

## 基于边缘模糊频谱特征的散焦参数估计方法

梁敏<sup>1,2\*</sup>, 朱虹<sup>1</sup>

(1. 西安理工大学 自动化与信息工程学院, 西安 710048; 2. 山西财经大学 信息管理学院, 太原 030031)

(\* 通信作者电子邮箱 liangmin716@163.com)

**摘要:**退化图像复原的关键在于点扩散函数(PSF)的准确估计,针对散焦模糊图像点扩散函数参数未知的情况,提出一种基于图像边缘模糊频谱特征的参数估计方法。首先分析基本边缘经模糊退化后的频谱特征,进而构建了自然图像的边缘模型作为参考图像,通过在连续的散焦值范围内计算与待测模糊图像频谱的最大相似性,以获取散焦参数估计值。实验结果表明,所提方法能够适用于大尺度模糊图像的散焦参数估计问题,且具有较强的抗噪性能。

**关键词:**散焦模糊;图像边缘;参数估计;抗噪性;频谱相关

**中图分类号:** TP391.41 **文献标志码:** A

### Defocus blur parameter estimation method based on blur spectrum characteristic of image edge

LIANG Min<sup>1,2\*</sup>, ZHU Hong<sup>1</sup>

(1. Faculty of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China;

2. School of Information Management, Shanxi University of Finance and Economics, Taiyuan Shanxi 030031, China)

**Abstract:** The accurate estimation of the Point Spread Function (PSF) is the key point in image restoration. For the unknown PSF parameter of defocus blur, an estimation method was proposed based on blur spectrum characteristic of image edge. Specifically, the blur spectrum feature of basic edge was analyzed, and then the edge model of natural image was treated as reference image. Furthermore, the max spectrum correlation was analyzed to obtain the right parameter between the image to be restored and the blurred reference image with defocus parameter in a continuous range. The experimental results show that the proposed algorithm suits large scale defocus blur images and has strong anti-noise ability.

**Key words:** defocus blur; image edge; parameter estimation; anti-noise ability; spectrum correlation

## 0 引言

在成像系统中,由于照相机或摄像机等成像设备对焦不准而导致的散焦模糊图像,降低了其在刑侦、物证鉴定等领域的应用价值。基于此,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具有重要的现实意义。目前,国内外的许多专家和学者针对散焦模糊图像的复原已经做了大量的研究<sup>[1-5]</sup>。采用先估计点扩散函数(Point Spread Function, PSF),然后选择相应滤波器的复原方法,由于其结构简单、运算高速而被广泛使用。这类方法的有效性取决于PSF参数的准确估计。具体到散焦模糊参数的估计,代表性的方法有:利用模糊图像显著的频谱特征,在频域检测零点的方法<sup>[6-7]</sup>;在限定的参数取值范围内,遍历寻找最优解的方法<sup>[8-10]</sup>;基于倒谱域极小值点与散焦模糊参数关系的估计方法<sup>[11-12]</sup>;二次模糊频域相关性方法<sup>[13]</sup>以及带参考图频谱相关的参数估计法<sup>[14]</sup>。零点检测法和倒谱域方法受噪声的影响较大,最优解法的有效性取决于最优判据的选择,相关系数分析方法可以较少的计算量达到较好的自动识别精度,基于参考图像频谱相关的方法区别于以往由模糊图像自身提取信息估计参数,转化为与参考图像的匹配问题,达到了较高的精度。

本文提出一种基于图像边缘模糊频谱特征的散焦模糊参数估计方法,可以适用于大尺度模糊图像的参数估计问题,且抗噪性能进一步得到提升。

## 1 模糊图像的退化模型

模糊图像的退化模型通常用PSF描述。设 $f(x,y)$ 为原始图像, $h(x,y)$ 是点扩散函数, $n(x,y)$ 表示噪声项, $g(x,y)$ 为退化图像,那么线性移不变系统的退化模型<sup>[10]</sup>可表示如下:

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

其中符号“\*”表示卷积运算。

通常光学系统散焦造成图像退化的PSF是一个均匀分布的圆盘函数,散焦半径为 $R$ 的PSF可以表示如下:

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

$h(x,y)$ 的傅里叶变换为

$$H(u,v) = 2\pi R \frac{J_1(R\sqrt{u^2 + v^2})}{\sqrt{u^2 + v^2}} \quad (3)$$

其中 $J_1(\cdot)$ 表示一阶第一类Bessel函数。Bessel函数以接近 $\pi$ 的间距存在无穷多个零点,因此在散焦模糊图像图1(b)的

收稿日期:2013-09-29;修回日期:2013-10-31。

基金项目:国家国际科技合作专项资助项目(2011DFR10480);山西省自然科学基金资助项目(2013011016-4)。

作者简介:梁敏(1979-),女,山西忻州人,讲师,博士研究生,主要研究方向:图像处理、计算机图形学;朱虹(1963-),女,浙江嘉兴人,教授,博士生导师,博士,主要研究方向:模式识别、数字图像处理。

频谱图(见图1(c))中可以观察到类周期性的圆环。散焦半径  $R$  和第一圆环的半径  $d_r$  满足以下关系:

$$R = 3.83L_0/2\pi d_r \quad (4)$$

其中  $L_0 \times L_0$  为图像做傅里叶变换的尺寸。

当在模糊图像中引入高斯噪声后,频谱图中的类周期性遭到了破坏(见图1(d)),第一圆环轨迹清晰度低,给后续辨参带来了难度。进一步分析式(4),当图像傅里叶变换尺寸  $L_0$  确定时,  $d_r$  与  $R$  成反比,也就是说散焦半径  $R$  越大,第一过零圆环的半径  $d_r$  越小(见图1(f))。直观地来看,第一过零圆环逐渐缩小至中心点,一方面不利于其轨迹的辨识,另一方面,  $d_r$  单像素精度的误差,也会使  $R$  的误差成倍数的增加。因此,大尺度模糊和噪声环境下的参数估计有一定的难度。本文提出了基于边缘模糊频谱特征的方法来估计模糊参数。

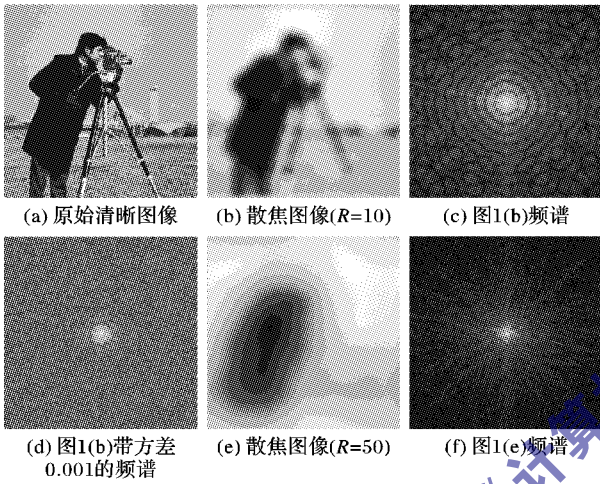


图1 散焦模糊图像及其频谱

## 2 基本边缘的模糊频域特征

简单地,考察  $N \times N$  的方阵图像  $f(x, y)$ , 其二维离散傅里叶变换可定义如下:

$$F(u, v) = \frac{1}{N} \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) e^{-j2\pi(ux/N + vy/N)}; \quad u = 0, 1, \dots, N-1; v = 0, 1, \dots, N-1 \quad (5)$$

考虑到边缘是图像最基本的特征,假定图像  $f(x, y)$  仅含有一条单像素宽的水平直线,强度为1,定义如下:

$$f(x, y) = \begin{cases} 1, & x = a, y = 0, 1, 2, \dots, N-1 \\ 0, & x \neq a \end{cases} \quad (6)$$

其中  $a = 0, 1, 2, \dots, N-1$ 。将式(6)代入式(5),其频谱图的幅度谱计算如下:

$$\begin{aligned} |F(u, v)| &= \left\{ \left[ \sum_{y=0}^{N-1} \cos\left(2\pi\left(\frac{ua}{N} + \frac{vy}{N}\right)\right) \right]^2 + \right. \\ &\quad \left. \left[ \sum_{y=0}^{N-1} \sin\left(2\pi\left(\frac{ua}{N} + \frac{vy}{N}\right)\right) \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} = \\ &= \left\{ \left[ \sum_{y=0}^{N-1} \left( \cos\frac{2\pi ua}{N} \cos\frac{2\pi vy}{N} - \sin\frac{2\pi ua}{N} \sin\frac{2\pi vy}{N} \right) \right]^2 + \right. \\ &\quad \left. \left[ \sum_{y=0}^{N-1} \left( \sin\frac{2\pi ua}{N} \cos\frac{2\pi vy}{N} + \cos\frac{2\pi ua}{N} \sin\frac{2\pi vy}{N} \right) \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} = \\ &= \left\{ \left( \cos\frac{2\pi ua}{N} \right)^2 \left( \sum_{y=0}^{N-1} \cos\frac{2\pi vy}{N} \right)^2 + \right. \\ &\quad \left. \left( \sin\frac{2\pi ua}{N} \right)^2 \left( \sum_{y=0}^{N-1} \sin\frac{2\pi vy}{N} \right)^2 + \right. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\left( \cos\frac{2\pi ua}{N} \right)^2 \left( \sum_{y=0}^{N-1} \sin\frac{2\pi vy}{N} \right)^2 + \\ &\left( \sin\frac{2\pi ua}{N} \right)^2 \left( \sum_{y=0}^{N-1} \cos\frac{2\pi vy}{N} \right)^2 \Big\}^{\frac{1}{2}} = \\ &\left\{ \left( \sum_{y=0}^{N-1} \cos\frac{2\pi vy}{N} \right)^2 + \left( \sum_{y=0}^{N-1} \sin\frac{2\pi vy}{N} \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (7) \end{aligned}$$

幅度谱的值在  $v$  列上,也就是说频谱图中的亮线在垂直的方向。将  $v = 0$  代入式(7)可得:  $|F(u, v)| = N$ , 进一步讨论  $v \neq 0$  的值。

$$\begin{aligned} &\left( \sum_{y=0}^{N-1} \cos\frac{2\pi vy}{N} \right)^2 + \left( \sum_{y=0}^{N-1} \sin\frac{2\pi vy}{N} \right)^2 \approx \\ &\left[ \int_0^N \cos\left(\frac{2\pi vy}{N}\right) dy \right]^2 + \left[ \int_0^N \sin\left(\frac{2\pi vy}{N}\right) dy \right]^2 = \\ &\int_0^N \cos\left(\frac{2\pi vy}{N}\right) dy \int_0^N \cos\left(\frac{2\pi vs}{N}\right) ds + \\ &\int_0^N \sin\left(\frac{2\pi vy}{N}\right) dy \int_0^N \sin\left(\frac{2\pi vs}{N}\right) ds = \\ &\int_0^N \int_0^N \left[ \cos\left(\frac{2\pi vy}{N}\right) \cos\left(\frac{2\pi vs}{N}\right) + \sin\left(\frac{2\pi vy}{N}\right) \sin\left(\frac{2\pi vs}{N}\right) \right] dy ds = \\ &\int_0^N \int_0^N \cos\left(\frac{2\pi v}{N}(s-y)\right) dy ds = \int_0^N \frac{N}{2\pi v} \sin\left(\frac{2\pi v}{N}(N-y)\right) dy + \\ &\int_0^N \frac{N}{2\pi v} \sin\left(\frac{2\pi v}{N}y\right) dy = -\frac{N^2}{(2\pi v)^2} [\cos(2\pi v) - 1] - \\ &\frac{N^2}{(2\pi v)^2} [\cos(2\pi v) - 1] = -\frac{2N^2}{(2\pi v)^2} [\cos(2\pi v) - 1] \quad (8) \end{aligned}$$

那么可以得到结论:当  $v$  是整数时,  $|F(u, v)| = 0$ ;  $v$  不是整数时,取值有无穷多种情况。为了便于分析,常常将频谱图坐标进行移位,使低频集中在频谱图的中心,因此可以在中心位置看到垂直的高幅值亮线。图2(a)显示了一条水平直线段,它可以看作是式(6)定义直线的子集;图2(b)是图2(a)的傅里叶频谱图,实际工程中用公式  $\log(1 + |F(u, v)|)$  来计算。可以看到垂直方向的中心亮线,相应的亮线的幅值是比较小的一个常数的上述对数表达式。在远离中心位置垂直方向上可观察到暗色条纹。图2(c)显示了半径为5的圆盘函数的频谱图,将图2(a)以模糊半径5进行散焦退化,图2(d)为其相应的频谱图。

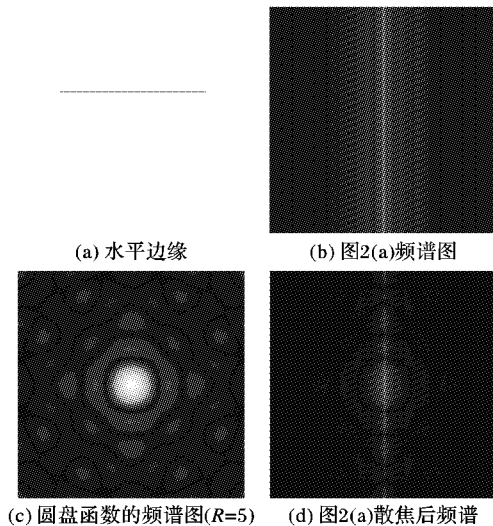
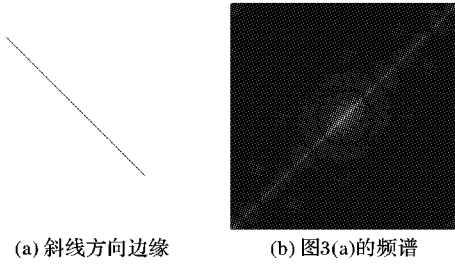


图2 水平边缘及散焦后频谱

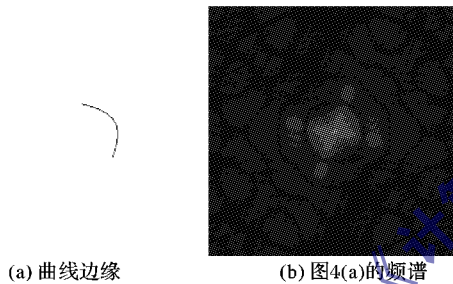
可以观察到,在中心垂直方向高幅值附近,类周期性圆环在亮线附近的区域得以保留,随着 $v$ 远离中心,圆环轮廓逐渐模糊不可见。

鉴于傅里叶变换具有旋转不变性,因此推广到 $x$ - $y$ 平面上任意具有相同幅值的斜线(与水平方向夹角为 $\theta$ )(见图3(a)),经过散焦模糊后,其频谱图中在 $\theta \pm 90^\circ$ 方向附近的类周期性圆环边缘轮廓得以保留(见图3(b))。



(a) 斜线方向边缘 (b) 图3(a)的频谱  
图3 斜线边缘及散焦后频谱

考虑到自然图像中的边缘大多是较为复杂的曲线,而曲线形边缘可以看作是多个方向分段线形边缘的逼近,因此对应的频谱图中类周期性圆环在多个方向上的边缘轮廓清晰。如图4所示。



(a) 曲线边缘 (b) 图4(a)的频谱  
图4 曲线边缘及散焦后频谱

### 3 基于边缘模型的频谱相关法

本文算法的主要原理是应用参数相同的模糊模型去模糊两幅不同的清晰图像时,两幅模糊图像的频谱图是最相似的。这种相似性可以用它们之间的相关系数值来评价。假定 $g(x, y)$ 为待测散焦模糊图像, $tst(x, y)$ 为由参考图像经过在 $[m, n]$ 区间变化的参数 $R$ 的散焦退化后形成的模糊图像, $G$ 和 $T$ 分别为 $g$ 和 $tst$ 的频谱, $\rho$ 是 $G, T$ 的相关系数计算,公式如下:

$$\rho_{GT}(R) = \frac{\sum_u \sum_v (G(u, v) - \bar{G})(T(u, v, R) - \bar{T}(R))}{\sqrt{(\sum_u \sum_v (G(u, v) - \bar{G})^2)(\sum_u \sum_v (T(u, v, R) - \bar{T}(R))^2)}} \quad (9)$$

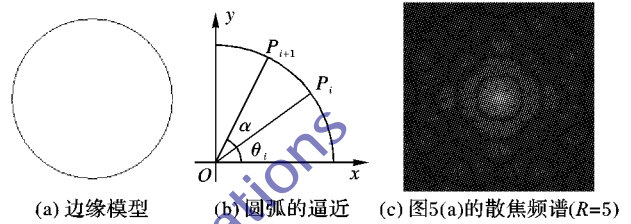
$G(u, v)$ 的均值记为 $\bar{G}$ ;  $T(u, v, R)$ 的均值记为 $\bar{T}(R)$ 。那么当相关系数值最大时,两模糊图像的频谱图最相似,求取 $R^* = \arg \max \rho_{GT}(R)$ 可以得到 $g$ 的模糊参数估计。

结合上述关于边缘模糊频谱特征的分析,当选择与原始清晰图像的边缘信息最接近的参考图像时,可以得到频谱相似性判别的最优模糊参数。然而实际上往往仅有待测的模糊图像,无法获得关于原始清晰图像更多的边缘信息。一般情况下,自然图像所包含的边缘比较复杂,简单地可以选择圆作为其边缘模型<sup>[15]</sup>。这是因为目前最常用的圆的生成算法是

内接正多边形逼近法,该方法的思想是基于以下假设,当一个正多边形的边足够多时,可以和圆无限接近。这里,构造半径为 $r$ 的圆如图5所示,内接正 $n$ 边形的顶点 $P_i(x_i, y_i)$ ,其幅角为 $\theta_i$ ,每一条边对应的圆心角为 $\alpha$ ,且有 $\alpha = 2\pi/n$ ,则下一顶点 $P_{i+1}$ 的坐标有如下递推关系:

$$\begin{cases} x_{i+1} = r \cos(\theta_i + \alpha) \\ y_{i+1} = r \sin(\theta_i + \alpha) \end{cases} \quad (10)$$

顺次连接 $P_i P_{i+1}$ ,当 $n \rightarrow +\infty$ ,线段 $P_i P_{i+1} \approx \widehat{P_i P_{i+1}}$ ,可以得到任意精度的圆弧。因此,圆可以看作是多条不同方向直线段的逼近,以圆为自然图像的边缘建模,可以刻画自然图像边缘的多方向性和复杂性。相应地,对应的频谱图中过零圆环在多个方向上边缘轮廓清晰,便于进行频谱相似性比对。



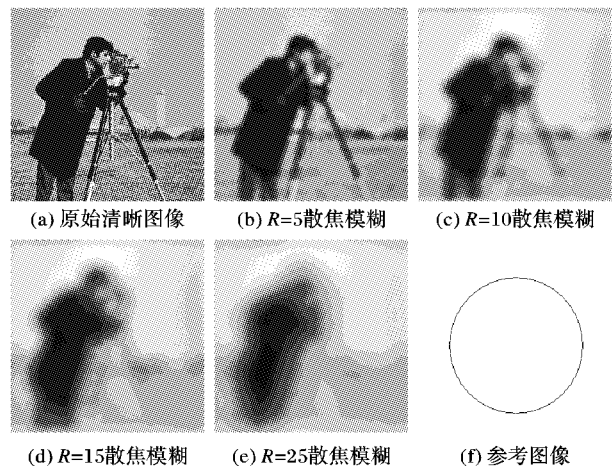
(a) 边缘模型 (b) 圆弧的逼近 (c) 图5(a)的散焦频谱( $R=5$ )  
图5 圆弧的逼近及其散焦频谱

当圆的半径 $r < R^*$ 时,圆的直径两端的边缘经散焦退化后的区域有重叠,不利于进行频谱相似性判别,因此选择 $r > R^*$ 比较合适。鉴于 $R^*$ 未知,实际操作时,可根据图像的尺寸,选取尽可能大的 $r$ 。

### 4 实验分析

下面将上述方法应用到仿真模糊图像、仿真带噪模糊图像的参数估计,来验证其有效性和适应性。采用二次模糊频域相关性算法和文献[14]的估计方法与本文方法结果进行对比实验。

图6(a)是原始清晰图像,图6(b)~(e)为散焦半径 $R = 5, 10, 15, 25$ 的模糊图像,构造与图6(a)相同大小的参考图6(f)。



(a) 原始清晰图像 (b)  $R=5$ 散焦模糊 (c)  $R=10$ 散焦模糊  
(d)  $R=15$ 散焦模糊 (e)  $R=25$ 散焦模糊 (f) 参考图像  
图6 散焦模糊图像及参考图像

针对上述仿真模糊图像,采用二次模糊算法以及本文方法进行参数估计的相关系数曲线如图7所示。图7的坐标横轴为模糊半径,纵轴为相关系数值,双箭头指示了相关系数曲线最大值对应的模糊半径估计值。从图中可以看到,轻度模糊图像经二次模糊算法估计出的模糊半径与实际模糊半径一



致;随着模糊尺度加大,二次模糊算法失效,这是由于二次模糊丢失了两次高频信息,影响了其判参的准确性。而本文方法的高频损失较轻,因此判参的准确率高。

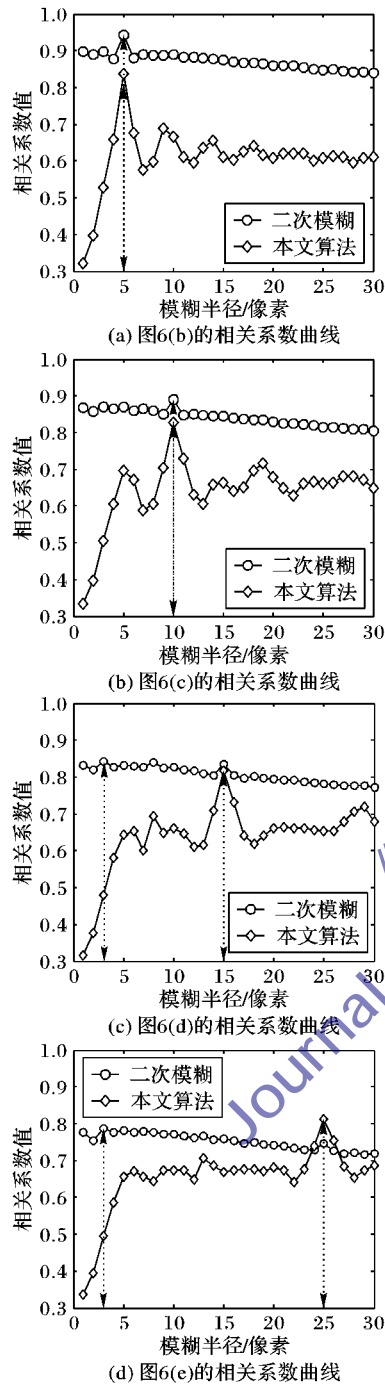


图7 参数估计的相关系数曲线图

进一步增大模糊尺度的实验结果如表1所示。可以看出二次模糊算法适用于模糊程度较轻的图像,当 $R \geq 15$ ,二次模糊算法失效;而本文方法对大尺度模糊图像仍然判参准确。

表2给出了添加方差为0.001的高斯噪声,模糊半径 $R = 5 \sim 90$ 散焦模糊图像的参数估计结果。可以看到,模糊半径不大于40时,文献[14]和本文方法均能准确估计;模糊半径大于40时,出现了不同程度的误判。文献[14]在40~50的模糊半径估计存在1~2个像素的误差,对80以上的估计,最大绝对误差达到7个像素;而本文方法在40~50的模

糊半径估计误差在1个像素以内,超过80以上的估计误差在2个像素以内,比文献[14]的估计准确率高。

表1 仿真散焦模糊半径估计对比实验

| 模糊半径 | 二次模糊算法 | 本文方法 | 模糊半径 | 二次模糊算法 | 本文方法 |
|------|--------|------|------|--------|------|
| 5    | 5      | 5    | 40   | 3      | 40   |
| 10   | 10     | 10   | 60   | 3      | 60   |
| 15   | 3      | 15   | 80   | 3      | 80   |
| 20   | 3      | 20   | 120  | 1      | 120  |
| 25   | 3      | 25   |      |        |      |

表2 噪声方差为0.001的散焦模糊半径估计对比实验

| 模糊半径 | 文献[14]算法 | 本文方法 | 模糊半径 | 文献[14]算法 | 本文方法 |
|------|----------|------|------|----------|------|
| 5    | 5        | 5    | 50   | 51       | 50   |
| 8    | 8        | 8    | 60   | 60       | 60   |
| 10   | 10       | 10   | 70   | 70       | 70   |
| 15   | 15       | 15   | 80   | 85       | 80   |
| 20   | 20       | 20   | 85   | 89       | 87   |
| 25   | 25       | 25   | 90   | 97       | 89   |
| 40   | 42       | 41   |      |          |      |

表3给出了固定模糊半径( $R = 8$ ),加入了均值0、不同方差下的高斯白噪声的散焦模糊图像的半径估计结果。当方差不大于0.001时,两种方法均能判参准确。方差超过0.003,文献[14]出现了不同程度的误判,最大误判像素达到10个像素;而本文方法在方差不超过0.01时,都是稳定的,方差不超过0.06时,误差在1个像素以内。

表3  $R = 8$ 时散焦模糊图像加入均值0、不同方差下的高斯白噪声判参结果

| 方差     | 文献[14]算法 | 本文方法 | 方差   | 文献[14]算法 | 本文方法 |
|--------|----------|------|------|----------|------|
| 0.0004 | 8        | 8    | 0.01 | 9        | 8    |
| 0.0008 | 8        | 8    | 0.04 | 8        | 9    |
| 0.001  | 8        | 8    | 0.06 | 18       | 9    |
| 0.003  | 9        | 8    | 0.08 | 15       | 10   |
| 0.007  | 7        | 8    |      |          |      |

表4给出了大尺度的模糊半径( $R = 80$ ),加入了均值0、不同方差下的高斯白噪声的散焦模糊图像的半径估计结果。本文方法的估计结果明显优于文献[14]的估计结果。

表4  $R = 80$ 时散焦模糊图像加入均值0、不同方差下的高斯白噪声判参结果

| 方差     | 文献[14]算法 | 本文方法 | 方差   | 文献[14]算法 | 本文方法 |
|--------|----------|------|------|----------|------|
| 0.0004 | 80       | 80   | 0.01 | 96       | 87   |
| 0.0008 | 77       | 80   | 0.04 | 98       | 80   |
| 0.001  | 85       | 79   | 0.06 | 57       | 89   |
| 0.003  | 58       | 88   | 0.08 | 60       | 80   |
| 0.007  | 79       | 81   |      |          |      |

## 5 结语

本文在分析基本边缘散焦模糊退化频谱特征的基础上,结合前期带参考图频谱相关性参数估计算法,提出了基于边缘模糊频谱特征的散焦模糊参数估计方法。通过对仿真模糊图像和带噪模糊图像进行参数估计。实验结果表明,该算法能够适

应大尺度模糊的参数估计,且抗噪性能得到进一步提升。

#### 参考文献:

- [1] LEE J, FATHI A S, SONG S. Defocus blur estimation using a cellular neural network [C]// CNNA 2010: Proceedings of the IEEE 12th International Workshop on Cellular Nanoscale Networks and Their Application. Piscataway: IEEE, 2010: 1-4.
- [2] EDMUND Y L. Digital restoration of defocus images in wavelet domain [J]. *Applied Optics*, 2002, 41(23): 4806-4811.
- [3] LI N, LU X. Hybrid model and parameter estimation combining defocus and motion blur [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2011, 32(11): 2523-2529. (李楠, 路小波. 散焦和运动模糊复合模型及参数估计 [J]. *仪器仪表学报*, 2011, 32(11): 2523-2529.)
- [4] ZHAO L, JIN W, CHEN Y, *et al.* Blind restoration for defocus blurred image based on autocorrelation of derivative image [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(9): 1703-1709. (赵琳, 金伟其, 陈翼男, 等. 基于微分图像自相关的离焦模糊图像盲复原 [J]. *光学学报*, 2008, 28(9): 1703-1709.)
- [5] ZHAO L, JIN W, HUANG Y, *et al.* Analysis on super-resolution blind restoration algorithm of defocus blurred image [J]. *Optical Technique*, 2010, 36(1): 75-78. (赵琳, 金伟其, 黄有为, 等. 离焦模糊图像超分辨率盲复原算法分析 [J]. *光学技术*, 2010, 36(1): 75-78.)
- [6] WANG W, FANG W. Blind separation of single-channel permuted defocus blurred image [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2012, 17(1): 62-67. (王伟, 方勇. 单通道散焦模糊置换图像的盲分离 [J]. *中国图象图形学报*, 2012, 17(1): 62-67.)
- [7] ZHENG C, LI R, CHANG H. Restoration of defocus blurred digital image using Wiener filter in frequency domain [J]. *Laser Journal*, 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.)
- [8] LIU K, YANG J, QUAN J, *et al.* Blur identification and restoration of images with out-of-focus blur [J]. *Acta Automatica 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.)
- [9] WU Z, DU S, YAO H. Restoration and identification of defocus blurred image based on in-focus degree [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(4): 772-776. (吴振宇, 杜少军, 姚洪利. 采用聚焦度量的散焦模糊图像参数鉴别及复原 [J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(4): 772-776.)
- [10] ZOU M. Deconvolution and signal recovery [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2001. (邹谋炎. 反卷积和信号复原 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2001.)
- [11] ZHOU Q, YAN G, WANG W. Cepstrum based analysis for blur image combining defocus and motion blur [J]. *Optical Technique*, 2007, 33(6): 910-914, 917. (周曲, 颜国正, 王文兴. 倒谱在混合模糊图像分析中的应用 [J]. *光学技术*, 2007, 33(6): 910-914, 917.)
- [12] ZHOU Q, YAN G, WANG W. Cepstrum analysis based parameter estimation for defocus blur image [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2008, 33(3): 318-321. (周曲, 颜国正, 王文兴. 基于倒谱分析的散焦模糊图像参数识别 [J]. *武汉大学学报: 信息科学版*, 2008, 33(3): 318-321.)
- [13] ZHOU Q, YAN G, WANG W. Application of correlation analysis to parameter recognition for blur image [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, 15(6): 988-995. (周曲, 颜国正, 王文兴. 相关系数分析在模糊图像参数识别中的应用 [J]. *光学精密工程*, 2007, 15(6): 988-995.)
- [14] ZHU H, OUYANG G, LIANG M, *et al.* Blur parameter identification method based on spectrum correlation with reference image [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2012, 33(8): 1837-1843. (朱虹, 欧阳光振, 梁敏, 等. 一种基于参考图像频谱相关的模糊参数判别方法 [J]. *仪器仪表学报*, 2012, 33(8): 1837-1843.)
- [15] TAN Y. Research on natural images' processing theory and method [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2004. (谭郁松. 自然图像处理理论和方法研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2004.)

(上接第 1168 页)

- [9] SAHR K, WHITE D, KIMMERLING A. Geodesic discrete global grid systems [J]. *Cartography and Geographic Information Science*, 2003, 30(2): 121-134.
- [10] GUAN L, CHENG C, LYU X. Study on the organization model for vector data based on global subdivision grid [J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2009, 25(3): 23-27. (关丽, 程承旗, 吕雪峰. 基于球面剖分格网的矢量数据组织模型研究 [J]. *地理与地理信息科学*, 2009, 25(3): 23-27.)
- [11] DUTTON G. A hierarchical coordinate system for geoprocessing and cartography: working through the scales [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1999.
- [12] YUAN W, ZHUANG D, YUAN W, *et al.* Some essential questions in remote sensing science and technology [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2009, 13(1): 103-111. (袁文, 庄大方, 袁武, 等. 基于等角比例投影的球面三角四叉树剖分模型 [J]. *遥感学报*, 2009, 13(1): 103-111.)
- [13] LI D. On generalized and specialized spatial information grid [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2005, 9(5): 513-520. (李德仁. 论广义空间信息网格和狭义空间信息网格 [J]. *遥感学报*, 2005, 9(5): 513-520.)
- [14] GUAN L, LYU X. Properties analysis of geospatial subdivision grid framework for spatial data organization [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2012, 48(1): 123-132. (关丽, 吕雪峰. 面向空间数据组织的地理空间剖分框架性质分析 [J]. *北京大学学报: 自然科学版*, 2012, 48(1): 123-132.)
- [15] DONG F, CHENG C, GUO S. Research on spatial relationships calculation model based on EMD subdivision architecture [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2012, 48(3): 444-450. (董芳, 程承旗, 郭仕德. 基于 EMD 的剖分空间关系计算模型初探 [J]. *北京大学学报: 自然科学版*, 2012, 48(3): 444-450.)
- [16] CHENG C, GUAN L. The global subdivision grid based on extended mapping division and its address coding [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2010, 39(3): 295-302. (程承旗, 关丽. 基于地图分幅拓展的全球剖分模型及其地址编码研究 [J]. *测绘学报*, 2010, 39(3): 295-302.)