

运动模糊图像的运动模糊方向鉴别*

陈前荣, 陆启生, 成礼智

(国防科技大学理学院, 湖南长沙 410073)

摘要 曝光瞬间造成图像模糊的运动通常作为直线运动近似处理,若能找出模糊图像的运动模糊方向,并将之旋转到水平轴,则二维问题可简化为一维来处理,大大简化由模糊图像估计出运动模糊点扩散函数以及图像恢复的过程,并为图像恢复的并行计算创造有利条件。由于运动模糊降低了运动方向上图像的高频成分,沿着运动方向实施高通滤波(方向微分),可保证微分图像灰度值(绝对值)之和最小。基于此,本文利用双线性插值的方法,固定并适当选取方向微分的微元大小,构造出 3×3 方向微分乘子,得到了高效高精度的自动鉴别运动模糊方向的新方法,并通过数值实验进行了验证。

关键词 图像恢复;马尔科夫过程;模糊;运动;方向;微分

中图分类号:TP391.4;TB133 文献标识码:A

Identification of the Motion Blurred Direction of Motion Blurred Images

CHEN Qian-rong, LU Qi-sheng, CHENG Li-zhi

(College of Science, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract The direction of the motion which blurs the image can be dealt with as unchanging during the short exposing time. If it is identified, the blurred direction can be rotated to the horizontal axis, and the image restoration can be worked out easily in one dimension. An excellent simple model for imagery statistics is that of a spatially isotropic first-order Markov process. The autocorrelation of the original image and its power spectrum are assumed to be approximately isotropic. The motion blurring decreases the original image's high frequency contents in the motion direction. Thus, a derivative of the image in the motion direction would suppress more image intensity than a derivation in other direction. Then the motion direction is identified from the blurred image. The derivation matrix is the key for the identification. We select a propriety unchanging step for the direction derivation, a 3×3 direction derivation matrix is then constructed by using the double line interposition. This 3×3 direction derivation matrix can help to identify any motion directions of the most motion blurred images with high precision. It is steady-going.

Key words image restoration; Markov process; blur; motion; direction; derivative

在图像摄取过程中,被摄景物与像面之间的相对运动是十分普遍的,如普通照相时手的抖动、航空侦察时飞机相对于地面的运动等等。这些运动会造成图像模糊,降低图像的分辨率。为了提高对图像的应用效率,提取出模糊图像中被运动模糊所掩盖的信息,可以采用多种方法对模糊图像进行恢复^[1,2]。

由于物体运动都有一定的惯性,在摄取图像的短暂曝光时间内,运动方向一般可认为是近似不变的,所以,运动对于图像的模糊,通常作为直线运动近似处理,但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)未知,若能由模糊图像估计出该方向,则可以通过图像旋转将模糊方向旋转到水平轴(旋转 $-\alpha$ 角)随后的运动模糊点扩散函数的估计及图像恢复工作就由二维问题转化为一维问题,大大降低了解决问题的难度,并为图像恢复的并行计算创造有利条件。

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,运动方向与零值条纹方向相垂直, M. Cannon 等^[3,4]利用这一特点从模糊图像中估计出运动方向和点扩散函数,但该方法仅局限于匀速直线

* 收稿日期:2003-08-30
基金项目:国家部委基金资助项目
作者简介:陈前荣(1972—)男,博士生。

运动,不适用于加速运动、振动。Y. Yitzhaky 和 N. S. Kopeika 等采用一个 2×2 微分乘子来鉴别运动模糊方向^[5~9],但是该微分乘子只能鉴别 $0^\circ \sim 45^\circ$ 范围内的运动模糊方向,鉴别误差比较大,且鉴别误差总是为负值(鉴别结果总是偏向 0°)。

上述运动模糊方向鉴别方法都不是很成功,都没有提到或讨论过“鉴别精度”。

1 运动模糊方向鉴别方法

1.1 鉴别思想

图像统计表明,通常可以将原图像看作是各向同性的一阶马尔科夫过程,即原图像的自相关及其功率谱是各向同性的。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,对于垂直于运动方向上的图像的高频成分没有影响。对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(绝对值)之和必然最小。所以,方向微分得到图像灰度值(绝对值)之和最小时对应的方向即为模糊图像方向。

记运动模糊图像为 $g(i, j)$, $g(i', j')$ 是模糊图像中以 $g(i, j)$ 为圆心、半径为 Δr 的半圆弧上的一点,其中 Δr 是进行方向微分时的微元长度;记 3×3 方向微分乘子为 D_α (其数值随 α 角变化而变化,为简洁起见, D_α 具体形式在 1.2 小节中单独给出),对运动模糊图像 $g(i, j)$ 进行方向微分后得到的微分图像为 $\Delta g(i, j)_\alpha$, 则

$$\Delta g(i, j)_\alpha = g(i', j') - g(i, j) = g(i, j) \times D_\alpha \quad (1)$$

对微分图像 $\Delta g(i, j)_\alpha$ 灰度值(绝对值)求和,

$$K(\Delta g)_\alpha = \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{M-1} |\Delta g(i, j)_\alpha| \quad (2)$$

在 $\alpha \in \left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right)$ 范围内按一定步长(如 1°)取 α 值,求出对应的微分图像灰度值(绝对值)之和 $K(\Delta g)_\alpha$, 并求出其中的最小值 $\min(K(\Delta g)_\alpha)$, 则最小值 $\min(K(\Delta g)_\alpha)$ 对应的 α 角即为运动模糊图像中运动模糊方向与水平轴的夹角。

调整求和范围,利用该方法还可以对局部的运动模糊方向进行鉴别。

1.2 3×3 方向微分乘子 D_α 的取值

将原图像看作是各向同性的一阶马尔科夫过程,像素 $g(i, j)$ 与距离它最近的像素间相关度较高,与距离它较远的像素间相关度较低,相关度随距离增大而递减。适当将微元 Δr 取值增大,在运动模糊方向上,相邻像素间的相关度主要受运动模糊影响,由于模糊尺度(blur extent,即点扩散函数长度)一般比较大(如 10 pixels),运动模糊使得 $g(i', j')$ 与 $g(i, j)$ 间的相关度随 Δr 的增大而下降不会很快,但是在其它方向上, $g(i', j')$ 与 $g(i, j)$ 间的相关度随 Δr 的增大而下降主要是遵循一阶马尔科夫过程,下降的速度要快得多。为使 $K(\Delta g)_\alpha$ 对 α 角的变化更敏感,从而能够以较高的精度和稳定性鉴别出运动模糊方向,通过大量数据实验尝试与权衡取舍,取微元 $\Delta r = 2$,而不是通常的 1,微元大小的选取体现了该鉴别方法的物理思想。

3×3 方向微分乘子 D_α 的求法如图 1, $g(i', j')$ 为以 $g(i, j)$ 为中心、半径为 2 的圆弧上的一点。 $g(i', j')$ 由其最近邻的四点(图中点划线连起来的四点)用双线性插值方法获得。显然,对于不同的 α 值($\alpha \in \left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right)$),用于插值的紧邻四点相对 $g(i, j)$ 的位置各不相同,如图 1(a)~(f),因而微分乘子 D_α 的取值形式随 α 值所在的范围变化而变化,具体如下:

(1) 当 $-\frac{\pi}{2} \leq \alpha < -\frac{\pi}{3}$ 时,如图 1(a), $g(i', j')$ 在 $g(i-2, j)$, $g(i-1, j)$, $g(i-1, j+1)$, $g(i-2, j+1)$ 四点之间,其值由这四点用双线性插值方法获得:

$$g(i', j') = (-1 - 2\sin\alpha + 2\cos\alpha + 4\sin\alpha\cos\alpha)g(i-2, j) + (-2\cos\alpha - 4\sin\alpha\cos\alpha)g(i-2, j+1)$$

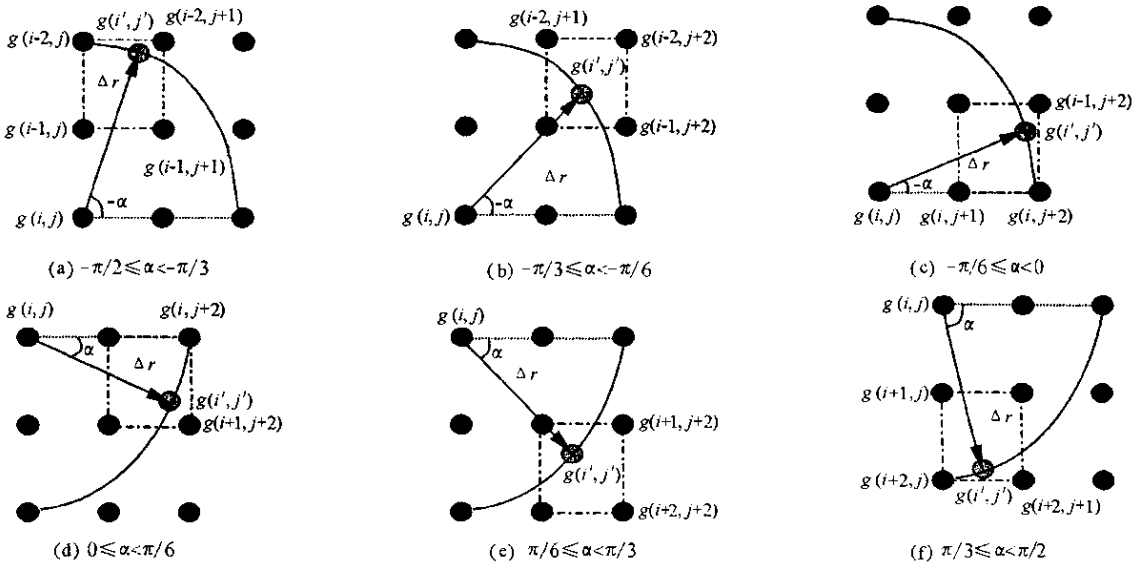


图1 3 × 3 方向微分乘子求法

Fig.1 Deduce the 3 × 3 direction derivation matrix

$$+ (2 + 2\sin\alpha - 4\cos\alpha - 4\sin\alpha\cos\alpha)g(i-1, j) + (4\cos\alpha + 4\sin\alpha\cos\alpha)g(i-1, j+1) \quad (3)$$

所以由公式(1)知：

$$D_\alpha = \begin{bmatrix} -1 - 2\sin\alpha + 2\cos\alpha + 4\sin\alpha\cos\alpha & -2\cos\alpha - 4\sin\alpha\cos\alpha & 0 \\ 2 + 2\sin\alpha - 4\cos\alpha - 4\sin\alpha\cos\alpha & 4\cos\alpha + 4\sin\alpha\cos\alpha & 0 \\ -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4a)$$

(2) 当 $-\frac{\pi}{3} \leq \alpha < -\frac{\pi}{6}$ 时 如图 1(b), $g(i', j')$ 在 $g(i-2, j+1)$, $g(i-1, j+1)$, $g(i-1, j+2)$, $g(i-2, j+2)$ 四点之间 其值由这四点用双线性插值方法获得 同理有：

$$D_\alpha = \begin{bmatrix} 0 & -2 - 4\sin\alpha + 2\cos\alpha + 4\sin\alpha\cos\alpha & 1 + 2\sin\alpha - 2\cos\alpha - 4\sin\alpha\cos\alpha \\ 0 & 4 + 4\sin\alpha - 4\cos\alpha - 4\sin\alpha\cos\alpha & -2 - 2\sin\alpha + 4\cos\alpha + 4\sin\alpha\cos\alpha \\ -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4b)$$

(3) 当 $-\frac{\pi}{6} \leq \alpha < 0$ 时 如图 1(c), $g(i', j')$ 在 $g(i-1, j+1)$, $g(i, j+1)$, $g(i, j+2)$, $g(i-1, j+2)$ 四点之间 其值由这四点用双线性插值方法获得 同理有：

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -4\sin\alpha + 4\sin\alpha\cos\alpha & 2\sin\alpha - 4\sin\alpha\cos\alpha \\ -1 & 2 + 4\sin\alpha - 2\cos\alpha - 4\sin\alpha\cos\alpha & -1 - 2\sin\alpha + 2\cos\alpha + 4\sin\alpha\cos\alpha \end{bmatrix} \quad (4c)$$

(4) 当 $0 \leq \alpha < \frac{\pi}{6}$ 时 如图 1(d), $g(i', j')$ 在 $g(i, j+1)$, $g(i+1, j+1)$, $g(i+1, j+2)$, $g(i, j+2)$ 四点之间 其值由这四点用双线性插值方法获得 同理有：

$$D_\alpha = \begin{bmatrix} -1 & 2 - 4\sin\alpha - 2\cos\alpha + 4\sin\alpha\cos\alpha & -1 + 2\sin\alpha + 2\cos\alpha - 4\sin\alpha\cos\alpha \\ 0 & 4\sin\alpha - 4\sin\alpha\cos\alpha & -2\sin\alpha + 4\sin\alpha\cos\alpha \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4d)$$

(5) 当 $\frac{\pi}{6} \leq \alpha < \frac{\pi}{3}$ 时 如图 1(e), $g(i', j')$ 在 $g(i+1, j+1)$, $g(i+2, j+1)$, $g(i+2, j+2)$, $g(i+1, j+2)$ 四点之间 其值由这四点用双线性插值方法获得 同理有：

$$D_{\alpha} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 4 - 4\sin\alpha - 4\cos\alpha + 4\sin\alpha\cos\alpha & -2 + 2\sin\alpha + 4\cos\alpha - 4\sin\alpha\cos\alpha \\ 0 & -2 + 4\sin\alpha + 2\cos\alpha - 4\sin\alpha\cos\alpha & 1 - 2\sin\alpha - 2\cos\alpha + 4\sin\alpha\cos\alpha \end{bmatrix} \quad (4e)$$

(6) 当 $\frac{\pi}{3} \leq \alpha < \frac{\pi}{2}$ 时,如图 1(f), $g(i', j')$ 在 $g(i+1, j)$, $g(i+2, j)$, $g(i+2, j+1)$, $g(i+1, j+1)$ 四点之间,其值由这四点用双线性插值方法获得,同理有:

$$D_{\alpha} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 2 - 2\sin\alpha - 4\cos\alpha + 4\sin\alpha\cos\alpha & 4\cos\alpha - 4\sin\alpha\cos\alpha & 0 \\ -1 + 2\sin\alpha + 2\cos\alpha - 4\sin\alpha\cos\alpha & -2\cos\alpha + 4\sin\alpha\cos\alpha & 0 \end{bmatrix} \quad (4f)$$

2 运动模糊方向的鉴别结果

利用公式(4)所描述的 3×3 的方向微分乘子 D_{α} ,以及公式(1),(2)对 30 多幅运动模糊图片进行方向鉴别,运动类型包括匀速直线运动、加速运动、振动,真实运动方向分布在 $-90^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 范围,鉴别结果表明,这种新的鉴别方法是有效可靠的,鉴别精度高,范围大,稳定性好。对于不同的模糊尺度(blur extent,即点扩散函数的长度),我们验算过小到 5 pixels,大至 60 pixels,同样能够很好地鉴别。一般模糊尺度越大,鉴别精度越高,对同样的模糊尺度,匀速直线运动的模糊程度比加速运动、振动高,方向鉴别精度也要高。基本上,只要原图是自然图像,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,只是鉴别误差可能大一些而已。但是极少数的图片,如人工合成(一般不符合一阶马尔科夫过程)或偏离“各向同性”前提条件太远的图片,其鉴别误差较大(一般是 $5^{\circ} \sim 9^{\circ}$)。

图 2 是一幅清晰的蓝天白云下盛开鲜花的草地图像 f_0 ,图 3 是其运动模糊图像 g ,模糊尺度为 10 pixels,真实的运动模糊方向为 40° 。图 4 是前述 3×3 的方向微分乘子 D_{α} 对运动模糊图像图 3 的鉴别曲线 $(\Delta g)_{\alpha} \sim \alpha$,计算中 α 值步长取 1° 。可以看出, α 值离真实运动模糊方向越近时,对应的 $(\Delta g)_{\alpha}$ 值越小。当 $(\Delta g)_{\alpha}$ 值最小时,对应的 α 值即为鉴别出的运动模糊方向。由图 4 可以看出,鉴别出的运动模糊方向为 41° ,误差 1° 。



图 2 原始清晰图像

图 3 运动模糊图像

Fig.2 The original image

Fig.3 The motion blur image

对于一系列图 3 在各个方向的匀速直线运动模糊图像(模糊尺度为 10 pixels)利用前述 3×3 的方向微分乘子 D_{α} 对其运动模糊方向进行鉴别,总的鉴别结果是令人满意的(如表 1),鉴别的均方误差为 2.1144° 。

表 1 用 3×3 方向微分乘子的运动模糊方向鉴别结果(单位 $(^{\circ})$)

Tab.1 Motion blur direction identification with the 3×3 direction derivation matrix(Unit $(^{\circ})$)

真实运动方向	-90	-80	-70	-60	-50	-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40	50	60	70	80
鉴别运动方向	-89	-80	-69	-57	-47	-41	-26	-21	-9	2	10	21	27	41	47	57	68	80
鉴别误差	1	0	1	3	3	-1	4	-1	1	2	0	1	-3	1	-3	-3	-2	0

运动为振动时,图像模糊程度比匀速直线运动时低,方向鉴别难度要高,鉴别精度因此降低,模糊尺度越大,图像模糊程度越高,鉴别精度越高。对于上图,模糊尺度为 10 pixels,运动为振动时,鉴别均方误差为 4.5439° ,模糊尺度为 20 pixels,运动为振动时,鉴别均方误差为 4.2201° 。

作为比较,表 2 给出了 Y. Yitzhaky 和 N.S. Kopeika 等所用 2×2 的方向微分乘子对图 3 在各个方向($0^{\circ} \leq \alpha \leq 45^{\circ}$)的匀速直线运动模糊图像(模糊尺度为 10 pixels)的运动方向鉴别结果。其鉴别均方误差为 5.4365° ,显然比 2.1144° 要大得多,鉴别结果也很不稳定,且鉴别误差总为负值,即鉴别结果总是向 0°

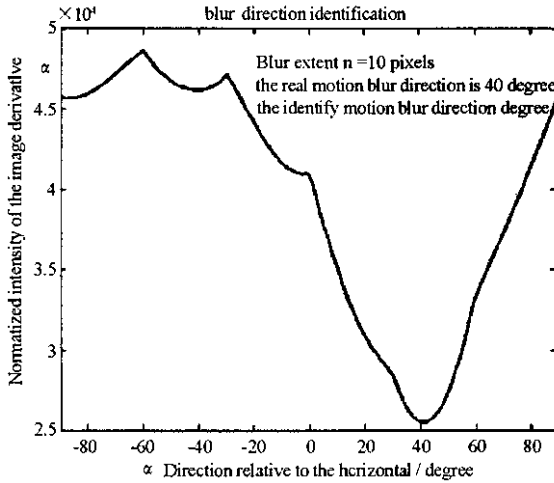


图 4 运动模糊方向鉴别曲线

Fig.4 Motion blur direction identification

方向靠近。

表 2 Y. Yitzhaky 等所用 2×2 的微分乘子的运动模糊方向鉴别结果(单位($^\circ$))

Tab.2 Motion blur direction identification with the 2×2 derivation matrix of Y. Yitzhaky (Unit ($^\circ$))

真实运动方向	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
鉴别运动方向	0	2	4	7	11	19	30	35	38	39
鉴别误差	0	-3	-6	-8	-9	-6	0	0	-2	-6

3 结论

本文利用方向微分的特点和双线性插值的方法 构造出了 3×3 方向微分乘子 D_α 利用它能够从运动模糊图像本身出发 自动鉴别出运动模糊的方向。通过对大量运动模糊图像的运动方向的鉴别计算表明 该 3×3 方向微分乘子鉴别精度高 稳定性好 鉴别范围大($-90^\circ \sim 90^\circ$ 即涵盖任意运动模糊方向)。

参考文献:

[1] Legendijk R , Tekalp A M , Biemond J. Maximun Likelihood Image and Blur Identification : A Unifying Approach[J]. Optical Engineering , 1990 29(5): 422 - 435.

[2] 陆俊 舒志龙 , 阮秋琦. 基于尺度旋转的图像恢复研究[J]. 通信学报, 2000 21(7): 67 - 71.

[3] Cannon M. Blind Deconvolution of Spatially Invariant Image Blurs with Phase[J]. IEEE Trans. Acoust. Speech Signal Process , 1976 , ASSP - 24(1): 58 - 63.

[4] 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.

[5] 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.

[6] Yitzhaky Y , Kopeika N S. Vibrated Image Restoration from a Single Frame[J]. 1999 , SPIE. 3808 : 603 - 613.

[7] Yitzhaky Y , Mor I , Lantzman A et al. Direct Method for Restoration of Motion-blurred Images[J]. J. Opt. Soc. Am. A , 1998 , 15(6): 1512 - 1519.

[8] 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.

[9] Stern A , Kopeika N S. General Restoration Filter for Vibrated-image Restoration[J]. Applied Optics , 1998 37(32): 7596 - 7603.

