

基于 Radon 变换的运动模糊方向估计的改进方法^①

胡 硕^{②*} 张旭光^{*} 吴 娜^{**}

(^{*} 燕山大学 工业计算机控制工程河北省重点实验室 秦皇岛 066004)

(^{**} 燕山大学 测试计量技术及仪器河北省重点实验室 秦皇岛 066004)

摘要 为了有效地进行运动模糊图像的复原处理,研究了模糊图像点扩散函数(PSF)的两个关键模糊参数——模糊方向(角度)和模糊尺度的估计,重点研究了运动模糊方向的精确估计。针对模糊图像频谱中十字亮线对方向估计的干扰问题,给出了基于 Radon 变换的运动模糊方向估计方法的改进方法。该方法根据频谱图像中心条纹尺度信息,自适应调节形态学腐蚀算子的执行次数,有效克服十字亮线对检测精度的干扰,最后利用 Radon 变换得到运动模糊方向的精确估计。试验结果验证了该方法的正确性和有效性。

关键词 运动模糊, 模糊图像, 点扩展函数(PSF), Radon 变换, 形态学滤波

0 引言

运动模糊是指在成像过程中,采集设备与目标之间产生相对运动而导致的图像模糊^[1],是一种常见的图像降质现象。在实际应用中,目标识别系统要获得符合应用要求的高品质图像,对运动模糊图像进行复原处理是首先要解决的问题。通常,变速、非直线运动在一定条件下可被视为或分解为分段匀速直线运动,所以由匀速直线运动所造成的模糊更具有一般性和代表性。经典的图像复原方法都是以图像退化的点扩散函数(point spread function, PSF)为基础,其中的关键问题是对于 PSF 模糊参数的估计。匀速直线运动模糊图像的点扩展函数有两项重要模糊参数,即模糊方向和模糊尺度。本文重点研究运动模糊方向的精确估计。已有研究提出了多种方法来估计模糊参数^[2-6], Yitzhaky 等^[2]提出利用 2×2 方向微分算子的方法估计运动模糊方向,该方法估算结果的误差比较大,并且只能对运动模糊方向在 $0 \sim 45^\circ$ 范围内进行估计。陈前荣等^[3]提出了

一种改进算法,采用 3×3 方向微分算子结合双线性插值相来估计运动模糊方向,提高了精度,缺点是计算量较大。Lokhande 等^[4]通过 Hough 变换对退化图像的频谱暗条纹的方向进行检测来确定运动模糊方向,但当存在噪声以及发生 Hough 变换空间峰值簇拥的情况时,检测精度会降低。Moghaddam^[5,6]提出利用 Radon 变换对运动模糊频谱图像的明暗条纹的方向进行检测,从而检测出运动模糊方向,取得了不错的效果。在实际应用中,运动模糊频谱图像中往往存在着明显的十字亮线,严重影响基于直线检测方法的识别精度。本文针对运动模糊方向估计中存在的实际问题,提出了一种自适应形态学滤波的 Radon 变换运动方向估计方法,试验结果已验证了本文方法的有效性及实用性。

1 运动模糊图像频谱特性

对于线性位移不变运动模糊,图像退化一般可表示为

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

^① 国家自然科学基金(61271409, 61005034)和河北省自然科学基金(F2012203182)资助项目。

^② 男,1976 年生,博士,讲师;研究方向:模式识别与图像处理;联系人,E-mail: hus@ysu.edu.cn
(收稿日期:2015-06-23)

其中, $g(x, y)$ 是退化图像, $f(x, y)$ 是原始图像, $h(x, y)$ 为所谓的点扩散函数(PSF), $n(x, y)$ 是噪声。

一般来说, 对于极短时间内的运动通常简化为匀速直线运动。此时, 运动模糊的 PSF 可表示为

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

由式(2)可知, PSF 主要包括两个重要参数, 即模糊方向(角度)和模糊尺度。如果模糊方向已知, 则可以通过图像旋转, 将运动模糊方向旋转到水平方向, 二维 PSF 的识别问题就可以转化成一维 PSF 的识别, 从而降低了运动模糊图像恢复的难度。由式(2)可得, 水平方向匀速直线运动模糊的 PSF 为

$$h(x, y) = \begin{cases} 1/l, & |x| \leq l, y = 0 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

将式(3)代入式(1), 并做傅立叶变换可得

$$\begin{aligned} G(u, v) &= F(u, v) \cdot H(u, v) \\ &= F(u, v) \cdot \iint h(x, y) e^{-j2\pi(ux+vy)} dx dy \\ &= F(u, v) \cdot \int_0^l \frac{1}{L} e^{-j2\pi ux} dx \\ &= F(u, v) \cdot \frac{\sin(\pi uL)}{\pi uL} e^{-j\pi uL} \end{aligned} \quad (4)$$

由式(4)可知, $G(u, v)$ 的频谱为垂直方向的平行条带。由于 $\sin(\pi ul)$ 函数零点的存在, 可推知 $G(u, v)$ 的频谱有一系列的平行暗条纹, 这些暗条纹的位置与 $\sin(\pi ul)$ 函数的零点对应。

图 1 显示的是一幅沿 60° 方向运动模糊图像 Lena 及其频谱图像。由图 1 可以很清晰地看到特定方向的平行暗条纹, 而且, 在频谱图像中心条纹两侧, 暗条纹的长度和宽度都呈递减趋势。如果运动模糊图像是其他方向的运动模糊, 则相应的暗条纹将出现在与运动方向垂直的方向上。所以, 只要在运动模糊频谱图像中检测出这些暗条纹的方向, 就可得到运动模糊的方向。

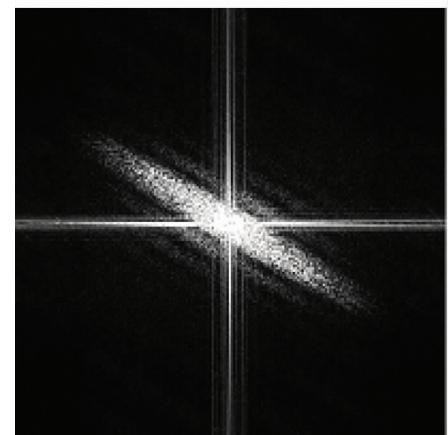
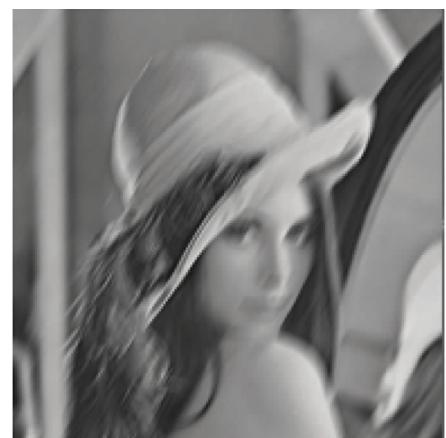


图 1 60° 模糊的 Lena 图像及其对应频谱图

2 基于 Radon 变换的运动模糊方向估计

2.1 Radon 变换

Radon 变换可在任意维空间定义, 对于一个 n 维空间的函数 $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$, 其 Radon 变换定义为在 $n-1$ 维超平面上的积分值。对于给定二维函数 $f(x, y)$, Radon 变换计算其在某一指定方向上的投影, 即为它在确定方向的线积分。对二维函数 $f(x, y)$ 的 Radon 变换, 其表达式可定义如下:

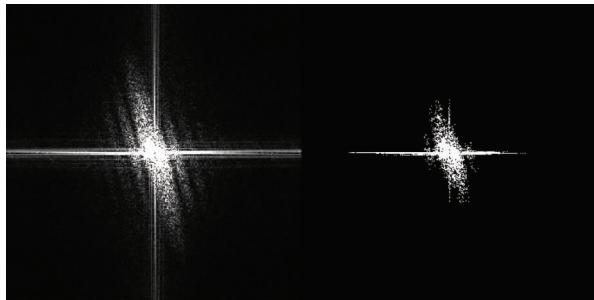
$$R(\rho, \theta) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) \delta(\rho - x \cos\theta - y \sin\theta) dx dy \quad (5)$$

其中, δ 表示脉冲 delta 函数, θ 为旋转角度, 对于某直线 l , ρ 为原点到直线 l 的距离, 则直线 l 的方程为 $\rho = x \cos\theta + y \sin\theta$ 。

式(5)表示 $f(x, y)$ 在直线 l 上的投影, 即沿该直线的线积分。

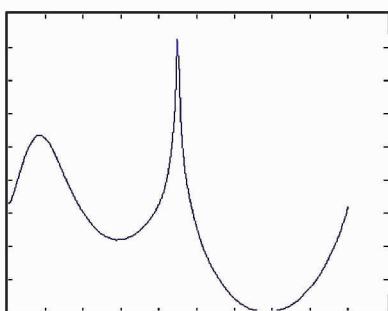
对一幅带有线的二维图像, Radon 变换将其转换到可能的线参数域中, 对应图像中的每一条线, 与线参数相对应的位置会出现一个峰值。而在模糊图像幅度谱中, 以原点为中心会出现对称的平行线条。这些线条几乎是沿着相同的一个角度(即图像运动角度), 对应于 Radon 域中, 相应的角度上会出现峰值, 因此可以检测出运动角度。

对模糊运动图像进行方向估计时, 可以对频谱图做 $0^\circ \sim 180^\circ$ 的 Radon 变换, 取每个角度上 Radon 变换的极大值。由极大值拟合形成的曲线称极值曲线, 极值曲线上最大值对应的角度即为所求的运动方向。图 2(c) 为频谱图像经过 Radon 变换后形成的极大值曲线。



(a) 频谱图

(b) 二值化后频谱图



(c) 极值曲线

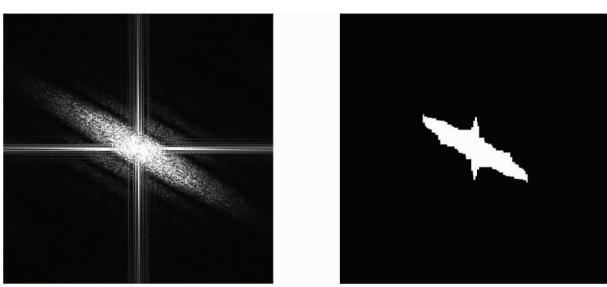
图 2 十字亮线的影响

图 2(a) 为运动模糊图像经过傅里叶变换后的频谱图像, 由图 2(a) 可知, 频谱图像中, 不仅包含亮暗条纹, 而且还存在一个贯穿整幅图像的十字亮线。图 2(b) 为二值化后的频谱图像, 由图 2(b) 可知, 二值化后频谱图像仍然存在一条明显的水平亮条纹, 比所需亮条纹略窄, 但亮度更高。此时, 对图 2(b) 所示频谱图像做 Radon 变换并计算各个角度的 Radon 变换的极值, 经过拟合得到图 2(c) 所示的极值曲线。由图 2(c) 可知, 极值曲线上存在两个极值, 分别位于图中左侧和中间位置。同时, 中间极值幅值明显大于左边极值幅值, 左边的极值为真实角度的反映, 中间极值为十字亮线带来的干扰。试验表明, 对于实际拍摄的运动模糊图像, 经过傅立叶变换后的频谱图像中往往存在一定程度的十字亮线^[7], 这对正确估计运动方向带来了困难。

2.2 自适应形态学滤波的 Radon 变换模糊运动方向估计

为了解决频谱图像中十字亮线带来的干扰, 本研究采用的方法是对二值频谱图像进行形态学滤波, 具体操作是对二值频谱图像进行一次闭运算操作, 试验结果如图 3 所示。

图 3(a) 为 Lena512 运动模糊图像的频谱图像, 其中模糊尺度为 15, 模糊角度为 60° , 图 3(b) 为形态学滤波后的结果图像。由图 3(b) 可知, 经过形态学滤波后, 十字亮线得到有效抑制, 虽然频谱图像中一些条纹被滤掉, 但中心主瓣条纹得到增强, 可以为 Radon 变换提供足够信息。图 3(c) 为 Radon 变换后的极值曲线。通过寻找极大值点可以得到曲线的最大值对应的角度为 61° , 与实际模糊运动方向相符。



(a) 频谱图像

(b) 形态学滤波

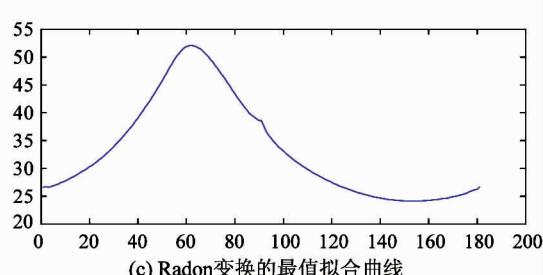


图 3 引入形态学滤波后的试验结果

为了验证算法有效性,本文进行了一组试验,试验图片为 lena, couple, bridge, baboon 四幅标准图像,尺寸均为 512×512 。试验中,模糊尺度 L 分别为 10, 15, 20, 30, 模糊角度从水平正向开始每隔 15° 取一个值,同时取 Radon 变换中 θ 的步长为 1° 。试验

结果如图 4~图 7 所示。

从图 4~图 7 可知,算法整体上是有效的,克服了十字亮线对检测精度的干扰。但是本研究也发现当模糊尺度较小时,误差相对较大。这是由于模糊尺度较小时,模糊频谱图像中心主瓣变得很宽,经过

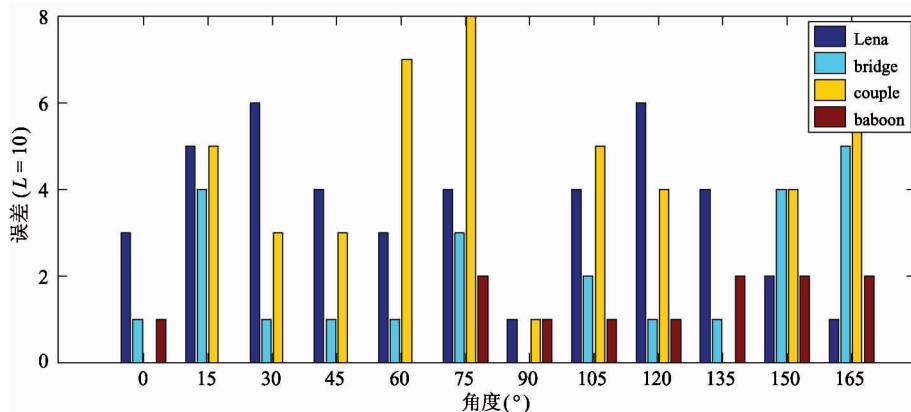


图 4 模糊尺度为 10 时的误差图

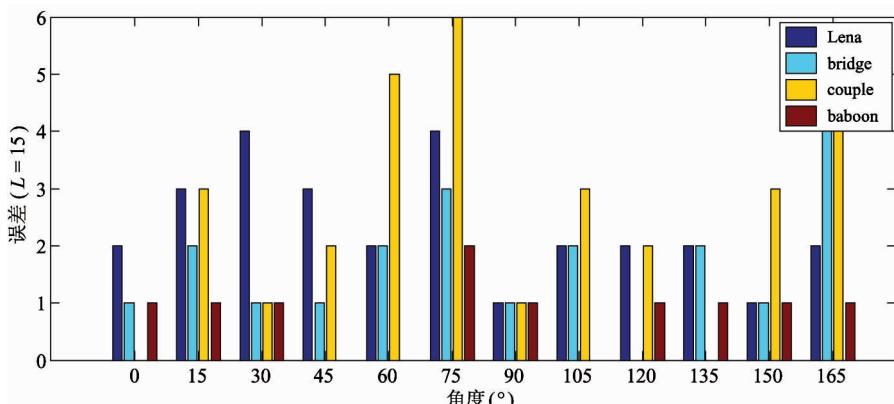


图 5 模糊尺度为 15 时的误差图

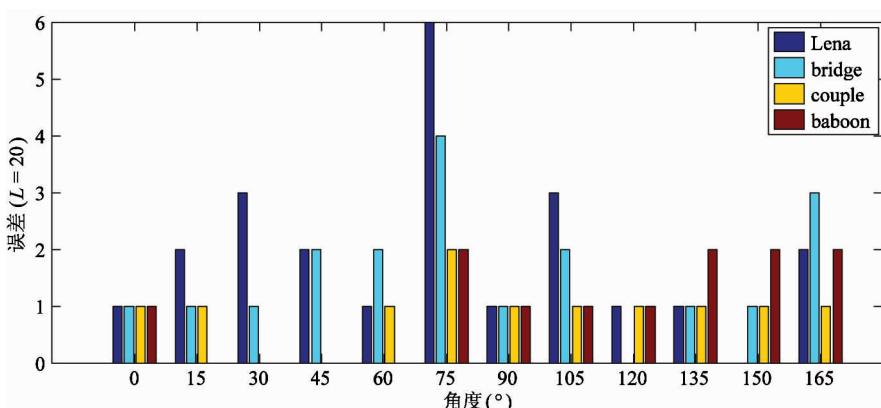


图 6 模糊尺度为 20 时的误差图

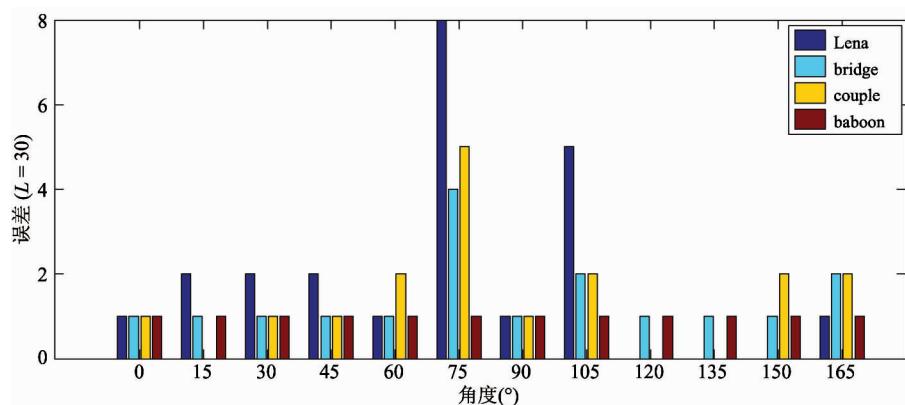
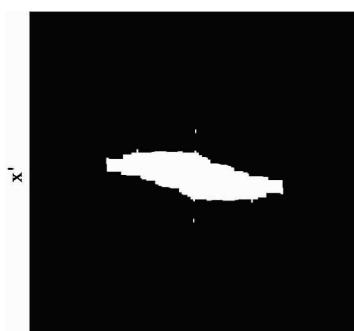
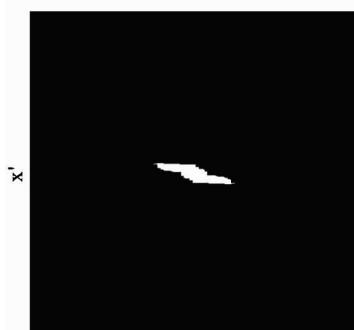


图 7 模糊尺度为 30 时的误差图

形态学滤波后结果图像如图 8(a)所示。由图 8(a)可知, 经过滤波后主瓣宽度仍然较大, 且整体呈菱形, 影响了检测精度。可以进行多次腐蚀操作来解决上述问题, 多次腐蚀后结果图像如图 8(b)所示, 试验证明检测误差在 ± 2 以内。由于模糊尺度的不同, 运动模糊频谱图像的中心主瓣宽度差异很大, 所以不能采用统一的腐蚀次数对频谱图像进行滤波, 本文提出一种自适应的形态学滤波算法解决上述问题。



(a) 形态学滤波后结果图像



(b) 多次腐蚀后结果图像

图 8 尺度 $L=10$ 时结果图像

在进行腐蚀操作时, 本研究检测中心主瓣的宽度和高度, 如图 9 所示, 设高度为 H , 宽度为 W , $\min(H, W)$ 为 H 和 W 中的最小值。最终本文算法的步骤如下:

- (1) 对模糊图像进行傅立叶变换生成频谱图像;
- (2) 对频谱图像进行二值化处理得到二值频谱图像;
- (3) 对二值图像进行一次形态学闭运算;
- (4) 检测中心主瓣的宽度 W 和高度 H ;
- (5) 如果 $\min(H, W)$ 大于设定阈值 T_e , 则进行一次腐蚀操作, 转入步骤(4), 否则转入步骤(6);
- (6) 进行 Radon 变换, 生成极值曲线, 同时进行模糊运动方向估计。

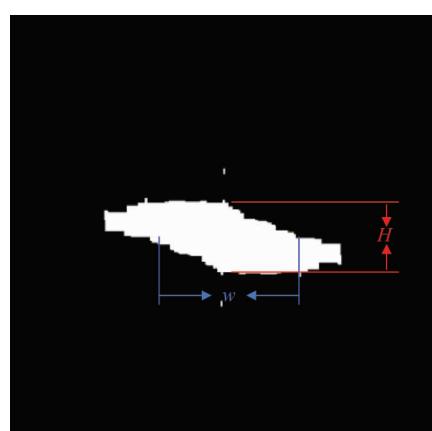


图 9 中心主瓣宽度和高度

3 试验结果与分析

为了验证改进后的算法, 试验图像仍然采用 4 幅标准图像 lena, couple, baboon, bridge, 尺寸均为

512×512 。试验中, 模糊尺度 L 分别为 10, 15, 20, 30, 模糊角度从水平正向开始每隔 15° 取一个值。阈值 T_e 取宽度的十分之一。试验结果如表 1 ~ 表 4 所示。

表 1 模糊尺度 $L = 10$ 的检测结果

角度($^\circ$)	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165
Bridge	1	16	31	46	61	79	91	103	121	136	151	167
Lena	1	17	32	47	61	73	91	100	120	135	150	166
Baboon	1	16	31	46	61	76	91	106	121	136	151	166
Couple	1	15	31	46	62	80	91	103	120	135	152	167

表 2 模糊尺度 $L = 15$ 的检测结果

角度($^\circ$)	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165
Bridge	1	13	31	46	62	78	91	103	120	137	151	170
Lena	2	18	34	48	62	79	91	103	118	133	149	167
Baboon	1	16	31	45	60	77	91	105	121	136	151	166
Couple	0	12	29	47	65	81	91	102	118	135	153	170

表 3 模糊尺度 $L = 20$ 的检测结果

角度($^\circ$)	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165
Bridge	1	12	29	46	62	77	90	105	121	137	153	168
Lena	3	20	36	48	62	77	92	104	120	136	149	166
Baboon	1	15	30	44	60	76	91	107	122	136	152	167
Couple	1	11	30	44	64	79	92	103	119	138	153	172

表 4 模糊尺度 $L = 30$ 的检测结果

角度($^\circ$)	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165
Bridge	1	14	30	46	60	77	91	105	120	136	152	169
Lena	3	15	33	47	61	77	91	104	120	135	150	167
Baboon	1	16	30	45	61	77	91	106	121	136	151	166
Couple	0	13	27	47	62	78	91	104	119	135	152	169

从试验结果可知: 采用自适应形态学滤波后, 相对于改进前的方法(试验结果如图 4 ~ 图 7 所示), 检测精度上有所提高。在模糊尺度较小的情况下精度提高较大, 以标准图像 bridge 的检测结果为例, 当模糊尺度在 $L = 10$ 时, 如图 4 所示, 改进前的误差均值为 2.00, 最大检测误差值出现在 $\theta = 165^\circ$ 时, 误差值为 5。改进后结果如表 1 所示, 改进后的误差均值为 1.42, 最大检测误差值出现在 $\theta = 75^\circ$ 时, 误差

值为 4。在模糊尺度增大时, 改进后相比改进前检测精度提高较小。以标准图像 bridge 的检测结果为例, 当模糊尺度在 $L = 30$ 时, 如图 7 所示, 改进前的误差均值为 1.42, 最大检测误差值出现在 $\theta = 75^\circ$ 时, 误差值为 4。如表 4 所示, 改进后的误差均值为 1.08, 最大检测误差值出现在 $\theta = 165^\circ$ 时, 误差值为 4。

4 结 论

运动模糊图像参数的估计在图像恢复中具有重要作用,基于 Radon 变换的运动模糊参数估计算法具有原理简单,计算方便的特点。针对运动模糊参数估计的实际问题,本文提出一种自适应形态学滤波的 Radon 变换的运动模糊方向估计算法。试验结果表明,形态学滤波的引入可以有效抑制十字亮线对计算精度的干扰,同时也增强了频谱图像中的有效信号,对腐蚀操作的自适应策略也克服了传统算法中在模糊尺度较小时误差较大的问题。试验数据证明了本文算法的有效性。

试验发现,减小算法中 Radon 变换中 θ 的步长,可以提高算法的精度,同时也增加了算法的计算量,降低了实时性。对一幅 512×512 的图像而言,会增加 6 倍左右的计算开销,因此,在以后的工作中,精度和实时性的平衡也是必需考虑的关键问题。

参考文献

- [1] 梁宛玉,孙权森,夏德深. 利用频谱特性鉴别运动模糊方向. 中国图象图形学报,2011,16(7):1164-1169
- [2] Yitzhaky Y , Kopeika N S. Identification of blur parameters from motion blurred images. *Graphical Models and Image Processing*, 1997, 59 (5) : 310 -320
- [3] 陈前荣,陆启生,成礼智. 基于方向微分的运动模糊方向鉴别. 中国图象图形学报, 2005,10(5):58-63
- [4] Lokhande R, Arya K V, Gupta P. Identification of parameters and restoration of motion blurred images. In: Proceedings of the 2006 ACM Symposium on Applied Computing, Dijon, France, 2006. 301-305
- [5] Moghaddam E M, Jamzad M, Mahini H R. Motion blur identification in noisy images using feed-forward back propagation neural network. *LNCS*,2006,4153: 369-376
- [6] Moghaddam M E, Jamzad M. Motion blur identification in noisy images using mathematical models and statistical measures. *Pattern Recognition*, 2007, 40:1946-1957
- [7] 乐翔,程建,李民. 一种改进的基于 Radon 变换的运动模糊图像参数估计方法. 红外与激光工程,2011,40(5): 963-969

Improved identification of the motion blur direction based on Radon transform

Hu Shuo*, Zhang Xuguang*, Wu Na**

(* Key Lab of Industrial Computer Control Engineering of Hebei Province, Yanshan University, Qinhuangdao 066004)

(** Key Lab of Measurement Technology & Instrumentation of Hebei Province,
Yanshan University, Qinhuangdao 066004)

Abstract

To effectively realize the restoration of motion-blurred images, the study focused attention on the estimation of two key parameters of blurred images' point spread function (PSF), the motion blur direction (angle) and the blur extent, especially on the accurate identification of the motion blur direction. To eliminate the disturbance from the dominant cross-shaped bright lines showing up in the Fourier spectrum of the real blurred images, the identification of the motion blur direction based on Radon transform was improved. The improved method performs an adaptive erode strategy on binary Fourier spectrum images according to the scale of central stripe to eliminate the detection interference surfer from the cross-shaped bright lines. And the Radon transform is performed to estimate the motion blur direction accurately. The correctness and effectiveness of the proposed method were verified by the experiment.

Key words: motion blur, blurred image, point spread function (PSF), Radon transform, morphology filter