

# 任意方向运动模糊的消除

王晓红 赵荣椿

(西北工业大学计算机科学与工程系, 西安 710072)

**摘要** 对运动模糊图象的恢复而言, 虽然维纳滤波法可解决反滤波法中  $H(u, v)$  零点的噪声放大问题, 但无法消除由于模糊图象信息的不完整性而造成的边缘误差, 该文所述的带最优窗的维纳滤波方法却可有效地去除噪声和减小边缘误差, 除了边缘的 L-形条带外, 可得到近乎完美的恢复效果. 通过对女孩和大狒狒头模糊图象的恢复试验证明, 该方法效果较好. 由于点扩展函数的设置是影响恢复结果好坏的关键问题, 因此文中还证明了对任意方向的直线运动模糊图象的恢复只能利用直接设置二维点扩展函数来进行二维恢复, 不可先进行  $x$  方向的一维恢复, 再进行  $y$  方向的一维恢复. 此外, 还给出了估计二维点扩展函数的一般步骤.

**关键词** 维纳滤波 反滤波 边缘误差 点扩展函数

中图分类号: TP751.1 文献标识码: B 文章编号: 1006-8961(2000)06-0525-05

## Restoration of Arbitrary Direction Motion-Blurred Images

WANG Xiao-hong, ZHAO Rong-chun

(Department of Computer Science and Engineering Northwest Polytechnical University, Xi'an 710072)

**Abstract** The paper discusses the restoration method for motion-blurred images. The large errors observed in inverse filter or Wiener filter restorations of images are mainly due to the fact that a truncated region of image data is available for processing. Wiener filter is less sensitive to noise than inverse filter for the restorations of motion-blurred images. However, there is a large error component, called the edge error, that arises due to the fact that real images seldom have the periodicity assumed by discrete Fourier transform operation. Optimal windows for image restoration are designed on the basis of mathematical expressions for the restoration errors. With these optimal windows, near-perfect restorations can be obtained except the narrow L-shape border at the right and bottom edges of the image, which we have to sacrifice for reduction of restoration errors over the rest of the image. The images that vary gradually in intensity near their borders have the best results, as demonstrated in actual restorations of test images. The paper also proves that we can only directly setup two dimensional point spread function, instead of first restoring in  $x$  direction and then in  $y$  direction. A procedure for estimating point spread functions of real-world motion-blurred images is provided in this paper.

**Keywords** Wiener filter, Inverse filter, Edge error, Point spread function(PSF)

## 0 引言

由于相机镜头和对象之间在曝光瞬间的相对运动, 便会造成拍摄图象模糊, 这种模糊称为运动模糊. 运动模糊在实践中经常会遇到, 如在飞机或宇宙飞行器上拍下来的照片及用照相机拍摄快速运动物体的照片上均可能存在.

对于线性移不变运动模糊, 模糊图象  $g(x, y)$  为

原图象  $f(x, y)$  和点扩展函数  $h(x, y)$  的卷积

$$g(x, y) = \iint_{-\infty}^{\infty} f(\xi, \eta) h(x - \xi, y - \eta) d\xi d\eta + n(x, y) \quad (1)$$

其中  $n(x, y)$  代表加性噪声. 对式(1)两边取傅氏变换, 有

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

其中  $G(u, v)$ ,  $F(u, v)$ ,  $H(u, v)$  和  $N(u, v)$  分别为  $g(x, y)$ ,  $f(x, y)$ ,  $h(x, y)$  和  $n(x, y)$  的傅氏变换.

在噪声未知和不可分离的情况下,可近似取  $\hat{F}(u, v) = G(u, v)/H(u, v)$  的反傅氏变换作为恢复图象  $f(x, y)$ , 这就是反滤波恢复方法. 通常退化系统的频率响应函数  $H(u, v)$  随着  $u, v$  的增大迅速衰减, 换言之, 当  $u, v$  较大时,  $H(u, v)$  通常很小, 而  $N(u, v)$  却接近一常数, 这样, 由于忽略了  $N(u, v)$  而造成的估计误差为

$$E(u, v) = F(u, v) - \hat{F}(u, v) = \frac{N(u, v)}{H(u, v)}$$

当  $u, v$  较大时, 这一误差也很大, 因而造成复原图象质量很差.

为了解决  $H(u, v)$  零点的噪声放大问题, 可对反滤波公式进行一些修改, 令

$$\hat{F}(u, v) = \frac{H^*(u, v)}{H(u, v)H^*(u, v) + \gamma} G(u, v) \quad (3)$$

其中  $H^*(u, v)$  是  $H(u, v)$  的复共轭;  $\gamma$  是信噪比, 为一常数. 当  $\gamma = 0$  时, 这种修改后的滤波器简化为反滤波, 而且对于有限的  $\gamma$ , 所有的  $H(u, v)$  零点都转化为

$\frac{H^*(u, v)}{H(u, v)H^*(u, v) + \gamma}$  的零点, 因而可解决  $H(u, v)$  零点的噪声放大问题. 这便是维纳滤波恢复方法.

维纳滤波法虽然在一定程度上压抑了噪声, 且确实改进了图象恢复效果, 但是噪声并非恢复图象出现错误的主要来源, 在实际的反滤波和维纳滤波中, 由于模糊图象  $g(x, y)$  只有部分是可用的, 并且该部分可用的截断图象进而被数字化, 以进行离散傅立叶变换, 故而维纳滤波也不是图象恢复的最佳解决方法. Lim *et al.* 对这种由于模糊图象信息的不完整性而造成的边缘误差(edge error)进行了数学分析<sup>[1]</sup>, 即离散卷积定理要求数据是周期性的, 而实际图象几乎都不是周期性的, 因而在反滤波和维纳滤波中对卷积定理的直接应用是导致边缘误差的直接原因, 而且这种边缘误差是周期性的, 并且幅度很大, 即在一个周期内象素强度可从极白转化为极黑. 维纳滤波法比反滤波法可减小边缘误差, 且其处理后的图象的中央部分比边缘部分恢复效果更好些. 对于维纳滤波而言, 还有参数  $\gamma$  的取值问题, 即增加  $\gamma$ , 可减小边缘误差, 但恢复图象的分辨率会降低, 而且当  $\gamma > 0.01$  时, 会产生幽灵(ghost, 指在原图象每个显著特征旁出现反色影象)效应; 当  $\gamma < 0.0001$  时, 会产生震铃(ring, 指在恢复方向上出现多个等间距影象)效应. 实验表明, 在参数  $\gamma$  的取值界于 0.0001 和 0.01 之间时, 恢复效果最好.

## 1 二维运动模糊图象恢复的误区

对水平方向运动模糊图象进行恢复的方法很多, 如: 1972 年 Sondhi 提出的基于对框外象素强度进行估计的方法<sup>[2]</sup>; Lim *et al.* 提出的带窗的维纳滤波方法<sup>[1]</sup>; Lim *et al.* 提出的谱插值方法和象素微分插值方法<sup>[3]</sup>等等. 这些方法对各自适用领域的模糊图象的恢复效果都很好, 如果这些方法能方便地推广到任意方向的话, 就实现了任意方向运动模糊图象的恢复. 从物理学角度来讲, 任意方向的直线运动可分解为相互垂直的  $x$  方向和  $y$  方向的独立运动, 那么对任意直线方向的运动模糊图象, 是否可先按  $x$  方向进行恢复, 然后再按  $y$  方向进行恢复呢?

设原图象为  $f(x, y)$ , 其匀速直线运动模糊图象为  $g(x, y)$ , 点扩展函数为  $h(x, y)$ ,  $x$  方向的点扩展函数为  $h^x(x)$ ,  $y$  方向的点扩展函数为  $h^y(y)$ , 则其运动模糊方向如图 1 所示.

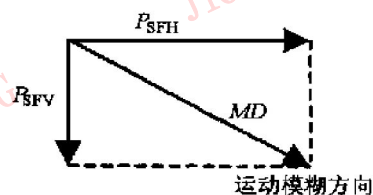


图 1 运动模糊方向示意图

图中,  $MD$  为在曝光时间内图象在运动方向上移动的象素数;  $P_{SFH}$  和  $P_{SFV}$  为  $MD$  在  $x$  方向和  $y$  方向上分解得到的分量.

若  $P_{SFH} \geq P_{SFV}$ , 则匀速直线运动点扩展函数为

$$h(x, y) = \begin{cases} 1/P_{SFH} & x = 0, 1, \dots, P_{SFH} - 1 \\ & y = \left\lfloor x \frac{P_{SFV}}{P_{SFH}} \right\rfloor = 0, 1, \dots, y_{\max} \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $y_{\max} = (P_{SFH} - 1) \frac{P_{SFV}}{P_{SFH}}$

若  $P_{SFH} < P_{SFV}$ , 则匀速直线运动点扩展函数为

$$h(x, y) = \begin{cases} 1/P_{SFV} & y = 0, 1, \dots, P_{SFV} - 1 \\ & x = \left\lfloor y \frac{P_{SFH}}{P_{SFV}} \right\rfloor = 0, 1, \dots, x_{\max} \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $x_{\max} = (P_{SFV} - 1) \frac{P_{SFH}}{P_{SFV}}$

在上述两种情况下,运动模糊图象应是

$$g(i, k) = \sum_{j=0}^{P_{SFH}-1} \sum_{s=0}^{y_{max}} h(j, s) f(i-j, k-s) \quad (6)$$

或

$$g(i, k) = \sum_{j=0}^{x_{max}} \sum_{s=0}^{P_{SFV}-1} h(j, s) f(i-j, k-s) \quad (7)$$

$x$  方向的点扩展函数为

$$h^x(x) = \begin{cases} 1/P_{SFH} & x = 0, 1, \dots, P_{SFH} - 1 \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \quad (8)$$

$y$  方向的点扩展函数为

$$h^y(y) = \begin{cases} 1/P_{SFV} & y = 0, 1, \dots, P_{SFV} - 1 \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \quad (9)$$

若将原图象先按  $x$  方向进行运动模糊,再按  $y$  方向进行运动模糊,则有

$$g(i, y) = \sum_{j=0}^{P_{SFH}-1} h^x(j) f(i-j, y) \quad (10)$$

$$\begin{aligned} g(i, k) &= \sum_{s=0}^{P_{SFV}-1} h^y(s) g(i, k-s) \\ &= \sum_{s=0}^{P_{SFV}-1} h^y(s) \sum_{j=0}^{P_{SFH}-1} h^x(j) f(i-j, k-s) \\ &= \sum_{j=0}^{P_{SFH}-1} \sum_{s=0}^{P_{SFV}-1} h^x(j) h^y(s) f(i-j, k-s) \\ &= \sum_{j=0}^{P_{SFH}-1} \sum_{s=0}^{P_{SFV}-1} h^{xy}(j, s) f(i-j, k-s) \end{aligned} \quad (11)$$

其中,

$$\begin{aligned} h^{xy}(j, s) &= h^x(j) h^y(s) \\ &= \begin{cases} 1/(P_{SFH} \times P_{SFV}) & j = 0, 1, \dots, P_{SFH} \text{ 且} \\ & s = 0, 1, \dots, P_{SFV} \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \end{aligned} \quad (12)$$

$$\left| \begin{array}{ccc} \sum_{p=0}^i \sum_{q=0}^k h_{p,q} & \sum_{p=0}^i \sum_{q=0}^{P_{SFH}-1} h_{p,q} & \sum_{p=0}^i \sum_{q=k+P_{SFH}-H_L}^{P_{SFH}-1} h_{p,q} \\ \sum_{p=0}^{P_{SFV}-1} \sum_{q=0}^k h_{p,q} & 1 & \sum_{p=0}^{P_{SFV}-1} \sum_{q=k+P_{SFH}-H_L}^{P_{SFH}-1} h_{p,q} \\ \sum_{p=i+P_{SFV}-V_L}^{P_{SFV}-1} \sum_{q=0}^k h_{p,q} & \sum_{p=i+P_{SFV}-V_L}^{P_{SFV}-1} \sum_{q=0}^{P_{SFH}-1} h_{p,q} & \sum_{p=i+P_{SFV}-V_L}^{P_{SFV}-1} \sum_{q=k+P_{SFH}-H_L}^{H_L-1} h_{p,q} \end{array} \right| \quad (13)$$

这样,对任意方向的运动模糊图象的恢复步骤如下:

- ① 求加窗的模糊图象  $\omega_{,k} g_{i,k}$  的离散傅立叶变换  $\tilde{G}_{u,v}$ ;
- ② 设置点扩展函数  $h_{i,k}$ , 并求其离散傅立叶变换  $H_{u,v}$ ;
- ③ 求  $\tilde{G}_{u,v} H_{u,v}^* / |H_{u,v}|^2 + \mathcal{Y}$  的反离散傅立叶

对比式(4)、式(5)和式(12),可见

$$h(x, y) \neq h^{xy}(j, s).$$

通过以上证明,笔者认为对任意方向的直线运动模糊图象的恢复只能直接进行二维恢复,不可先进行  $x$  方向的一维恢复,再进行  $y$  方向的一维恢复.

## 2 二维运动模糊图象恢复方法

Lim *et al.* 提出了对二维模糊图象(宽为  $H_L$ , 高为  $V_L$ ) 进行恢复的最优窗法<sup>[4]</sup>, 即恢复窗  $\omega_{,k}$  (如图 2 所示) 将图象平面分为 9 个区域, 未标号的中央区域  $\omega_{,k} = 1$ . 在最上一层, 区域 1、7 和 8 的  $i$  坐标的取值范围为  $[0, P_{SFV} - 2]$ , 区域 2、6 和未标号中央区域的  $i$  坐标的取值范围为  $[P_{SFV} - 1, V_L - P_{SFV}]$ , 区域 3、4 和 5 的  $i$  坐标取值范围为  $[V_L - P_{SFV} + 1, V_L - 1]$ ; 水平方向上, 区域 1、2 和 3 的  $k$  坐标取值范围为  $[0, P_{SFH} - 2]$ , 区域 4、8 和未标号中央区域的  $k$  坐标的取值范围为  $[P_{SFH} - 1, H_L - P_{SFH}]$ , 区域 5、6 和 7 的  $k$  坐标的取值范围为  $[H_L - P_{SFH} + 1, H_L - 1]$ .

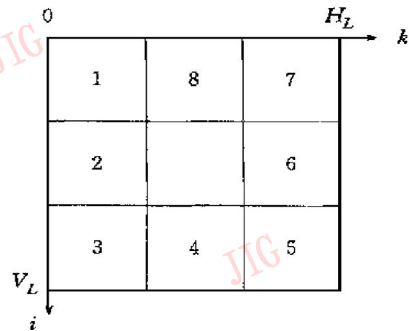


图 2 最优窗

最优窗  $\omega_{,k}$  按式(13)取值:

变换, 其中  $\mathcal{Y}$  按文献[1]的建议取 0.0001 至 0.01 之间的值.

这种加最优窗的维纳滤波方法有效地抑制了边缘误差, 但也有它的缺点, 即图象右部  $P_{SFH}$  宽的竖条带和底部  $P_{SFV}$  高的横条带(L-形条带) 没有恢复出来, 这是由于图象数据的不完整性造成的, 因此可

以直接取模糊图象 L-形条带的值作为恢复后图象的值。

### 3 点扩展函数的确定

在运动模糊图象的恢复过程中,估计点扩展函数是必要步骤.对于一维直线运动模糊, Lim *et al.* 归纳了下列 5 种典型的点扩展函数<sup>[5]</sup>:

- ① 反斜坡:  $RR_i = M - i, \text{ for } i = 0, 1, \dots, M-1$
- ② 反梯形:  $RT_i = 2M - i, \text{ for } i = 0, 1, \dots, M-1$
- ③ 方波:  $SP_i = 1, \text{ for } i = 0, 1, \dots, M-1$
- ④ 正梯形:  $FT_i = M + i, \text{ for } i = 0, 1, \dots, M-1$
- ⑤ 正斜坡:  $FR_i = i + 1, \text{ for } i = 0, 1, \dots, M-1$

其图形如图 3 所示:

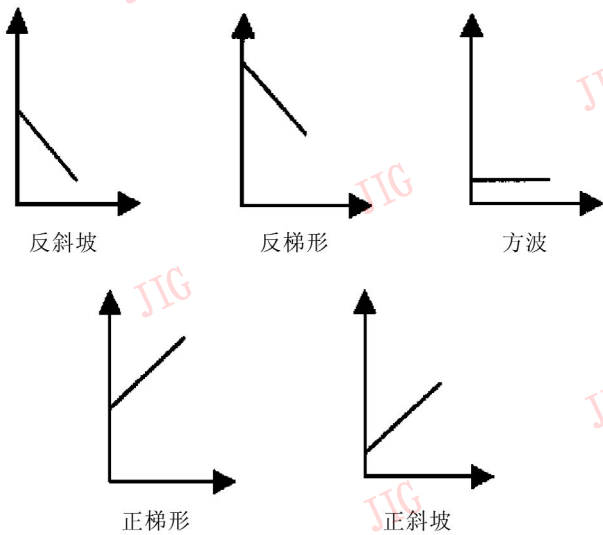


图 3 5 种点扩展函数

本文针对二维直线运动模糊图象的恢复,设置了相应的 5 种类型的点扩展函数.估计点扩展函数的过程如下:

- ① 根据模糊图象的纹理,目测估计运动模糊方向;

- ② 目测估计曝光时间内,图象在运动方向上移动的像素数  $MD$ ;

- ③ 首次恢复采用方波点扩展函数;

- ④ 若恢复图象上等间距的横条带和竖条带明显存在,则  $MD$  估计有误.此时需分别测量横条带的间距  $P_{SFV}$  和竖条带的间距  $P_{SFH}$ , 及计算模糊范围

$MD = \sqrt{(P_{SFH})^2 + (P_{SFV})^2}$ , 模糊方向  $\arctan(P_{SFV}/P_{SFH})$ , 然后再用该模糊范围和方向的方波点扩展函数进行恢复;

- ⑤ 若第④步的恢复图象有震铃效应, 则需再分别用同样模糊范围和方向的正梯形、反梯形、正斜坡和反斜坡点扩展函数进行恢复, 以从中选择恢复效果最好的点扩展函数.

### 4 直线运动模糊图象举例

下面举两个用带最优窗的维纳滤波方法对直线运动模糊图象进行恢复的例子, 并与用标准维纳滤波方法进行恢复的结果相比较. 4 个恢复图象的恢复参数  $\gamma$  均取 0.001.

图 4 是一女孩的模糊图象(256×256), 模糊范围  $MD$  为 15, 模糊方向为与水平方向成  $30^\circ$  角(逆时针为正). 图 5 是用标准维纳滤波方法进行恢复的结果. 图 6 是用带最优窗的维纳滤波方法进行恢复的结果. 图 7 是大狒狒的模糊图象(512×512), 模糊范围  $MD$  为 40, 模糊方向为与水平方向成  $-60^\circ$  角(逆时针为正). 图 8 是用标准维纳滤波方法进行恢复的结果. 图 9 是用带最优窗的维纳滤波方法进行恢复的结果.

通过两种恢复结果相比可见, 带最优窗的维纳滤波方法的恢复结果远远优于标准维纳滤波方法的恢复结果.



图 4



图 5



图 6



图 7



图 8



图 9

## 5 总 结

由于用于运动模糊图象恢复的反滤波方法对噪声很敏感,虽然维纳滤波可解决  $H(u, v)$  零点的噪声放大问题,并改进了恢复效果,但是噪声并非是图象恢复出现错误的主要来源,而用于实际反滤波和维纳滤波的模糊图象  $g(x, y)$  只有部分是可用的,且模糊图象信息的不完整性也会造成边缘误差(edge error),故而维纳滤波也不是模糊图象恢复的最佳解决方法.由对女孩和大狒狒头象的恢复结果证明,本文所述的带最优窗的维纳滤波方法可有效地去除噪声和减小边缘误差,而且除了边缘的 L-形条带外,可得到近乎完美的恢复效果.

点扩展函数的设置是影响恢复结果好坏的关键.笔者证明了对任意方向直线运动模糊图象的恢复只能用直接设置二维点扩展函数的方法来进行二维恢复,而不可先进行  $x$  方向的一维恢复,再进行  $y$  方向的一维恢复.用于直线运动模糊图象恢复的点扩展函数包括 5 种类型,即反斜坡、反梯形、方波、正梯形和正斜坡.试验证明,若要得到好的恢复效果必须能够选择其中一种点扩展函数,并需正确估计模糊范围  $MD$  和运动模糊方向,因此笔者给出了估计二维点扩展函数的一般步骤.

## 参 考 文 献

- 1 Lim H, Tan K C, Tan B T G. Edge errors in inverse and wiener filter restorations of motion-blurred images and their windowing treatment. CVGIP, 1991, 53: 186~ 195.
- 2 Sondhi M M, Image restoration: The removal of spatially invariant degradations. In: Proc. IEEE. 1972, 60(7): 828~ 842.
- 3 Lim H, Tan K C, Tan B T G. New methods for restoring motion-blurred images derived from edge error consideration. CVGIP, 1991, 53: 479~ 490.
- 4 Lim H, Tan K C, Tan B T G. Windowing techniques for image restoration. CVGIP, 1991, 53: 491~ 500.
- 5 Lim H, Tan K C, Tan B T G. Restoration of real-world motion-blurred images, CVGIP, 1991, 53: 291~ 299.



**王晓红** 1974 年生,1992 年至今就读于西北工业大学,1996 年获计算机应用专业学士学位,1999 年获计算机应用专业硕士学位,现于西北工业大学攻读博士学位,主要从事图象处理及模式识别方面的研究工作.



**赵荣椿** 1960 年毕业于解放军军事工程学院,现任西北工业大学信号处理研究所所长、博士生导师.研究领域为信号、图象处理,模式识别与计算机视觉,已发表论文 70 余篇、著作 5 部.