

doi: 10.3788/gzxb20124101.0087

# 运动与离焦模糊图像的复原

韩小芳, 胡家升

(大连理工大学 信息与通信工程学院, 辽宁 大连 116024)

**摘 要:**在运动和离焦所引起的图像模糊的情况下, 本文提出了一种新的基于霍夫变换区分离焦模糊和运动模糊两类模糊的方法. 该方法通过比较霍夫变换矩阵中的亮点数来区分两类模糊, 不仅正确率达到 100%, 而且抗干扰性能好; 其次通过对运动模糊图像做两次方向微分, 估计其模糊方向, 提高了模糊方向的估计准确度; 最后利用改进的 Prewitt 算子和费米函数计算模糊图像的刃边函数, 进而得到图像的调制传递函数, 再利用维纳滤波复原图像. 实验结果表明: 本文算法不仅具有有效性和强抗噪音能力, 而且对图像的信噪比要求可以低到 20 dB; 与传统算法相比, 提高了图像的复原质量.

**关键词:**图像复原; 模糊辨识; 刃边函数; 霍夫变换; 调制传递函数

**中图分类号:** TN911.73

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1004-4213(2012)01-0087-7

## 0 引言

图像模糊是图像处理中常见的图像失真现象. 图像复原的目的是抑制或消除图像模糊从而复原图像, 改善图像质量. 到目前为止, 已经出现了多种图像复原方法, 例如直接逆滤波、维纳滤波和约束最小二乘滤波等. 这些方法都要求已知模糊降质模型, 在实际应用中, 往往不能预先知道确切的降质模型, 必须根据模糊图像确定降质模型, 并使模糊图像复原, 这被称为图像盲复原. 在上述提及的图像复原算法中其中有一些算法是在空间域<sup>[1]</sup>中进行的, 但多数复原方法还是在频率域中实现的. 从实际应用角度来看, 空域法<sup>[2]</sup>比较直观. 但是在许多情况下点扩散函数(Point Spread Function, PSF)是奇异矩阵, 这无疑增加了空间复原的难度. 这是大多数采用在频率域中滤波来实现图像复原的主要原因. 无论是空域算法, 还是频域算法, 对图像的退化模型均有很高的依赖性, 而且对图像的信噪比的要求都非常高. 现有的图像盲复原方法大致上可以分为两类: 一是将辨识 PSF 与图像复原的过程分开, 如先验模糊辨识法, 复杂度较低; 二是结合执行模糊辨识过程与图像复原过程, 如非负支撑域递归逆滤波法<sup>[3]</sup>(Nonnegativity And Support Constraints Resursive Inverse Filtering, NAS-RIF), 复杂度较高.

先验模糊辨识方法在复原过程之前对 PSF 的各参量进行估计. 最为常见的模糊类型有两种, 一是像面与探测器接受面不重合引起的离焦模糊, 二是

目标和相机的相对移动所造成的运动模糊. 这两类模糊图像的共同点是纹理不清晰, 图像的边缘变化不明显. 它们的区别是离焦模糊图像的点扩散函数是关于圆心对称的, 而运动模糊图像的点扩散函数是不对称的. 利用两类模糊图像的不同点, 可以判断退化图像是运动模糊还是离焦模糊, 而后采用相应的方法来实现图像复原. 另外, 除了上述提及的两类典型模糊外, 还存在更加复杂的模糊图像, 对于复杂的模糊图像, 通常要采用盲复原的方法, 由于篇幅的限制, 本文只讨论运动模糊图像和离焦模糊图像的复原, 其他的模糊图像复原将在后续文章中予以讨论.

本文提出了一种基于霍夫变换(Hough)来区分两大类模糊图像的新方法, 然后舍弃传统图像复原方法对匀速直线运动模型和离焦模糊的两种模型(即高斯模型和离焦模型)的限定, 利用改进的 Prewitt 算子和费米函数检测模糊图像的刃边函数, 进而估计出线扩散函数和点扩散函数, 然后利用维纳滤波实现图像复原.

## 1 图像复原的原理及复原方法

### 1.1 模糊辨识

模糊图像的产生过程在有噪音的情况下可以模型化为 PSF 和原始清晰图像的卷积加上噪音, 表达式为

$$g(i, j) = h(i, j) \otimes f(i, j) + n(i, j) \quad (1)$$

式(1)中,  $g(i, j)$  为观测图像,  $f(i, j)$  为原始清晰图

第一作者: 韩小芳(1988-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为运动与离焦模糊图像的复原. Email: hanxiaofang0626@163.com

导师(通讯作者): 胡家升(1941-), 男, 教授, 主要研究方向为工程光学、成像科学与图像处理、光学系统设计、信息安全与防伪技术、X射线成像技术等. Email: jshu@dlut.edu.cn

收稿日期: 2011-07-11; 修回日期: 2011-10-18

像,  $h(i, j)$  为成像系统的点扩散函数,  $n(i, j)$  为噪音 (该噪音通常情况下是 高斯白噪音). 由式(1)知道, 要想恢复原始清晰图像, 就必须正确估计点扩散函数  $h(i, j)$ , 这种寻找  $h(i, j)$  的过程被称之为模糊辨识.

通常情况下, 对式(1)做离散 Fourier 变换得到

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

式(2)中,  $H(u, v)$  为光学传递函数<sup>[4]</sup> (Optical Transfer Function, OTF), 它的幅值称为调制传递函数 (Modulation Transfer Function, MTF), 相位称为相位传递函数 (Phase Transfer Function, PTF).

## 1.2 图像复原的方法

图像盲复原的方法可以分为两大类. 本文重点介绍先验模糊辨识的方法, 但是对于那些复杂的模糊图像来说, 常见的方法是 NAS-RIF 法. 该算法稳定、收敛快, 但是由于其滤波器是高通滤波的, 必然存在高频噪音放大问题, 特别是对信噪比较低的模糊图像, 复原效果不好. 下面介绍先验模糊辨识方法中的维纳滤波<sup>[5-6]</sup>复原.

把图像和噪音看做一个随机过程, 维纳滤波就是以退化图像和估计图像之间的最小均方误差来恢复图像, 即:  $e^2 = E(f - \hat{f})^2$ . 假定: 噪音和图像不相关; 噪音或者图像至少有一项是均值为 0; 估计图像的灰度级是退化图像灰度级的线性函数, 则在频域中, 依据上述的假定条件, 可推得复原图像的频谱 ( $\hat{F}(u, v)$ ) 为

$$\hat{F}(u, v) = \frac{H^*(u, v)}{|H(u, v)|^2 + S_n(u, v)/S_o(u, v)} \cdot G(u, v) \quad (3)$$

式(3)中, 符号\*代表复共轭,  $S_n$  和  $S_o$  分别是噪音和图像信号的功率谱. 即滤波器为

$$H_w(u, v) = \frac{H^*(u, v)}{|H(u, v)|^2 + S_n(u, v)/S_o(u, v)} \quad (4)$$

式(4)就是 Wiener 滤波器的转移函数. 可以看出它对噪音有自动抑制作用. 当  $H(u, v)$  在某处为零时, 由于存在  $S_n$  和  $S_o$  项, 因此没有病态问题. 同时分子含有  $H^*(u, v)$  项, 滤波器的增益恒等于零. 如果在某一频谱区的信噪比很高, 有  $H_w(u, v) \rightarrow 1/H(u, v)$ , 在  $S_n=0$  的无噪音情况下 Wiener 滤波器变成了逆滤波器. 反过来, 在信噪比非常小的区域, 有  $H_w(u, v) \rightarrow 0$ . 这表明 Wiener 滤波器避免了对噪音的过多放大. 大多数情况下,  $S_n$  和  $S_o$  是未知的. 为了便于计算, 可根据处理对象的不同将  $S_n(u, v)/S_o(u, v)$  设为某个经验值  $\epsilon$ , 即

$$H_w(u, v) = \frac{H^*(u, v)}{|H(u, v)|^2 + \epsilon} \quad (5)$$

式中  $\epsilon$  是噪音对信号的功率密度比, 近似为常量. 在实际应用中,  $\epsilon$  的值很难确定, 一般要尝试多次才能找到合适的值. 通过试验本文得到一个有用的参考:  $\epsilon$  的取值一般在模糊图像信噪比的倒数附近.

## 2 模糊类型的识别及模糊图像复原

### 2.1 区分离焦模糊和运动模糊两种模糊的方法

传统的模糊类型的辨识方法是通过对图像进行傅里叶变换, 然后直接用人眼观察图像频域的频谱特征. 这个方法既不方便又不精确, 而且易受噪音的影响. 下面详细介绍提出的一种新的区分两类模糊图像的方法, 这个方法可以由数值进行直接判断, 抗噪性能好. 它的基础是基于 Hough 变换, 其思想来源是把图像的频谱信息也看成是一幅图像.

这种算法的设计步骤如下:

1) 对模糊图像  $g(x, y)$  做傅里叶变换得到  $G(u, v)$ , 再对  $G(u, v)$  取其模值, 而后取对数, 记为  $\log(|G(u, v)|)$ . 取对数的原因有两个: 一是将图像降质过程由原始图像与 PSF 的卷积变为两个对数相加, 二是很大程度上压缩傅里叶频谱的动态范围.

2) 把对数频谱  $\log(|G(u, v)|)$  看成图像, 利用 canny 算子对其进行边缘检测, 得到对数谱的二值图像, 记为 BW.

3) 对 BW 进行霍夫变换, 得到霍夫变换矩阵  $H$ , 求  $H$  中的最大值的点, 其值记为 MAX, 称之为强累计点.

4) 设置一个门限为  $\text{thresh} = 0.6 \times \text{MAX}$  (0.6 设置的依据是在霍夫变换矩阵中, 当其值大于 0.6 倍的强累计点时, 就可以看成该点处近似出现一条直线, 而且数值 0.6 也经过大量的实验证实, 效果最好), 对霍夫变换矩阵进行元素的逐个访问, 记录矩阵中值大于  $\text{thresh}$  的个数, 记为 count. 该门限设置的依据是在霍夫变换矩阵中, 数值很大的数的个数相对较少.

5) 对得到的 count, 设置一个相应的门限  $\text{threshcount}$ , 如果 count 大于  $\text{threshcount}$ , 本文为 20, 则判断相应的图像的模糊类型是离焦模糊, 否则为运动模糊图像. 在本算法中门限设置为 20 的根据是运动模糊和离焦模糊点数差了两个数量级.

由图 1 可以看出, 相对于运动模糊图像来说, 离焦模糊图像的 Hough 矩阵中, 按照上述的算法, 得到的亮点数明显很多, 其中图 1(c) 为 225 个, 图 1(d) 为 2 个, 它们的点数差了三个数量级, 所以很容易区分.

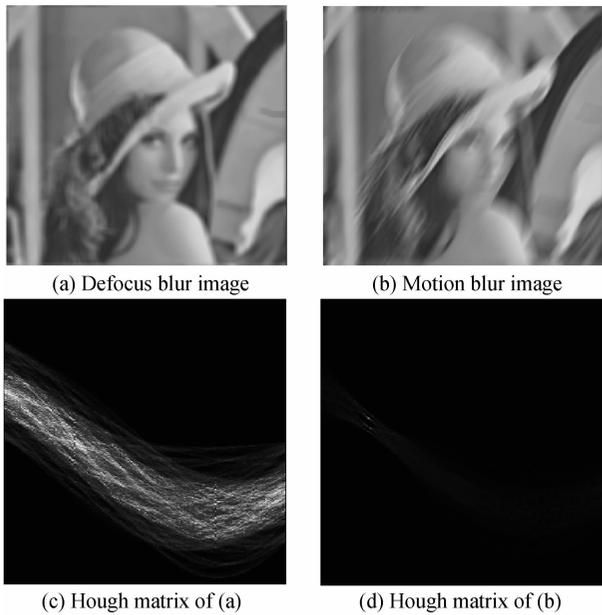


图1 模糊图像及其对应的 Hough 矩阵  
Fig. 1 Blur image and Hough matrix

为了验证算法的正确性,本文对大量的模糊图像进行判别,实验结果表明算法的正确率高达 100%。

## 2.2 运动模糊图像的 PSF 估计

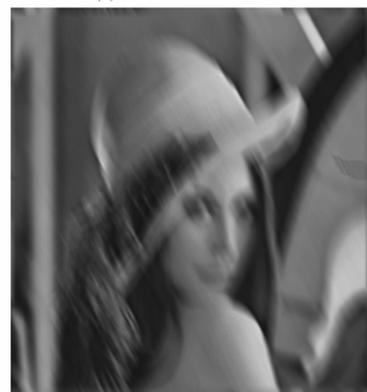
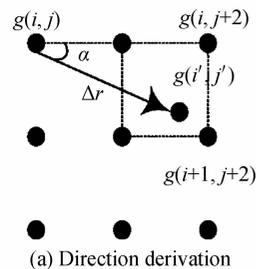
### 2.2.1 运动模糊方向的估计

图像统计表明,通常可以将原始图像看成是各向同性的一阶马尔科夫过程.运动模糊只是降低了运动方向上的高频分量,而对于非运动方向上的高频成分影响很小,如果对模糊图像进行方向性的微分,微分可以近似看成高通滤波,则当运动方向和滤波方向相同时,由于此方向的模糊图像对应的高频成分最少,而且高通滤波使模糊图像的能量损失最大,所以得到的微分图像灰度值的绝对值之和必然最小,对应的方向就是模糊图像的运动方向。

如图 2(a)所示, $g(i', j')$ 由双线性插值得到,其中  $i' = i + \Delta r \cdot \sin \alpha$ ,  $j' = j + \Delta r \cdot \cos \alpha$ ,微元为  $\Delta r$ ,方向为  $\alpha \in [-\pi/2, \pi/2)$ ,微分图像的灰度值为  $\Delta g(i, j)_\alpha = g(i', j') - g(i, j)$ ,方向微分的绝对值之和为  $I(\Delta g)_\alpha = \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{M-1} |\Delta g(i, j)_\alpha|$ 。

本文所采取的估计运动模糊方向的方法是:首先对原始的运动模糊图像进行水平方向的微分,得到差分图像,也可以说成求取运动模糊图像的梯度图像;然后利用文献[7]中采用的基于方向微分和加权平均法计算整幅差分图像鉴别运动模糊方向,可以称改进的方法为两次微分法.这样做的好处是:图像的微分运算相对增加高频成分,抑制低频成分,去除相邻像素之间的相关性.这样一来,运动方向的高频成分相比于其他方向衰减的更加厉害,使运动模糊方向的估计准确度有了进一步的提高.如图 2(b)

所示,由计算机产生的运动模糊图像,它的模糊角度是  $-60^\circ$ ,采用改进之前的算法估计的模糊角度是  $-57.6^\circ$ ,采用本文的算法估计的模糊角度是  $-60.3^\circ$ ,显然,本文的算法提高了运动模糊方向的估计准确度。



(b) Motion blur image

图2 示意图

Fig. 2 Schematic diagram

### 2.2.2 估计运动模糊图像的 MTF

在得到运动模糊图像的运动方向之后,旋转图像,使其模糊方向和水平轴或者是垂直轴重合,这样就把二维图像的复原问题转化为一维问题,简化了处理过程,接着求取刃边函数(Edge Spread Function, ESF)。

求取 MTF 的步骤如下:

- 1)检测直线边缘,截取该边缘对应的部分图像.
- 2)利用改进的 Prewitt 的水平 and 垂直算子分别对图像进行二维卷积操作,得到图像的水平方向导数和垂直方向的导数,然后求取各个像素处的梯度的模.
- 3)梯度最大值对应的点就是 ESF 的中心像素,相应的就是梯度的方向角,也就是边缘和水平方向的夹角,沿着这个方向就可以得到 ESF 上各像素的对应位置,而对于水平运动的图像,只要在相应的像素行,向右取像素值,一直到不再增大为止,向左取,一直到不再减小为止,或者是向右取像素值,一直到不再减小为止,向左取,一直到不再增大为止.至此,得到一条 ESF.

4)为了得到比较连续和平滑的 ESF,对 ESF 进行样条插值,然后再利用费米函数对其进行拟合,得

到平滑的 ESF, 费米函数的形式为

$$\text{ESF}(x) = D + \sum_{i=1}^5 \frac{a_i}{\exp[(x-b_i)/c_i] + 1} \quad (6)$$

式中,  $x$  为像素的位置,  $a_i, b_i, c_i$  为函数的系数, 系数的值用模拟退火算法来确定.

模拟退火算法的步骤如下:

1) 给定模型也就是式(6)内每一个参量的变化范围, 在这个范围内随机选择一个初始模型  $n_0$ , 并计算相应的目标函数值  $E(n_0)$ .

2) 对当前模型扰动产生一新模型  $n$ , 计算相应的目标函数值  $E(n)$ , 得到  $\Delta E = E(n) - E(n_0)$ .

3) 若  $\Delta E < 0$ , 则新模型被接受; 否则新模型按概率  $P = \exp(-\Delta E/T)$  接受,  $T$  为温度. 当模型被接受时,  $n_0 = n, E(n_0) = E(n)$ .

4) 在温度  $T$  下, 重复步骤 2) 和 3).

5) 缓慢降低温度  $T$ .

6) 重复步骤 2) 和 5), 直到满足收敛条件.

本文中的目标函数为  $f = \sum_{i=1}^n (\text{ESF}_i - \text{ESF}_i')^2$ , 显然这个函数值越小越好, 其中  $\text{ESF}_i$  是在像素点位置  $x_i$  的测量值,  $\text{ESF}_i'$  则是在点  $x_i$  的拟合值.

状态函数:  $xx_{j+1} = xx_j + \text{step} * (\text{rand} - 0.5)$ , 式中  $xx_{j+1}$  和  $xx_j$  分别为新旧状态参量;  $\text{step}$  为扰动系数,  $\text{rand}$  产生 0 和 1 之间的随机数.

温度更新函数:  $T_{k+1} = 0.95 * T_k$ .

7) 为了提高 ESF 的检测准确度, 重复上述步骤, 多检测几个图像区域的边缘, 然后就可以取相应位置的灰度均值, 得到  $\text{ESF}_{\text{avg}}$ , 对其进行微分得到线扩散函数 (Line Spread Function, LSF), 傅里叶变换之后得到 MTF;

8)  $\text{MTF} = \text{MTF}^r$ , 其中  $0 \leq r \leq 2$ , MTF 的反傅里叶变换为 PSF. 实验结果表明,  $r$  的值取 1 附近, 图像的复原结果较好. 这里涉及频率对齐的问题, 就是 MTF 的 Nyquist 频率和图像的最高频率相对应.

在求取 ESF 的过程中, 用的是改进的 Prewitt 算子, 原因是: 原始的 Prewitt 算子欠缺合理性, 没有考虑高频成分的噪音, 只是去除低频噪音, 会造成刃边曲线中心像素的误判; 实际成像与理想退化模型可能存在的差异性, 为了算法的鲁棒性, 采用改进的 Prewitt 算子, 该算子抗干扰能力强. 模板如下所示

$$\mathbf{P}_x = \begin{bmatrix} -1 & \cdots & -\frac{2}{n-1} & 0 & \frac{2}{n-1} & \cdots & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -1 & \cdots & -\frac{2}{n-1} & 0 & \frac{2}{n-1} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\mathbf{P}_y = \begin{bmatrix} 1 & \cdots & 1 \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ \frac{2}{n-1} & \cdots & \frac{2}{n-1} \\ 0 & \cdots & 0 \\ -\frac{2}{n-1} & \cdots & -\frac{2}{n-1} \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ -1 & \cdots & -1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

式(7)和式(8)中,  $n$  为奇数, 并且  $n \geq 7$ , 其中  $\mathbf{P}_x$  借鉴文献[10].

为了遏制噪音对图像复原结果的影响, 对刃边曲线的平滑和拟合是非常重要的, 而费米函数的曲线特征非常类似于刃边曲线的分布, 利用费米函数可以利用刃边及两端的像元值.

### 2.3 离焦模糊图像的 PSF 的辨识

处理离焦模糊图像采用的刃边函数法和处理运动模糊图像大体上是相似的, 不同的地方就是得到的 MTF 是某一方向的 MTF, 该方向 MTF 的逆傅里叶变换是 PSF 在对应方向上的积分, 是一维的, 也就是 LSF. 鉴于离焦模糊的 PSF 的圆对称性, 很容易得到二维 PSF.

### 2.4 利用维纳滤波方法复原图像

在实际的模糊图像中, 退化图像并不是完整的循环卷积, 这导致图像复原中, 边界点没有足够的周围像素可以使用, 复原的图像中会出现振铃效应和影像反色现象, 也就是常说的鬼影效应, 这在运动模糊图像中尤其严重. 为了削弱这两个效应对图像质量的影响, 我们采取以下方法: 对模糊图像按照反射对称方式延拓, 由原来图像尺寸大小  $M \times N$  改变为  $2M \times 2N$ , 然后利用文献[11]中提出的改进的维纳滤波的方法复原图像.

## 3 实验结果与分析

### 3.1 评价指标

为了对实验结果进行客观评价, 引入图像的灰度均值、标准差、信息熵、图像的清晰度和图像的边缘能量衡量图像的质量.

1) 图像的方差

$$\sigma^2 = \frac{1}{m * n} \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} (f(i, j) - \mu)^2 \quad (9)$$

$$\mu = \frac{1}{m * n} \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} f(i, j) \quad (10)$$

式中,  $m, n$  为图像的高度与宽度,  $f(i, j)$  为图像的灰度值,  $\mu$  为图像的灰度均值. 图像的方差越大, 则表明图像能够提供较多的细节信息, 图像的对比度越大.  $\sigma$  则为图像的标准差.

2) 图像的边缘能量:分别用边缘算子  $E_1$ 、 $E_2$  对图像进行卷积运算,相加得到边缘图像  $e(x, y)$ ,即

$$E_1 = \begin{bmatrix} \frac{1}{6} & -\frac{1}{6} & -\frac{1}{6} \\ -\frac{1}{6} & \frac{4}{6} & -\frac{1}{6} \\ -\frac{1}{6} & -\frac{1}{6} & \frac{1}{6} \end{bmatrix} \quad E_2 = \begin{bmatrix} -\frac{1}{6} & -\frac{1}{6} & \frac{1}{6} \\ -\frac{1}{6} & \frac{4}{6} & -\frac{1}{6} \\ \frac{1}{6} & -\frac{1}{6} & -\frac{1}{6} \end{bmatrix}$$

$$e(x, y) = E_1(f(x, y)) + E_2(f(x, y)) \quad (11)$$

$$\sigma_e^2 = \frac{1}{m \times n} \sum_{x=0}^{m-1} \sum_{y=0}^{n-1} e^2(x, y) \quad (12)$$

$\sigma_e^2$  被称之为边缘  $e(x, y)$  的平均能量,该参量的意义在于它突出了图像灰度值变化大的区域,如果图像灰度变化大,纹理多且复杂,则该参量的值较大。

表 1 分别用原始的算法和本文算法估计运动模糊图像的运动方向,并比较结果(采用双线性插值)

Table 1 Comparison of our results of estimating motion direction with others

True value	-90	-80	-70	-60	-50	-40	-30	30	40	50	60	70	80
Before improved	-88.1	-78.5	-67	-61.5	-48	-41	-27	28	41	47.5	58.5	68	78.5
Absolute error	1.9	1.5	3	1.5	2	1	3	2	1	2.5	1.5	2	1.5
After improved	-89.7	-81.2	71.1	-60.6	-51.5	-41.5	-31.5	30.9	41.1	50.7	59.7	69.9	80.7
Absolute error	0.3	1.2	1.1	0.6	1.5	1.5	1.5	0.9	1.1	0.7	0.3	0.1	0.7

通过分析表 1 中的数据,发现本文的改进的算法的绝对误差明显减小。计算改进之前的均方误差为  $\sigma_B = 3.9123$ ,改进之后的均方误差为  $\sigma_A = 0.7654$ ,同样也可以看出,改进之后的均方误差明显减少。这说明了本文的改进的二次微分算法使模糊方向的估计准确度明显提高。

### 3.2.2 实际的运动模糊图像复原

为了说明本文算法的有效性,对《程序员面试宝典》第二版这本书<sup>[12]</sup>的封面实际拍摄一幅水平运动的模糊图像,截取其一部分进行复原,并和传统的匀速直线运动模型进行比较。已知方向是水平的,如果有运动方向的,用本文所述方法求取其运动方向,然后旋转到水平轴,之后求 MTF,如图 3 所示。



(a) Motion blur image

3) 图像的清晰度,也可称为图像的活跃度  $\alpha$ ,用 canny 算子对图像做边缘检测,得到 BW

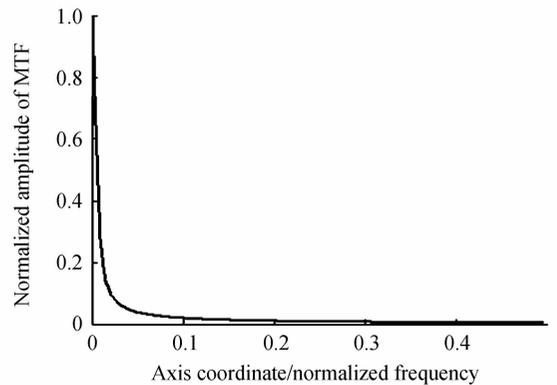
$$\alpha = \sum_i \sum_j BW(i, j) \quad (13)$$

$\alpha$  越大,图像的边缘信息越多。

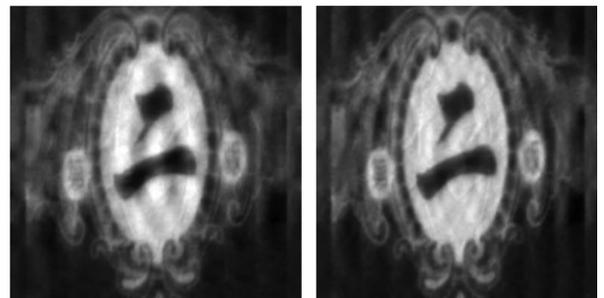
## 3.2 运动模糊图像方向估计和及其复原结果

### 3.2.1 运动模糊图像的运动方向的估计

为了验证本文的二次微分算法比改进前的方向微分算法的估计准确度高,在计算机上对同一幅图像(比如常见的图像)加上在同一模糊尺度下,不同模糊方向上的运动模糊,分别采用本文的算法和原始的算法估计其运动模糊方向,记录数据如表 1 所示,单位为度( $^\circ$ )。



(b) MTF obtained from (a)



(c) Using the traditional method (d) Using the proposed method

图 3 运动模糊图像复原

Fig. 3 Recovered results of motion blur image comparison between the proposed method and the traditional one

### 3.3 实际的离焦模糊图像复原

为了验证本文算法的有效性,对实际的离焦模糊图像进行复原,并和传统的离焦高斯模型复原方法相比较,实验结果如图 4 所示。

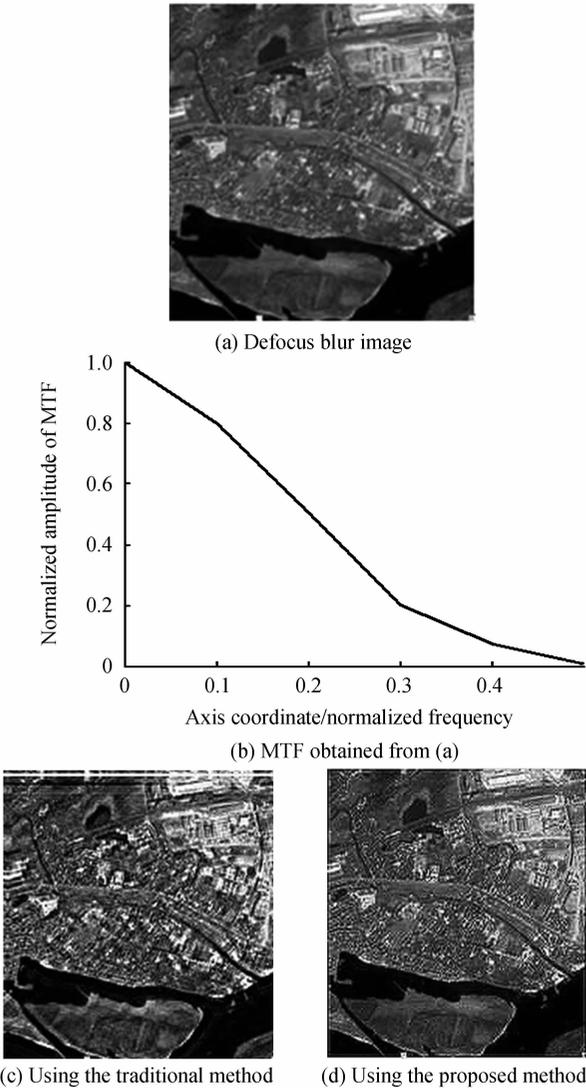


图4 高焦模糊图像复原

Fig. 4 Recovered results comparison of defocus blur image between the proposed method and the traditional one

利用之前引进的一些参量,定量分析本文算法的有效性,计算的数据如表2.

表2 定量分析算法的有效性  
Table 2 Analysis of the method's validity

	Average	Standard deviation	Entropy of information	Definition	Edge energy
Fig. 3(a)	101.83	53.699	7.270 6	4 704	1,058 2
Fig. 3(c)	100.9	56.879	7.523 6	5 342	2,539 2
Fig. 3(d)	101.93	62.242	7.734 1	7 835	25,741
Fig. 4(a)	98.777	54.93	7.288	4 320	51,358
Fig. 4(c)	98.692	68.447	7.347 3	5 264	98,325
Fig. 4(d)	97.523	69.808	7.396 5	5 587	102,237

由图3和图4的复原结果和表2的数据对比知道,图像的灰度均值变化很小,标准差、信息熵、清晰度、边缘能量变化很大.和传统的图像复原算法相比,本文算法的图像复原质量较好,各参量的值也较大.

## 4 结论

本文提出了一种新的基于 Hough 变换区分运动模糊图像和离焦模糊图像两类模糊图像的方法,该方法不仅简单、方便,而且正确率很高,达到了100%,有着很好的实用价值.本文还设计了一种基于改进的 Prewitt 算子和费米函数拟合 ESF 的方法,进而得到模糊图像的 MTF,利用维纳滤波复原图像,得到了令人满意的结果.由于采用的是改进的 Prewitt 算子和费米函数对 ESF 进行拟合,抗噪性能比原始的 Prewitt 算子要好.总得来说,本文算法应用范围较大,不再把模糊限定为某一种模型,对图像的信噪比要求很低,算法的适应性很强.

由于篇幅的限制,本文只讨论了单一的运动和离焦模糊图像,在接下来将致力于研究更加复杂的模糊图像,比如离焦模糊和运动模糊的混合等,尽可能把基于光学的图像复原方法的应用范围扩大.

### 参考文献

- [1] DING Hai-yong, BIAN Zheng-fu. Remote sensing image restoration based on TV regularization and local constraints [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(6): 1577-1580.  
丁海勇, 卞正富. 基于 TV 正则化和局部约束的遥感图像恢复 [J]. *光子学报*, 2009, **38**(6): 1577-1580.
- [2] ZHANG Ju, HE Xiao-hai, TAO Qing-chuan, et al. Restoration of 3-Dimensional microscopical images based on markov random field with adaptive regularization parameter [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(6): 1272-1276.  
张菊, 何小海, 陶青川, 等. 基于 Markov 随机场的自适应正则化三维显微图像复原 [J]. *光子学报*, 2008, **37**(6): 1272-1276.
- [3] GUO Yong-cai, GAO Chao, WANG E-nuo. Blind image restoration algorithm based on wavelet transform and NAS-RIF algorithm [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(11): 3000-3003.  
郭永彩, 高潮, 王婀娜. 基于小波变换和非负支撑域递归滤波算法的盲目图像复原 [J]. *光学学报*, 2009, **29**(11): 3000-3003.
- [4] WANG Hai-tao, CAI Jia-hui, WEI Peng, et al. Image analysis of optical synthetic aperture system with the immediate/para-immediate u-v coverage [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(2): 260-265.  
王海涛, 蔡佳慧, 魏鹏, 等. 即时/准即时 u-v 覆盖的光学综合孔径成像分析 [J]. *光子学报*, 2010, **39**(2): 260-265.
- [5] TANG Xiu-wen, TANG Zhi-lie, WU Yong-bo. Resolution improvement of photoacoustic imaging system based on acoustic lens with winere filter [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(1): 103-106.  
唐秀文, 唐志列, 吴泳波. 利用维纳滤波改善声透镜光学成像系统的分辨率 [J]. *光子学报*, 2011, **40**(1): 103-106.
- [6] LI Bo, LI Yan, LI Xin. Research on the image restoration for sparse aperture optical systems [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(2): 275-278.  
李波, 李艳, 李昕. 稀疏孔径光学系统成像的图像恢复算法的研究 [J]. *光子学报*, 2010, **39**(2): 275-278.

- [7] CHEN Qian-rong, LU Qi-sheng, CHENG Li-zhi. Identification of motion blur direction from motion blurred image by direction derivation method[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2005, **10**(5): 590-595.  
陈前荣, 陆启生, 成礼智. 基于方向微分的运动模糊方向鉴别[J]. *中国图像图形学报*, 2005, **10**(5): 590-595.
- [8] NUNES F L S, SCHIABEL H, BENATTI R H. Contrast enhancement in dense breast images using the modulation transfer function[J]. *Medical Physics*, 2002, **29**(12): 2925-2936.
- [9] SEGAL R, SHCHERBACK I, YADID-PECHT O. Cmos image sensors: two-dimensional mtf for anisotropic resolution characterization[J]. *Sensors Journal*, 2007, **7**(6): 947-952.
- [10] XU Yuan-nan, ZHAO Yuan, LIU Li-ping, *et al.* Velocity Measurement based on partial motion blur image[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2009, **36**(10): 71-75.  
许元男, 赵远, 刘丽萍, 等. 基于局部运动模糊图像的测速方法[J]. *光电工程*, 2009, **36**(10): 71-75.
- [11] LIU Xiao-hui, GUO Cheng-an, HU Jia-sheng. A modified wiener filtering for restoration of ring-coded aperture images in inertial confinement fusion[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(8): 1045-1050.  
刘晓辉, 郭成安, 胡家升. 惯性约束聚变中环孔编码图像恢复的改进维纳滤波方法[J]. *光学学报*, 2004, **24**(8): 1045-1050.
- [12] 欧力奇, 刘洋, 段韬. 程序员面试宝典[M]. 2 版. 北京: 电子工业出版社, 2008.

## Restoration of Motion Blur Image and Defocus Blur Image

HAN Xiao-fang, HU Jia-sheng

(School of Information and Communication Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China)

**Abstract:** Due to the image blur caused by defocus and motion, a new method is presented to distinguish defocus blur and motion blur images robustly and accurately. Based on Hough transform and compared the number of highlights in the Hough matrix, this method has high accuracy, up to 100%. An improved approach for motion blur direction from motion blur image via two directional derivations is proposed which improves the precision estimation. And, an improved method is presented to calculate the edge spread function using improved Prewitt operator and Fermi function, then obtain the MTF and then restore image using Wiener filter. Some experiments are performed to validate the performance of the proposed method. Experimental results show that this method has effectiveness and strong resistance to the noise, and can work on noisy images with low SNR; when SNR is 20 dB, it can work robustly. And compared with the traditional image restoration method and model, the image restoration results are improved significantly using the proposed method.

**Key words:** Image restoration; Blur identification; Edge function; Hough transform; Modulation Transfer Function(MTF)