

运动模糊图像的判定与恢复

胡家升*, 马明

(大连理工大学 电子与信息工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: 为消除图像由于摄取时的相对运动所造成的模糊和失真, 将未被降质的原始图像视为各向同性的一阶马尔可夫过程, 利用双线性插值和 3×3 方向微分算子, 采用“先粗后细”的方法, 从降质图像中粗略确定运动模糊方向范围后, 再高精度鉴别其具体数值. 然后将降质图像旋转至水平轴, 将二维问题简化为一维问题. 这种优化后的模糊运动方向鉴别方法具有鉴别范围大、稳定性好的优点, 既克服了 Yitzhaky 方法的不足又减少了计算量, 提高了精度. 再利用模糊图像模糊带内像素点之间的相关性估计模糊尺度, 由运动模糊方向和尺度这两个参数得到点扩散函数, 然后用滤波的方法得到恢复效果良好的复原图像.

关键词: 图像恢复; 运动模糊; 方向微分; 模糊尺度; 点扩散函数

中图分类号: TP751.1 **文献标志码:** A

0 引言

图像恢复是图像处理中的重要研究内容, 其目的是从退化图像中重建原始图像, 改善退化图像的视觉质量. 在这一点上和图像增强是类似的, 所不同的是图像恢复过程需要根据图像退化的过程或现象来建立一定的图像退化模型来完成, 可能的退化现象有传感器的非线性失真、光学系统的像差、图像运动造成的模糊以及外界条件的干扰等^[1~3]. 根据所建立的退化模型来选取相应的恢复算法对退化图像进行恢复, 可以得到满足要求的图像.

当拍摄目标和相机之间存在相对运动时, 拍摄出来的图像会变得模糊, 图像质量下降. 图像恢复的质量和可靠性通常依赖于对图像退化信息了解的确切程度. 但在实际当中, 造成图像退化的信息未知, 这就给恢复图像带来了一定的困难. 对于运动模糊图像, 如果能够知道造成模糊的方向和尺度, 就可以得到点扩散函数, 然后就可以用滤波的方法恢复出原图像.

Cannon 等^[4,5]利用匀速直线运动模糊图像对

应的频域上有周期性的零值条纹且运动方向与零值条纹方向相垂直的特点从模糊图像中估计出运动模糊方向和尺度, 但该方法仅局限于匀速直线运动, 不适合于加速运动、振动, 且抗噪能力较弱. 邹谋炎提出的“误差-参数分析法”^[6], 解决了抗噪能力较弱的问题, 但是从其所给出的误差鉴别曲线来看, 真值附近那段曲线较平坦, 不利于准确鉴别, 且该方法计算量很大. 鉴别模糊尺度可以根据原图像中一目标点或在均匀图像背景中的锐化边缘在运动模糊图像中的亮度分布情况进行估计, 但其所要求的特征在实际图像的恢复中是几乎不能满足的. 还可以根据自回归模型和假设的高斯白噪声, 应用极大似然估计 ML(maximum likelihood)估计^[7], 但这种方法只适用于一般的对称点扩散函数, 其限制是 ML 方法不能决定点扩散函数的相位. 另外还可以沿运动方向对模糊图像求方向导数, 得到一正一负两个原始图像的叠加像, 两者的距离就是模糊尺度^[8]. 但这种方法误差较大, 只用于目测模糊尺度. 本文采用双线性插值和 3×3 方向微分算子, 在确定运动模糊方向的大致范围后进行高精度鉴别, 再利用像素相关性得

到模糊尺度,最后利用所得参数进行滤波得到复原图像。

1 运动模糊方向和尺度的鉴别

图像恢复处理的关键是建立图像的退化模型。不同的环境造成图像退化的过程也不同,图1为简单通用的图像退化模型,原始图像 $f(x,y)$ 由于通过了一个系统 H 及外来的加性噪声 $n(x,y)$ 而形成一幅退化图像 $g(x,y)$,其数学形式为

$$g(x,y) = H[f(x,y)] + n(x,y) \quad (1)$$

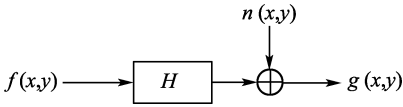


图1 图像退化模型

Fig. 1 The model of degenerated image

图像恢复的目的是使原图像复原。由于加性噪声 $n(x,y)$ 具有统计性质,如果估计出系统的 H ,那么由给定的退化图像 $g(x,y)$ 就可以近似地恢复出 $f(x,y)$ 。可见,图像恢复的关键是确定系统的 H ,一般而言, H 表征了信息传递或成像系统的特性,也就是说,该系统使信息丧失的程度。

1.1 运动模糊方向的鉴别

Yitzhaky 等^[9,10]提出,将原图像看做是自相关及其功率谱是各向同性的一阶马尔可夫过程,运动模糊降低了运动方向上图像的高频成分,而对于其他方向上图像的高频成分影响较小,方向偏离越大影响越小。如果对运动模糊图像进行方向性的高通滤波(方向微分),当滤波方向为运动模糊方向时,由于此方向模糊图像对应的高频成分最少,高通滤波(方向微分)使模糊图像能量损失最大,得到的微分图像灰度值之和必然最小。所以方向微分得到的图像灰度值之和中的最小值对应的方向即为运动模糊的方向。为了减少计算量,通过图像旋转,将运动模糊方向旋转到水平轴上,从而使图像恢复问题由二维简化为一维。运动模糊方向鉴别过程具体如下:

在像平面中的运动模糊方向(记为 α 角,定义水平轴为0,上负下正,顺时针方向增大)通常是未知的。设 $g(i,j)$ 为运动模糊图像上一点, Δr 是进行方向微分时的微元长度, $g(i',j')$ 是模糊图

像中以 $g(i,j)$ 为中心、半径为 Δr 的半圆弧上的一点, D_a 是 3×3 方向微分算子, $\Delta g(i,j)_a$ 为对模糊图像进行方向微分后所得到的微分图像,则

$$\Delta g(i,j)_a = g(i',j') - g(i,j) = g(i,j) \times D_a \quad (2)$$

对微分图像 $\Delta g(i,j)_a$ 度值(绝对值)求和:

$$I(\Delta g)_a = \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} |\Delta g(i,j)_a| \quad (3)$$

在 $\alpha \in [-\pi/2, \pi/2]$ 范围内按一定步长(如 10°)取 α 值,求出对应的微分图像灰度值(绝对值)之和 $I(\Delta g)_a$,并求出其中的最小值 $\min(I(\Delta g)_a)$,从而得到运动模糊方向。初步估计出运动模糊方向所在的区间后,在此方向附近细分步长,如每步为 0.1° ,重复上述算法。这样,最终所取得的最小值 $\min(I'(\Delta g)_a)$ 所对应的 α' 即为运动模糊方向与水平轴的夹角。

式(2)中的 $g(i',j')$ 由其近邻的四点用双线性插值方法获得。图2是 $\Delta r = 2$, $-\pi/2 \leq \alpha \leq -\pi/3$ 时的 3×3 方向微分算子的求法。 $g(i',j')$ 在 $g(i-2,j)$ 、 $g(i-1,j)$ 、 $g(i-1,j+1)$ 和 $g(i-2,j+1)$ 四点之间,其值为

$$\begin{aligned} g(i',j') = & [-1 - \Delta r \sin \alpha + \Delta r \cos \alpha + \\ & (\Delta r)^2 \sin \alpha \cos \alpha] g(i-2,j) + \\ & [-\Delta r \cos \alpha - (\Delta r)^2 \sin \alpha \cos \alpha] \times \\ & g(i-2,j+1) + [2 + \Delta r \sin \alpha - \\ & 2\Delta r \cos \alpha - (\Delta r)^2 \sin \alpha \cos \alpha] \times \\ & g(i-1,j) + [2\Delta r \cos \alpha + \\ & (\Delta r)^2 \sin \alpha \cos \alpha] g(i-1,j+1) \end{aligned} \quad (4)$$

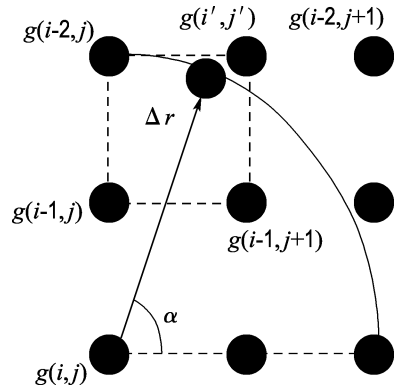


图2 3×3 方向微分算子求法

Fig. 2 Deducing the 3×3 directional differentiation matrix

由式(2)知

$$\mathbf{D}_{a1} = \begin{pmatrix} -1 - \Delta r \sin \alpha + \Delta r \cos \alpha + (\Delta r)^2 \sin \alpha \cos \alpha & -\Delta r \cos \alpha - (\Delta r)^2 \sin \alpha \cos \alpha & 0 \\ 2 + \Delta r \sin \alpha - 2\Delta r \cos \alpha - (\Delta r)^2 \sin \alpha \cos \alpha & 2\Delta r \cos \alpha + (\Delta r)^2 \sin \alpha \cos \alpha & 0 \\ -1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

对于不同的 $\alpha(\alpha \in [-\pi/2, \pi/2))$, 用于插值的近邻四点相对 $g(i, j)$ 的位置各不相同, 因而微分算子 $\mathbf{D}_a$ 的取值形式随 α 值所在的范围变化而变化^[11,12]:

当 $-\pi/3 \leq \alpha < -\pi/6, -\pi/6 \leq \alpha < 0, 0 \leq \alpha < \pi/6, \pi/6 \leq \alpha < \pi/3, \pi/3 \leq \alpha < \pi/2$ 时, $\mathbf{D}_a$ 分别对应

$$\mathbf{D}_{a2} = \begin{pmatrix} 0 & -2 - 2\Delta r \sin \alpha + \Delta r \cos \alpha + (\Delta r)^2 \sin \alpha \cos \alpha & 1 + \Delta r \sin \alpha - \Delta r \cos \alpha - (\Delta r)^2 \sin \alpha \cos \alpha \\ 0 & 4 + 2\Delta r \sin \alpha - 2\Delta r \cos \alpha - (\Delta r)^2 \sin \alpha \cos \alpha & -2 - \Delta r \sin \alpha + 2\Delta r \cos \alpha + (\Delta r)^2 \sin \alpha \cos \alpha \\ -1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{D}_{a3} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -2\Delta r \sin \alpha + (\Delta r)^2 \sin \alpha \cos \alpha & \Delta r \sin \alpha - (\Delta r)^2 \sin \alpha \cos \alpha \\ -1 & 2 + 2\Delta r \sin \alpha - \Delta r \cos \alpha - (\Delta r)^2 \sin \alpha \cos \alpha & -1 - \Delta r \sin \alpha + \Delta r \cos \alpha + (\Delta r)^2 \sin \alpha \cos \alpha \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{D}_{a4} = \begin{pmatrix} -1 & 2 - 2\Delta r \sin \alpha - \Delta r \cos \alpha + (\Delta r)^2 \sin \alpha \cos \alpha & -1 + \Delta r \sin \alpha + \Delta r \cos \alpha - (\Delta r)^2 \sin \alpha \cos \alpha \\ 0 & 2\Delta r \sin \alpha - (\Delta r)^2 \sin \alpha \cos \alpha & -\Delta r \sin \alpha + (\Delta r)^2 \sin \alpha \cos \alpha \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{D}_{a5} = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 4 - 2\Delta r \sin \alpha - 2\Delta r \cos \alpha + (\Delta r)^2 \sin \alpha \cos \alpha & -2 + \Delta r \sin \alpha + 2\Delta r \cos \alpha - (\Delta r)^2 \sin \alpha \cos \alpha \\ 0 & -2 + 2\Delta r \sin \alpha + \Delta r \cos \alpha - (\Delta r)^2 \sin \alpha \cos \alpha & 1 - \Delta r \sin \alpha - \Delta r \cos \alpha + (\Delta r)^2 \sin \alpha \cos \alpha \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{D}_{a6} = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 2 - \Delta r \sin \alpha - 2\Delta r \cos \alpha + (\Delta r)^2 \sin \alpha \cos \alpha & 2\Delta r \cos \alpha - (\Delta r)^2 \sin \alpha \cos \alpha & 0 \\ \Delta r \sin \alpha - 1 + \Delta r \cos \alpha - (\Delta r)^2 \sin \alpha \cos \alpha & -\Delta r \cos \alpha + (\Delta r)^2 \sin \alpha \cos \alpha & 0 \end{pmatrix}$$

通过大量数据试验尝试与权衡取舍, 可以令 Δr 分别再取 3、4、5 这 3 个数, 重复上述算法, 将 4 种情况得到的 $I'(\Delta g)_a$ 相加取平均值以提高判别精度, 减小误差。

1.2 模糊尺度的鉴别

图 3 是运动模糊尺度鉴别计算的流程图. 其中, 第 1 步是求 $g(i, j)$ 在水平轴方向上的一阶微分图像 $g'(i, j)$; 第 2 步是求 $g'(i, j)$ 在水平轴方向上的自相关函数 $S(i, j)$; 第 3 步是将 $S(i, j)$ 各列加在一起, 得到一行数据 S_{add} , 求和的目的是抑制噪声的影响, 提高判别精度和可靠性; 第 4 步, 画出 S_{add} 曲线, 得到运动模糊尺度判别曲线. 曲线上会出现一对共轭的相关峰, 这对相关峰数值为负(尖峰向下)且对称分布在零频尖峰两侧, 两相关峰间的距离等于运动模糊尺度的 2 倍^[13].

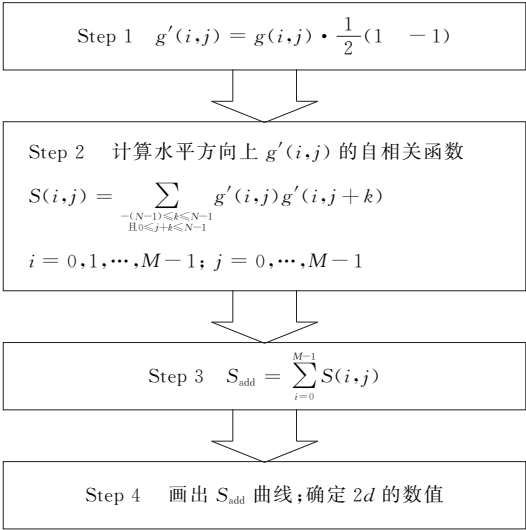


图 3 运动模糊尺度鉴别计算流程
Fig. 3 The flow chart of the blur extent's identification

上述做法原理如下：

如图 4(a) 所示, 4 个像素由于水平匀速运动 10 pixel 的距离而产生了一条模糊带. 模糊带内像素灰度值相等, 如图 4(b) 所示. 水平方向上的一阶微分如下：

$$g'(x) = g(x) - g(x - 1) \tag{5}$$

式中: $g(x)$ 为图像的一行像素, $g'(x)$ 表示这行元素的微分. 微分操作抑制了带内像素的相似性, 强化了它的边缘特征, 因此在模糊带的两个端点处出现绝对值相等但是符号相反的两个极值像素点, 如图 4(c) 所示. $g'(x)$ 的自相关函数如下：

$$r_{gg}(m) = \sum_{x=-\infty}^{\infty} g'(x)g'(x+m) \tag{6}$$

$r_{gg}(m)-m$ 曲线如图 4(d) 所示. 可以看出, 利用自相关函数可以检测出模糊尺度.

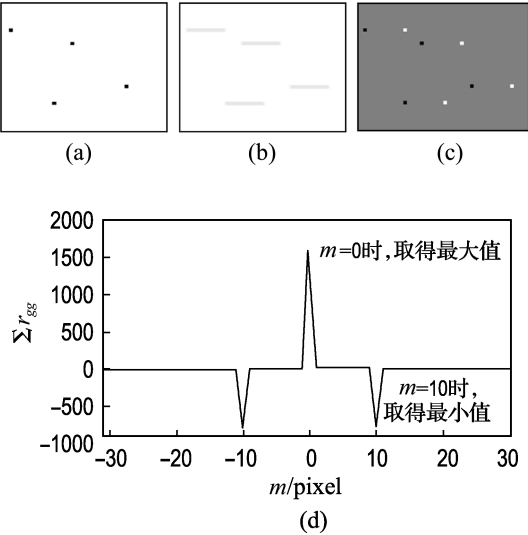


图 4 鉴别模糊尺度原理

Fig. 4 The principle of the blur extent's identification

对于运动模糊方向已被旋转到水平轴的匀速运动模糊图像, 得到了运动模糊尺度就等价于得到了点扩散函数, 从而可以用各种图像恢复方法直接恢复图像. 对于加速运动、振动等运动模糊图像, 该方法虽然不能给出运动模糊点扩散函数的具体数值分布形式, 但由于给出了运动模糊尺度, 即确定了运动模糊点扩散函数的支持域, 而支持域的精确确定对于最大似然法 (maximum likelihood algorithm)、增量迭代盲目反卷积法 (incremental iterative blind deconvolution algorithm) 非常重要, 它直接关系到上述盲恢复

算法的收敛速度及最后的恢复效果. 因此, 利用这一新的方法判别出运动模糊尺度, 对于运动模糊图像的恢复具有重要的意义.

2 运动模糊图像的恢复与重构实验

图 5 是一幅大小为 160×128 的图像, 图 6 是其运动模糊图像 $g(x,y)$, 模糊尺度为 20 pixel, 真实的运动模糊方向为 -65.5° .

对计算机模拟出来的运动模糊图像的边缘进行处理就可以将其等同于自然模糊所得的运动模糊图像^[14].



图 5 原图像

Fig. 5 The original image



图 6 运动模糊图像

Fig. 6 The motion-blurred image

图 7 是前述 3×3 的方向微分算子 D_α 对运动模糊方向的判别曲线 $(I(\Delta g)_\alpha - \alpha)$, 计算中 α 步长取 10° . 可以看出, α 离真实运动模糊方向越近时, 对应的 $I(\Delta g)_\alpha$ 越小. α 的最小值应该在 $[-70, -60]$ 这个区间. 在此区间内, α 步长取 0.1° , 绘制出运动模糊方向的鉴别曲线 $(I(\Delta g)_\alpha - \alpha')$, 如图 8 所示. 则 $\alpha' = -65.7^\circ$ 即为鉴别出的运动模糊方向, 误差为 -0.2° .

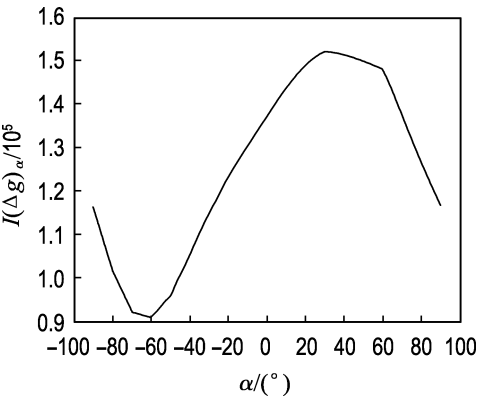


图 7 运动模糊方向鉴别曲线 1

Fig. 7 Identification results 1 for the direction of motion

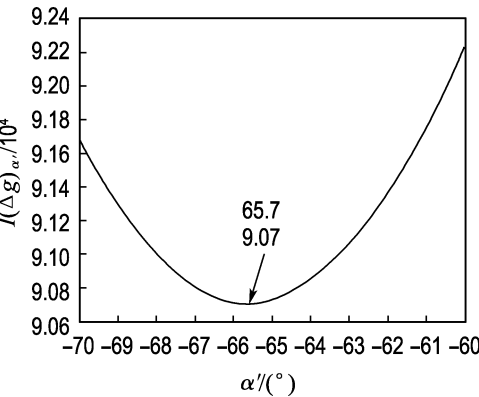


图 8 运动模糊方向鉴别曲线 2

Fig. 8 Identification results 2 for the direction of motion

利用上述方法,对图 6 的一系列在各个方向的匀速直线运动模糊图像(模糊尺度为 20 pixel)进行鉴别,总的判别结果还是令人满意的,如表 1 所示.

表 1 3×3 方向微分算子对运动模糊方向的鉴别结果

Tab. 1 Motion blur direction identification with the 3×3 directional differentiation matrix (°)					
真实值	判别值	误差	真实值	判别值	误差
90.0	90.0	0	-5.5	-4.5	1
85.5	84.6	-0.9	-15.5	-14.8	0.7
75.5	74.2	-1.3	-25.5	-25.1	0.4
65.5	65.7	0.2	-35.5	-34.7	0.8
55.5	54.9	-0.6	-45.5	-44.8	0.7
45.5	44.4	-1.1	-55.5	-54.3	1.2
35.5	36.3	0.8	-65.5	-64.3	1.2
25.5	23.9	-1.6	-75.5	-74.6	0.9
15.5	14.6	-0.9	-85.5	-86.2	-0.7
5.5	4.5	-1	-90.0	-90.0	0
0	0	0			

表 2 所示为 Yitzhaky 等所采用的 2×2 微分算子所能鉴别的 0°~45°范围内的运动模糊方向的误差,可知其误差比较大.而利用式(2)和式(3)所描述的 3×3 的方向微分算子 D_3 ,对真实运动方向分布在 -90°~90°范围的多幅运动模糊图像进行方向鉴别,鉴别结果表明,这种判别方法是有效可靠的,判别精度高,范围大,稳定性好.对于不同的模糊尺度(8~80 pixel)都能够精确地判别出模糊方向.一般模糊尺度越大,判别精度越高.只要原图像是自然图像,即使“原图像的自相关及其功率谱是各向同性的”这个前提条件符合得不是很好,也基本上能够鉴别出其运动模糊图像的运动模糊方向,只是误差可能大一些而已.

表 2 2×2 方向微分算子对运动模糊方向的鉴别结果

Tab. 2 Motion blur direction identification with the 2×2 directional differentiation matrix (°)

真实值	判别值	误差	真实值	判别值	误差
0	0	0	25	36	11
5	0	-5	30	36	6
10	17	7	35	37	2
15	25	10	40	33	-7
20	30	10	45	31	-14

通过一阶微分、水平方向自相关、各列求和,得到图 9 的运动模糊尺度鉴别曲线 (S_{add-m}).可以看出在鉴别曲线中有一处有一尖锐高耸的零频尖峰,两负尖峰的位置分别为 $m_1 = 107, m_2 = 147$.所以运动模糊尺度 d 为

$$d = (m_2 - m_1) / 2 = 20 \tag{7}$$

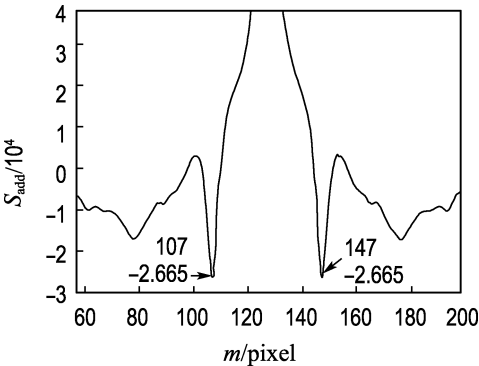


图 9 运动模糊尺度鉴别曲线 S_{add}

Fig. 9 Identification results S_{add} for the motion blur extent

如图9所示,运动模糊尺度为20 pixel,而运动模糊方向估计为 -65.7° ,则可得到如图10所示的运动模糊的点扩散函数.运动模糊用估计的点扩散函数进行恢复,使用Wiener滤波、Lucy-Richardson滤波(重复80次)和盲解卷积恢复(重复80次)恢复出的图像分别见图11~13.

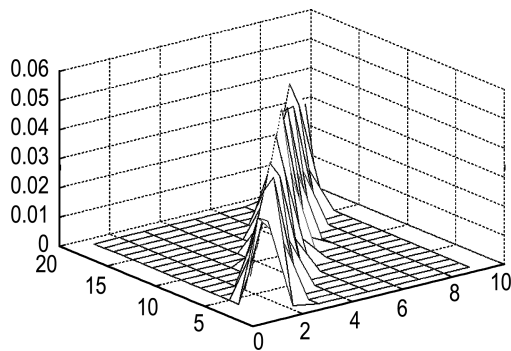


图10 运动模糊图像的点扩散函数

Fig. 10 PSF of the motion-blurred image



图11 Wiener滤波结果

Fig. 11 The result of Wiener filter



图12 Lucy-Richardson滤波结果

Fig. 12 The result of Lucy-Richardson filter



图13 盲解卷积恢复图像

Fig. 13 Image restoration with iterative blind deconvolution

3 结 语

本文首先鉴别出运动模糊图像的运动方向与尺度,由它们得到点扩散函数后,利用Wiener滤波、Lucy-Richardson滤波和盲解卷积恢复得到效果较好的恢复图像.在判别运动模糊方向时,首先粗略估计它的所在区域,然后再高精度鉴别其具体数值,减少了计算量并提高了判别精度,从而改进了陈前荣所提出的 3×3 微分算子判别运动模糊方向的算法.而此种方法对于由振动或加速运动所引起的图像模糊的恢复的适用性则作为下一阶段的目标进行研究.

参考文献:

- [1] 章毓晋. 图像处理和分析(图像工程 上册)[M]. 北京:清华大学出版社, 2001:101-103
- [2] 贾平,张葆,孙辉. 航空成像像移模糊恢复技术[J]. 光学精密工程, 2006, **14**(4):697-703
- [3] 江浩,邓琼,张广军. 基于小波变换的正则化盲图像复原算法[J]. 光学精密工程, 2007, **15**(4):582-586
- [4] CANNON M. Blind deconvolution of spatially invariant blurs with phase [J]. **IEEE Transactions of Acoustic Speech Signal Processing**, 1976, **24**(1):58-63
- [5] 王晓红,赵荣椿. 匀速直线运动模糊的PSF之估计[J]. 计算机应用, 2001, **21**(9):40-41
- [6] 邹谋炎. 反卷积和信号恢复[M]. 北京:国防工业出版社, 2001:200-211

[7] TAN Kah-chye, LIM Hock, TAN B T G. Restoration of real-world motion-blurred images [J]. **CVGIP:Graphical Models and Image Processing**, 1991, **53**(3):291-299

[8] 郑捷文,蔡利栋. 匀速直线运动模糊图像的恢复[J]. 暨南大学学报(自然科学版), 2002, **23**(3):42-45

[9] YITZHAKY Y, KOPEIKA N S. Identification of blur parameters from motion blurred images [J]. **CVGIP:Graphical Models and Image Processing**, 1997, **59**(5): 310-320

[10] YITZHAKY Y, MILBERG R, YOHAEV S, *et al.* Comparison of direct blind deconvolution methods for motion-blurred images [J]. **Applied Optics**, 1999, **38**(20): 4325-4332

[11] 陈前荣,陆启生,成礼智. 运动模糊图像的运动模糊方向鉴别[J]. 国防科技大学学报, 2004, **26**(1): 41-45

[12] 陈前荣,陆启生,成礼智,等. 运动模糊图像点扩散函数尺度鉴别[J]. 计算机工程与应用, 2004, **23**: 15-19

[13] 陈前荣,陆启生,成礼智. 基于方向微分和加权平均的运动模糊方向鉴别[J]. 计算机工程与应用, 2004, **29**:1-5

[14] 潘 琪. 运动模糊仿真图像的正确形成[D]. 广州: 暨南大学, 2005

Identification and restoration of motion-blurred image

HU Jia-sheng*, MA Ming

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

Abstract: To remove the distortion caused by relative moving during taking pictures, assuming that the original image obeys isotropic Markov process with rank one, an efficient identification approach is proposed for motion-blurred direction from motion-blurred image with a 3×3 directional differentiation matrix and the bilinear interpolation. A proper choice of differentiation and the method of "first identifying cursorily and then carrying out the refined identification" can help to identify the direction of the motion, and then the blurred image can be rotated to a horizontal axis and the image restoration can be made out easily in one dimension. This optimized identification of motion blur direction has high precision and stability compared with Yitzhaky's method. A correlation function between the pixels in the blur extent of a blurred image is applied to figure out the blur extent. With these two parameters (the motion blur direction and the blur extent), the PSF (point spread function) can be obtained and the restoration by filters can be carried out with good results.

Key words: image restoration; motion blur; directional differentiation; blur extent; point spread function