

一种离焦模糊图像客观检测的新方法

王正友^{1),2)} 伍世虔¹⁾ 徐升华¹⁾ 万常选¹⁾ 方志军¹⁾ 肖文¹⁾ 曾卫明¹⁾

¹⁾(江西财经大学信息管理学院, 南昌 330013) ²⁾(江西省高性能计算技术重点实验室, 南昌 330022)

摘要 为了更精确地进行离焦模糊图像检测,提出了一种针对一幅图的离焦模糊图像客观检测的新方法,其核心思想是由线扩展函数(LSF)得到离焦模糊图像的点扩展函数(PSF)。该方法首先假定图像中至少能检测到一条明显边缘,然后由此边缘构造LSF。由于作用于空间域,无需复杂的傅里叶变换或迭代运算,因此该方法速度很快。此外,为使检测方法更具普遍性,还提出了离焦模糊检测的一般准则,这种准则适用于所有图像而不依赖于图像的内容。实验结果验证了该方法的精确性和有效性。

关键词 离焦 点扩散函数 线扩散函数 模糊检测 边缘检测

中图分类号: TP391.41 **文献标识码**: A **文章编号**: 1006-8961(2007)06-1008-06

A New Method for Objective Measurement of Out-of-Focus Blurred Images

WANG Zheng-you^{1),2)}, WU Shi-qian¹⁾, XU Sheng-hua¹⁾, WAN Chang-xuan¹⁾,
FANG Zhi-jun¹⁾, XIAO Wen¹⁾, ZENG Wei-ming¹⁾

¹⁾(School of Information Technology, Jiangxi University of Finance & Economics, Nanchang 330013)

²⁾(Key Laboratory of High-Performance Computing Technology, Jiangxi Province, Nanchang 330022)

Abstract This paper presents a new method for objective measurement of out-of-focus blurred images of one authentic image. The essential idea is to derive the point spread function (PSF) of an out-of-focus blur image from the line spread function (LSF). In this method, it is assumed that at least one sharp edge could be detected. The LSF is thereafter constructed from the edge(s). This approach has fast speed as it works in spatial domain with neither complex Fourier transform nor iterative computation. Moreover, a generic criterion for out-of-focus blur measurement is proposed and it can be applied to all images being independent of image contents. The experimental results validate the accuracy and efficiency of the proposed method.

Keywords out-of-focus, point spread function, lines spread function, blur measurement, edge detection

1 引言

聚焦是成像系统的重要问题。虽然目前大多数成像系统都有自动调焦装置,但对基于图像的自动系统依然会出现离焦现象。由于离焦会降低图像质量,比如造成高频分量的衰减或丢失,从而导致图像

分析和场景理解困难。文献[1~3]中提到几种被动聚焦检测技术,如梯度检测等。由于这些方法依赖于图像内容,且其检测标准并不统一,因此只在特定的情况下有效,而要判断任意一幅图像的聚焦状况,则不可能。

近年来,一些研究人员开展了针对一幅图(无参考)的离焦模糊程度的检测研究。文献[4]针对

基金项目:江西省教育厅教育科技项目(赣教技字[2006]232);江西省高性能计算技术重点实验室开放基金(JXHC-2005-004)

收稿日期:2005-08-23;**改回日期**:2006-02-27

第一作者简介:王正友(1972~),男,副教授,硕士生导师。2002年获中国矿业大学工学博士学位,2004年浙江大学博士后出站。主要研究领域包括信息融合与数据挖掘、图像处理与机器视觉等,发表论著50多篇(部),获省部级奖励4项,完成及在研项目20余项。E-mail: wangzhengyou@jxufe.edu.cn

离焦模糊图像的检测与复原,首先利用梯度图像估计离焦半径的初值,然后利用最小二乘图像复原技术和斐波拉契最优搜索方法确定精确的离焦半径。在其后的文献[5]中,作者对此方法进行了继承。由于该方法涉及到迭代运算,故计算量很大。Kundur 对图像模糊与复原的方法(空域与频域,基于模型与盲卷积)进行了梳理^[6]。在这些方法中,最频繁使用的是由 Cannon 提出的频域方法^[7],该方法后来在文献[8,9]中得到改进以便对噪声更具鲁棒性。该方法基于这样的事实:一些特定 PSF(point spread function)的频率响应具有规律的过零点,这就决定了 PSF 的类型和范围。使用频谱或倒(频)谱技术,通过分析过零点的模式^[10,11],虽能识别模糊的类型,但是该方法一般对噪声敏感,且需要较大的图像尺寸(来减少图像频率模式的影响)。而无模型的盲卷积方法(如 ARMA 参数估计法)则往往需要迭代运算,难以做到实时处理。

本文针对一幅图,提出了一种基于离焦模糊模型客观模糊检测的新方法。人们总希望得到一种能够用于实时处理的快捷方法,而且可以如文献[12]所提“不依赖于图像内容”。该客观检测的关键是从模糊边缘的阶跃响应获得 PSF。此外,本文还提出了一种不依赖图像内容的图像模糊一般检测标准。

2 图像离焦模糊模型

如果考虑成像过程为一个线性系统,那么有:

$$g(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} d(x, y, \alpha, \beta) f(\alpha, \beta) d\alpha d\beta \quad (1)$$

如果该系统具有空间不变性,则式(1)可写为

$$g(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} d(x - \alpha, y - \beta) f(\alpha, \beta) d\alpha d\beta \quad (2)$$

在大多数场合,模糊系统被当作一个线性不变空间的成像系统进行建模,并可简写如下^[6]:

$$g(i, j) = d(i, j) * f(i, j) + n(i, j) \quad (3)$$

即模糊图像 $g(i, j)$ 等于原始图像 $f(i, j)$ 和模糊系统的 PSF $d(i, j)$ 的卷积加上噪声 $n(i, j)$ 。通常,认为成像过程具有能量不变性,即

$$\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} d(x, y) dx dy = 1 \quad (4)$$

离焦模糊主要是由于相机光圈的影响而导致一个亮点扩散成一个圆环。在多数情况下,由圆形光圈系统引起的离焦模糊可以用半径为 R 的均匀圆盘来建模^[6]:

$$d(x, y) = \begin{cases} 0 & \sqrt{x^2 + y^2} > R \\ 1/(\pi R^2) & \sqrt{x^2 + y^2} \leq R \end{cases} \quad (5)$$

这是一个简单的几何模型,而没有考虑光线的扩散,半径 R 代表了成像系统的模糊程度。文献[13]表明,一个精确和复杂的物理模型在图像复原性能上并不比这个几何模型具有明显的优势。

PSF 的确定并不容易,因为它是二元函数。有时也用线扩展函数(line spread function, LSF)来表征退化模型。类似于 PSF, LSF 是图像中的一条模糊直线。为简单起见,可以假定 LSF 平行于 X 轴。显然,PSF 和 LSF 的关系能表示如下^[14]:

$$d_1(y) = \int_{-\infty}^{\infty} d(x, y) dx \quad (6)$$

这里 $d_1(y)$ 表示 LSF(d 下角 1 代表 line)。由于沿着边缘方向的密度值相同,因此 LSF 可以仅用 1 维表示。

3 理论分析

3.1 LSF 的提取

用一个单位阶跃函数 $S(y)$ 表示模糊图像, $d_e(y)$ (下角 e 代表 edge) 为平行于 X 轴的单位阶跃边缘,则有:

$$d_e(y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} d(\hat{x}, \hat{y}) S(y - \hat{y}) d\hat{x} d\hat{y} \quad (7)$$

两边对 y 求偏导:

$$\begin{aligned} \frac{\partial d_e(y)}{\partial y} &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} d(\hat{x}, \hat{y}) \frac{\partial S(y - \hat{y})}{\partial y} d\hat{x} d\hat{y} \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} d(\hat{x}, \hat{y}) \delta(y - \hat{y}) d\hat{x} d\hat{y} \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} d(x, y) dx = d_1(y) \end{aligned} \quad (8)$$

这里 $\delta(y - \hat{y})$ 是冲激函数。式(8)表明模糊单位阶跃边缘的导数实际上就是图像中相应的 LSF。

式(5)表明,离焦模糊的 PSF 是圆形对称的,实际上,可以推出,对于单位阶跃边缘也具有等方向性。

3.2 从 LSF 估计 PSF 参数

根据式(6), LSF 是相应 PSF 在直线方向上的积分,因此对于离焦模糊,考虑平行于 y 轴的 LSF,可以由下式表示:

$$\begin{aligned} d_1(x) &= \int_{-\infty}^{\infty} d(x, y) dy = \int_{-\sqrt{R^2 - x^2}}^{\sqrt{R^2 - x^2}} \frac{1}{\pi R^2} dy \\ &= \frac{2}{\pi R^2} \sqrt{R^2 - x^2} \end{aligned} \quad (9)$$

系统越模糊,LSF 的跨度越大。因此,很明显,LSF 分布的跨度可以用来作为模糊的标准。为此,本文提出以 LSF 的方差来描述 LSF 的跨度:

$$\sigma^2 = \int_{-\infty}^{\infty} (x - \bar{x})^2 d_1(x) dx \tag{10}$$

其中 $\bar{x}$ 为均值,定义如下:

$$\bar{x} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} x d_1(x) dx}{\int_{-\infty}^{\infty} d_1(x) dx} \tag{11}$$

把式(9)和式(11)代入式(10),可以得到:

$$\sigma = R/2 \tag{12}$$

这表明半径 R 可以通过计算 LSF 分布的标准差得到,这就是从 LSF 构造 PSF 的关键思想。

3.3 模糊边缘准确位置的确定

笔者已经在 3.1 节证明了可以从边缘得到 LSF,也就是单位阶跃边缘的导数。所以,如果想从边缘中提取信息,首要工作就是找出边缘。可是,如果图像模糊,要找出边缘的准确位置是不容易的。

图 1(a) 显示了单位阶跃边缘在图像(尺寸为 100×200)的中间,图 1(b)为相应的使用了半径为 32pixels 的 PSF 的模糊图像。现在分析如何从模糊图像(图 1(b))中得到边缘信息。

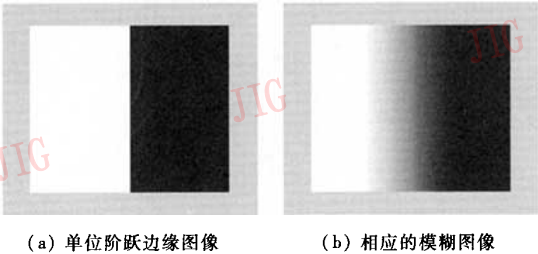


图 1 单位阶跃边缘图及其模糊图像

Fig. 1 Image of unit step edge and its corresponding blur image

在 3.1 节提出了如何从边缘提取 LSF。更一般地,对任意一条边缘(角度为 θ),LSF 是与边缘正交方向的导数,而离焦模糊系统的 LSF 则可由式(9)所得。由式(9)知,当 $x = 0$ (即实际边缘)时, $d_1(x)$ 达到最大值。这告诉我们:梯度最大的地方就是实际的边缘处。因此,要从模糊图像中确定边缘的准确位置,就可以通过与边缘正交方向的最大导数来定位。图 2(a)显示了在图 1(b)中模糊图像的水平梯度,与此对应,式(9)的理论曲线在图 2(b)中表示,它表明当边缘是理想状态且不考虑噪声时,其结果是相同的。

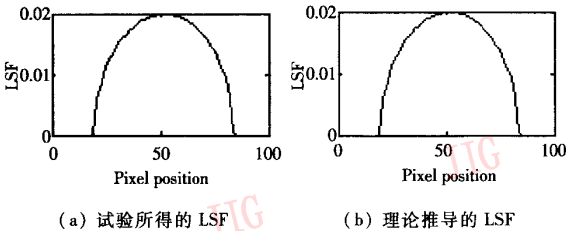


图 2 试验所得的 LSF 与理论推导的 LSF

Fig. 2 LSF obtained from experiment and from theory

4 识别过程

由于提出的方法依赖于图像的阶跃边缘,假定在图像中至少有一条锐利边缘(能够近似于阶跃边缘)可用来估计,因此要找到边缘首先必须找到有用的边缘,然后从边缘中提取 LSF 和 PSF 参数,也就是一旦找到 LSF 就能获得半径 R 。故识别算法分以下 3 步:

- (1) 阶跃边缘的识别和定位;
- (2) LSF 的提取和平均;
- (3) PSF 参数估计。

4.1 阶跃边缘的识别和定位

在实验中,边缘检测采用 Sobel 算子。为了减少噪声的影响,需采用均方根(RMS)估计作为阈值。图 3 显示了一个 800×600 的模糊三角形图像及其边缘提取图。

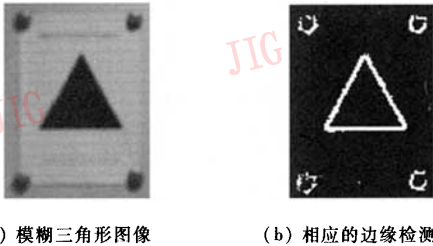


图 3 模糊三角形图像及其边缘检测图

Fig. 3 A blurred triangle image and its corresponding edge-detected image

然而,在模糊图像中进行边缘检测的效果通常不佳,得到的不是一条尖锐的线而是一条宽带,如图 3(b)所示。如果使用形态学操作(如闭合)来进行边缘平滑,并通过寻找宽带的中心点位置来获得轮廓线,那么所得的结果可能不是真实的边缘,而是真实边缘的平行线。不过,这不会影响到边缘检测

的结果,在此阶段,粗略的边缘定位已经足够,准确定位可通过求取峰值梯度来决定。

4.2 LSF 的提取和平均

离散 LSF 是由一系列与边缘垂直方向的特征值所表征的。由于在第 1 步中获得了边缘的位置和方向信息,就很容易提取出一系列与边缘正交的点。然后对此系列点求导数,即可得到 LSF。

为了减少噪声的影响和抑制边缘以外的图像模式,需要从边缘的不同位置得到更多的 LSF,然后进行平均。由于离焦模糊的 PSF 是圆形对称的,因此任何方向的锐利边缘都有用。然而,在图像中出现的阶跃边缘可能不是单位阶跃边缘,需要归一化为单位阶跃边缘。为此,假设 $e(x)$ 为平行于 y 轴的边缘,即

$$e(x) = a d_e(x) \quad (13)$$

这里 a 是边缘的阶跃值。存在下列关系:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{\partial e(x)}{\partial x} dx = a \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\partial d_e(x)}{\partial x} dx = a \int_{-\infty}^{\infty} d_1(x) dx = a \quad (14)$$

这表明对边缘导数进行积分可得到该边缘的阶跃值,所以可以通过除以 a 将边缘进行归一化,得到单位阶跃边缘。需要注意的是,做平均时只有位置相同的点才能相加,这也是必须知道真实边缘位置的原因。

图 4 显示了图 3(a) 中模糊三角形的平均 LSF,提取的 LSF 的长度为 90pixels,该图通过提取三角形 3 条边的 24 个 LSF 来平均。

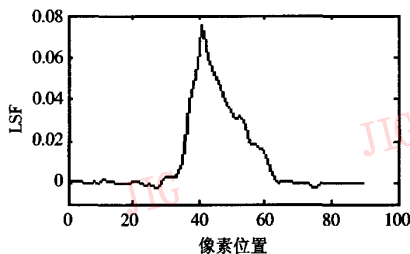


图 4 由图 3(a) 所抽取的平均 LSF

Fig. 4 Averaged LSF from Fig. 3(a)

由图 4 知,峰值出现在 40 像素的位置处,这意味着该点是真实的边缘。

4.3 PSF 参数估计

第 3.2 节已证明:LSF 分布的跨度决定了 PSF 的范围,分布的标准方差是 PSF 的半径 R 的一半。

令离散 LSF 的长度为 N ,则 LSF 分布的均值为

$$\bar{x} = \sum_1^N x d_1(x) / \sum_1^N d_1(x) \quad (15)$$

因而 PSF 的半径为

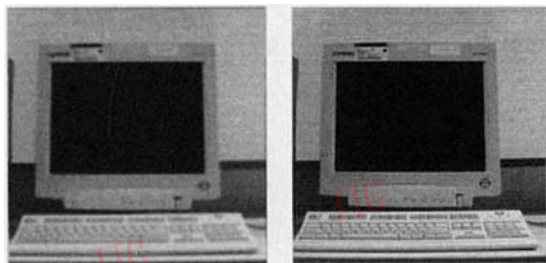
$$R = 2\sigma = 2 \sqrt{\sum_1^N (x - \bar{x})^2 d_1(x)} \quad (16)$$

一旦 R 已知,就可用作其作为模糊程度的检测标准,或由式(4)构造 PSF,进行图像复原。

5 实验结果

为验证该方法,通过合成图像及实际图像来做实验。

图 5(a) 为通过半径为 7 的 PSF 合成的模糊图像(800 × 800)。该图内容简单,利用 Sobel 算子很容易提取边缘信息。



(a) 合成模糊图像

(b) 复原图像

图 5 合成模糊图像及其复原图像

Fig. 5 Synthesized blurred image and its restored image

根据上述方法,得到模糊半径为 7.2。基于式(4)和式(5),并利用 Weiner 复原技术^[14]来得到图 5(a) 的重建图像(图 5(b))。

图 6 所示为常用的一幅图像,该图具有较复杂的内容。为客观评价本方法的有效性,基于检测的模糊半径值及改善信噪比(improved signal noise, ISNR)来评价。改善信噪比定义为

$$ISNR = 10 \lg \frac{\sum_{i,j} [f(i,j) - y(i,j)]^2}{\sum_{i,j} [f(i,j) - \hat{f}(i,j)]^2} \quad (17)$$

考虑到复原时的最小单位为一个像素,所以在复原时,辨识的模糊半径值需要取整处理。其实验结果见表 1。由表 1 可看到,检测的模糊半径值跟理论值很接近,这证明了本方法的有效性。但是,当模糊程度增加时($R > 11$),辨识误差有所增大,而且 ISNR 值急剧下降。这是因为原图的信息损失太多,边缘不尖锐(见图 7),所以造成辨识误差增大。当



图 6 Cameraman(原图)
Fig. 6 Cameraman(Original)

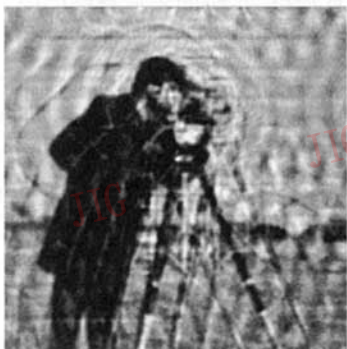


图 8 Weiner 复原的 Cameraman($R = 11$)
Fig. 8 Weiner restored cameraman($R = 11$)



图 7 模糊的 Cameraman($R = 11$)
Fig. 7 Blurred cameraman($R = 11$)

表 1 辨识 PSF 半径及 ISNR 值

理论值 R (pixels)	5	7	9	11
检测值 R (pixels)	5.249	7.344	9.307	12.437
ISNR(dB)	6.745	5.603	5.485	0.0214

模糊程度增大时,由于用 Weiner 复原技术也带来强烈的振铃效应(ringing artifacts)(如图 8 所示),从而使得 ISNR 值急剧下降。

实际上,本文方法的提出主要是针对基于图像的自动系统(如人脸识别系统),以判断人脸的模糊程度,以便为决策提供信息。图 9 给出了 4 幅大小为 160×120 的实拍人脸图像,第 1 幅聚焦最好,最后一幅最模糊。

在本例中,脸和颈部的轮廓边缘被用来识别。表 2 给出了这 4 幅人脸图像的 R 值。由表 2 可见,PSF 的半径值客观地反映了模糊程度。

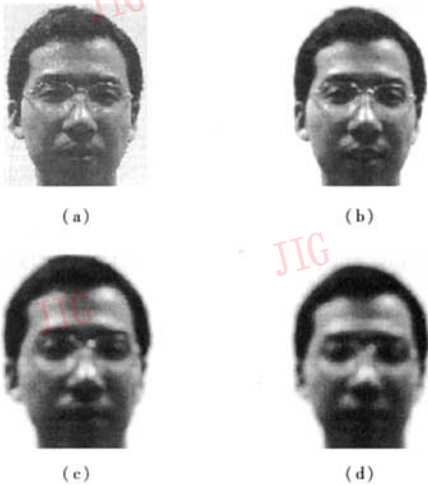


图 9 人脸图像序列
Fig. 9 A sequence of facial images

表 2 辨识 PSF 半径

Image	a	b	c	d
$\bar{R}$ (pixels)	1.1	1.9	3.7	6.2

6 结 论

本文分析了如何从 LSF 得到离焦模糊图像的 PSF。假定一幅图中至少有一条锐利边缘,则可从锐利边缘中提取出 LSF。另外,本文提出了一个适用于所有图像而不依赖于图像内容的离焦模糊图像的一般检测标准。由于该方法作用于空域,无需复杂的傅里叶变换或迭代运算,因此在模糊识别和

PSF 的计算速度方面非常快,能用于离焦模糊识别或图像复原的实时系统。

由于本文所提方法依赖于图像中存在锐利边缘,而由锐利边缘近似阶跃边缘会产生一些错误,因此,如果能够获得关于边缘存在的先验知识,就可对边缘进行建模,而不必通过阶跃边缘近似,且由此得到的 PSF 估计将更可靠。

参考文献 (References)

- 1 Subbarao M, Tyan J K. The optimal focus measure for passive autofocusing and depth-from-focus[J]. *Proceedings of SPIE*, 1995, **2598**: 89 ~ 99.
- 2 Zhu Shi-ping, Fang Jian-cheng, Zhou Rui. New kind of energy-spectrum entropy image focusing evaluation function[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 1999, **25**(6): 720 ~ 723. [祝世平, 房建成, 周锐. 一种新的能量谱-熵图像聚焦评价函数[J]. *北京航空航天大学学报*, 1999, **25**(6): 720 ~ 723.]
- 3 Cao Mao-yong, Sun Nong-liang, Yu Dao-ying. Digital image evaluation function based on gray gradient[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2003, **30**(4): 69 ~ 72. [曹茂永, 孙衣亮, 郁道银. 基于灰度梯度的数字图像评价函数[J]. *光电工程*, 2003, **30**(4): 69 ~ 72.]
- 4 Liu Ke, Yang Jing-yu, Quan Jun, *et al.* Blur identification and resoration of images with out-of-focus blur[J]. *Acta Automation Sinica*, 1994, **20**(1): 58 ~ 65. [刘克, 杨静宇, 权军等. 离焦图像模糊辨识及复原方法研究[J]. *自动化学报*, 1994, **20**(1): 58 ~ 65.]
- 5 He Zhi-biao, Zhang Xin-fang, Zhu Guang-xi. Image enhancement technology for out-of-focus blurred image[J]. *Journal Infrared* Millim. Waves, 2001, **20**(6): 447 ~ 450. [何志彪, 张新访, 朱光喜. 离焦模糊图像增强技术的研究[J]. *红外与毫米波学报*, 2001, **20**(6): 447 ~ 450.]
- 6 Kundur D, Hatzinakos D. Blind image deconvolution[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 1996, **13**(3): 43 ~ 64.
- 7 Cannon G O M. Blind deconvolution of spatially invariant image blurs with phase[J]. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing*, 1976, **24**(1): 58 ~ 63.
- 8 Fabian R, Malah D. Robust identification of motion and out-of focus blur parameters from blur and noisy images[J]. *CVGIP: Graphical Models and Image Processing*, 1991, **53**(5): 403 ~ 412.
- 9 Chang M M, Tekalp A M, Erdem A T. Blur identification using bispectrum[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1991, **39**(10): 2323 ~ 2325.
- 10 Rom R. On the Cepstrum of two-dimensional functions[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1975, **21**(2): 214 ~ 217.
- 11 Zheng Chu-jun, Li Rong, Chang Hong-sheng. Restoration of defocus blurred digital image using wiener filter in frequency domain[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.]
- 12 Marziliano P, Dufaux F, Winkler S, *et al.* A No-Reference Perceptual Blur Metric [A]. In: *Proceedings of International Conference Image Processing[C]*, New York, 24-28 June 2002, **3**: 57 ~ 60.
- 13 Savakis E, Trussell H L. On the accuracy of PSF representation in image restoration [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1993, **2**(2): 252 ~ 259.
- 14 Rosenfeld A, Kak A C. *Digital Picture Processing[M]*. New York: Academic Press, INC, 1982.