\}, \quad (6)$$

式中  $U(f)$  为 Gibbs 分布中的能量函数,其应小于某一恒定能量函数; $h$  为点扩散函数; $\alpha$  为 Lagrange 乘子; $\beta$  为步长因子,用于控制算法的收敛特性和速度; $n$  为迭代次数,一般取值在 100 至 300 之间, $n$  偏小会影响对细节信息的复原, $n$  偏大则耗时较长且易导致噪声放大,影响复原结果。

### 3.4 基于微分图像自相关的离焦模糊图像超分辨力盲复原算法

根据以上分析,通过将算法有效融合,得到基于微分图像自相关的离焦模糊图像超分辨力盲复原算法,其计算过程为

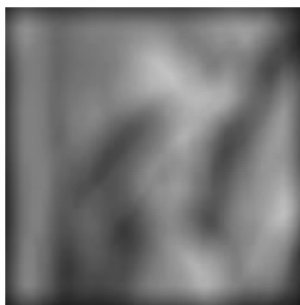
- 1) 采用拉氏算子对离焦模糊图像进行无方向微分处理；
- 2) 通过自相关估计出离焦 PSF 的模糊半径  $N_r$ ；
- 3) 由预测的  $N_r$ ，采用 MPMAP 法(6)式迭代出复原图像，实现对离焦模糊图像的盲复原。

分析目前的几种离焦模糊盲复原算法，Wiener 频率域滤波复原法<sup>[2]</sup>运算速度较快，但在求取离焦模糊半径  $r$  时，对频率域中零点对应的半径取数学期望，存在一定的误差；二元树复小波变换法<sup>[4]</sup>具有一定的效果，但是神经网络的选取，训练样本的选取与数量以及神经网络的训练程度都将影响到估计结果；遗传算法<sup>[6]</sup>相对稳定，但在最初利用傅立叶频谱进行粗略估计之时具有一定程度的误差，若  $r$  不在此范围之内，那么后面的工作将无法开展，并且遗传算法受到群体个数，交叉概率，变异概率与运行代数问题的制约，既影响其最后的估计结果又降低了其可操作性；文献[8,9]提出的模糊图像超分辨率盲复原算法需要与复原算法联合进行多重迭代计算，计算量较大。

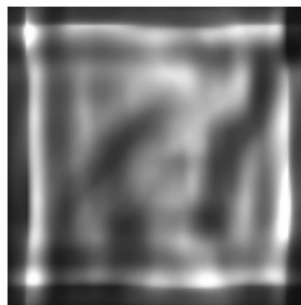
本文基于微分图像自相关的离焦模糊图像超分辨率盲复原算法与上述方法相比较，具备以下几个优点：1) 能够一次性精确估计出离焦模糊半径  $N_r$ ，无需诸如求数学期望、多重迭代等运算；2) 不需要像神经网络法那样需要大量样本并训练网络，也不需要像遗传算法那样进行许多关键参数的设置，便于实际应用；3) 采用超分辨率复原方法，在复原图像细节信息上较传统复原方法具有较大优势。

#### 4 离焦模糊图像的复原与分析

为了分析算法对离焦模糊图像的复原效果，我们对一系列的模拟和真实离焦模糊图像进行了处理，取得了较好的复原效果。



(a) blurred image with  $N_r=10$



(b) restored by Matlab



(c) restored image by this proposed method

图 6 深度离焦模糊图像的复原结果

Fig. 6 Restored deep defocus blurred image

#### 4.1 模拟离焦模糊图像的复原

对离焦模糊图像图 4(c) 采用著名软件包 Matlab 所带的图像盲复原函数<sup>[10]</sup>及本文算法分别进行复原处理，复原效果如图 5 所示。表 2 给出模糊图像与复原图像的典型客观评价参数均方差 MSE，峰值信噪比 PSNR 和改善信噪比 ISNR<sup>[11]</sup>，以及主观与客观评价因素相结合的质量因子  $Q$ <sup>[12]</sup>， $Q$  综合反映了相关度偏差 $[-1, 1]$ ，亮度失真 $[0, 1]$  和对比度失真 $[0, 1]$  三个因素的乘积。它的变化范围是 $[-1, 1]$ 。 $Q$  的绝对值越小，图像质量越差。

表 2 模糊图像与复原图像的评价 ( $N_r=3$ )

Table 2 Estimation of blurred image and restored images

	$(N_r=3)$			
	MSE	PSNR	ISNR	Q
Blurred image	0.0054	22.6794		0.9067
Matlab	0.0117	19.2922	-3.3872	0.9177
Proposed method	0.0003	34.9709	12.2915	0.9925



(a) restored by Matlab



(b) restored by this proposed method

图 5 图 4(c) 离焦模糊图像 ( $N_r=3$ ) 的复原图像

Fig. 5 Restored defocus images blurred with  $N_r=3$

刑侦模糊图像的特点之一是具有深度模糊。加大模糊半径  $N_r=10$  像素如图 6(a) 所示，复原结果如图 6(b)，此时本文提出的方法能获得很好的复原效果。表 3 给出其客观评价参数。

表 3 图 6 的模糊图像与复原图像评价( $N_r=10$ )Table 3 Estimation of blurred image and restored images of Fig. 6 ( $N_r=10$ )

	MSE	PSNR	ISNR	Q
Blurred image	0.0199	16.9816		0.8690
Matlab	0.0291	15.3205	-1.6611	0.7933
Proposed method	0.0021	26.6681	9.6865	0.9778

## 4.2 实际运动模糊图像盲复原

本文提出的盲复原算法对实际离焦模糊图像也具有明显的复原效果。对实际拍摄的严重离焦模糊图像图 7(a),采用本文算法估计出离焦模糊半径约为 10 pixel,图 7(b)给出盲复原效果,已可从原来完全模糊不清的车牌图像中判别出车牌号。对实际拍摄的离焦模糊图像图 8(a),采用本文算法求出离焦模糊半径约为 3.5 pixel,图 8(b)给出盲复原效果,其中文字已经可以辨识。

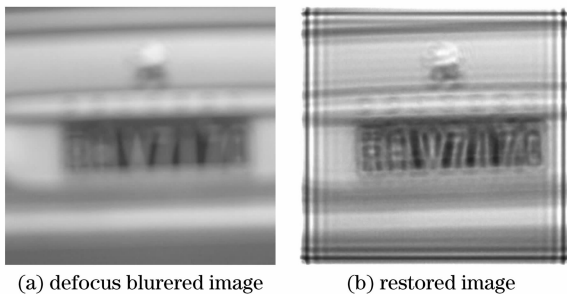


图 7 离焦模糊车牌复原

Fig. 7 Restored image of defocus blurred license tag



图 8 离焦模糊文本复原

Fig. 8 Restored image of defocus blurred text

需要指出,对于实际离焦模糊图像的盲复原,一般图像复原的客观评价参数已无法评价,目前最有效的方法仍然是人眼主观评价。对于刑侦和物证鉴定中的离焦模糊图像,一般可分为深度模糊和一般模糊,前者当复原图像较模糊图像能够获取新的有用信息,后者复原图像部分去除模糊效果,使图像细节更有利于辨识,这些均可认为是有效的复原,

因此,图 7 的车牌号码和图 8 的文字辨识均能达到相应的盲复原评价标准。

## 5 结 论

根据光学离焦成像的特性,本文研究提出了一种基于微分图像自相关的离焦模糊图像超分辨率盲复原算法,算法不仅对一般模糊程度的图像具有较传统复原算法更好的图像细节复原效果,而且对于诸如刑侦与物证鉴定中用传统算法难以获得有效复原的离焦模糊图像也能够获得明显的复原,通过模拟实验和对实际刑侦和物证鉴定模糊图像的复原,均取得了令人满意的效果。

目前的算法主要用于信噪比较高的图像,如何提高运算速度以及在有噪声干扰情况下获得更高精度的模糊半径估算将是今后研究的重点。

## 参 考 文 献

- 1 K. Liu, J. Quan *et al.*. Identification and restoration of images with out-of-focus blurs[C]. *Proc. SPIE*, 1991, **1567**: 720~728
- 2 Zheng Chujun, Li Rong, Chang Hongsen. Restoration of defocus blurred digital image using Wiener filter in frequency domain[J]. *Laser J.*, 2004, **25**(5): 57~58  
郑楚君,李 榕,常鸿森. 离焦模糊数字图像的 Wiener 滤波频域复原[J]. *激光杂志*, 2004, **25**(5): 57~58
- 3 Hisanaga Fujiwara, Zhong Zhang, Tetsuo Miyake. Defocused image restoration using translation invariant wavelet transform [C]. *SICE-ICASE International Joint Conference*, 2006, in Bexco, Busan, Korea
- 4 Li Zheng, Su Liyun, Yan Jian *et al.*. Semi-blind defocused image restoration with dual-tree complex wavelet transform [J]. *J. Sichuan University (Natural Science Edition)*, 2007, **44**(2): 316~320  
李 征,苏理云,杨 舰等. 用二元树复小波变换法实现离焦图像的半盲复原[J]. *四川大学学报(自然科学版)*, 2007, **44**(2): 316~320
- 5 Yang Xin, Gao Hong. Identification of defocus blurred image based on genetic algorithm and its restoring methods [J]. *J. Changchun Normal University (Natural Science)*, 2007, **26**(4): 92~93  
杨 鑫,高 红. 基于遗传算法的散焦模糊图像辨识及恢复方法 [J]. *长春师范学院学报(自然科学版)*, 2007, **26**(4): 92~93
- 6 Sun Jie, Yuan Yuehui, Wang Chuangyong. Comparison and analysis of algorithms for digital image processing in autofocusing criterion [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(1): 35~39  
孙 杰,袁跃辉,王传勇. 数字图像处理自动图像聚焦算法的分析和比较 [J]. *光学学报*, 2007, **27**(1): 35~39
- 7 Su Binghua, Jin Weiqi, Niu Lihong *et al.*. Poisson-map super-resolution image restoration algorithm markov constraint [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(4): 492~496  
苏秉华,金伟其,牛丽红等. 基于 Markov 约束的泊松最大后验概率超分辨率图像复原法 [J]. *光子学报*, 2002, **31**(4): 492~496
- 8 Liu Yangyang, Jin Weiqi, Su Binghua *et al.*. Progress of super-resolution reconstructing images schemes and application in remote-sensing image [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2005, **34**(1): 70~73

- 刘扬阳, 金伟其, 苏秉华等. 超分辨率图像处理技术进展及在遥感中的应用[J]. 红外与激光工程, 2005, **34**(1): 70~73
- 9 Liu Yangyang, Jin Weiqi, Su Binghua *et al.*. Identification of blurred system based on super-resolution reconstructing image schemes[J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2005, **16**(3): 213~216
- 刘扬阳, 金伟其, 苏秉华等. 基于超分辨率图像复原算法的模糊系统辨识[J]. 光电子·激光, 2005, **16**(2): 213~216
- 10 Rafale C. Gonzalez, Richard E. Woods, Steven L. Eddins. *Digital Image Processing Using Matlab* [M]. 北京, 电子工业出

- 版社, 2005. 133~134
- 11 Niu Lihong, Ni Guoqiang, Su Binghua. RBF neural network based image fusion restoration approach [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(2): 316~320
- 牛丽红, 倪国强, 苏秉华. 基于RBF神经网络的图像融合复原方法研究[J]. 光子学报, 2006, **35**(2): 316~320
- 12 Z. Wang, A. C. Bovik. A universal image quality index [C]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2002, **9**(3): 81~83

## 《激光与光电子学进展》“光学设计”专题征稿启事

《激光与光电子学进展》是中科院上海光机所主办的的科技进展类期刊, 中文核心期刊, 创刊于1964年, 是国内第一本激光领域的专业期刊。本刊以及时报道国内外激光与光电子学领域科技的最新研究成果与技术应用为宗旨, 促进国内外学术交流, 沟通科研与产业的联系。

光学设计是光学产业的高级技术之一, 在光电、半导体、汽车等行业中起着重要的作用。为了深入研讨光学设计技术, 探索光学设计最新理念、成功案例, 《激光与光电子学进展》将于2008年12期推出“光学设计”专刊, 现向光学设计研发、应用人员公开征稿, 具体要求如下:

1. 来稿可以为综述、研究论文和实例分析, 综述要求内容全面, 能反映最新研究进展; 研究论文要求具有创新性; 实例分析要求应用性强, 分析深入, 有一定的代表性;

2. 综述要求第一作者有丰富的光学设计经验, 在某一方面有较深入的研究或者能够纵观全局, 字数不限;

3. 研究论文和实例分析字数在5000~10000, 优秀文章更可获得光学设计专家的点评和指导;

4. 本次专题征稿截止时间为2008年10月15日, 可在本刊主页投稿或通过信箱投稿 [lop@siom.ac.cn](mailto:lop@siom.ac.cn), 如有问题欢迎垂询(021-69918166);

5. 本次专题征稿审稿通过, 在本刊发表不收取版面费; 本期光学设计专刊, 同期报道上海光机所第5届光学设计高级讲习班、光学设计大赛, 欢迎投稿, 敬请关注。

《激光与光电子学进展》编辑部

2008-06-23