

基于频谱边缘检测的运动模糊方向精确估计

郭红伟*

(红河学院 工学院, 云南 蒙自 661100)
(* 通信作者电子邮箱 ghw202@tom.com)

摘要: 针对运动模糊图像的模糊方向估计问题, 详细分析了匀速直线运动模糊图像的退化模型, 提出一种在频域精确估计运动模糊方向的方法。首先, 计算退化图像的频谱, 用高斯-拉普拉斯(LoG)边缘检测算子检测出频谱中的暗条纹轮廓; 然后, 用 Radon 变换找出垂直于暗条纹的角度; 最后, 根据图像长宽比确定频谱暗条纹和模糊方向之间的关系, 计算出模糊方向。仿真结果表明, 对模糊尺度从 7 到 30 像素的退化图像的模糊方向估计误差不超过 1°, 估计结果非常精确。

关键词: 图像复原; 运动模糊; 点扩散函数; 边缘检测; Radon 变换

中图分类号: TP391.41 **文献标志码:** A

Accurate estimation of blurred motion direction based on edge detection of spectrum

GUO Hong-wei*

(Engineering College, Honghe University, Mengzi Yunnan 661100, China)

Abstract: With regard to the problem of estimating the blurred direction of motion-blurred image, the degradation model of blurred image in uniform linear motion was analyzed in detail, and a method which can estimate blurred motion direction accurately in frequency domain was proposed. Firstly, the spectrum of degraded images was calculated, Laplacian of Gaussian (LoG) edge detection operator was used to detect the contour of dark stripes in spectrum, then the Radon transform was employed to find the perpendicular angle to the dark stripes; finally, according to the aspect ratio of the image to determine the relationship between the spectrum dark stripes and blur direction, the blur direction was calculated. The simulation results show that estimated results are very accurate and the estimation error of blurred direction is no more than one degree when the blur scale of degraded image varies from 7 to 30 pixels.

Key words: image restoration; motion blur; point spread function; edge detection; Radon transform

0 引言

当用相机拍摄快速运动的物体, 或在拍照瞬间相机发生抖动, 都会使获取的照片出现模糊。这种由于相机和被拍摄对象之间的相对运动造成图像模糊的现象就是运动模糊, 其成因是相机与景物的相对快速运动导致同一时刻不同景物点在电荷耦合器件(Charge-Coupled Device, CCD)的同一点同时曝光。经典图像复原技术都是以图像退化的某种先验知识比如点扩散函数(Point Spread Function, PSF)已知为基础的。但是在许多实际情况下, 点扩散函数难以确定, 必须要从观察到的模糊图像中来抽取退化信息, 进而估计点扩散函数。因此针对运动模糊图像的复原, 点扩散函数的两个重要参数: 模糊方向和模糊尺度的准确鉴别意义非凡。在假定模糊方向已知的情况下可以通过图像旋转将模糊方向旋转到水平轴方向(一般以图像中心为旋转轴), 进而使二维问题简化为一维问题。目前, 很多文献[1-4]中的研究方法都是基于运动模糊方向为已知情况的。由此可见, 运动模糊方向的精确估计具有重要意义。

目前, 针对运动模糊方向的鉴别主要有空域法、倒谱法和频域法等。文献[5-6]对模糊图像进行方向性的高通滤波(方向微分), 由微分图像灰度值(绝对值)之和最小的方向确定模糊方向, 鉴别误差比较大; 文献[7-8]利用运动模糊图像的倒谱在模糊方向上存在反映原始图像特性的高幅值成分

和反映模糊系统特性的低幅值成分鉴别 PSF 参数; 文献[9-10]默认图像频谱暗条纹方向与运动模糊的方向相垂直, 这种现象仅适用于图像长、宽相等的情况; 文献[11]分析了图像长、宽不等时, 运动模糊图像频谱暗条纹分布的规律, 适用于不同尺寸比率退化图像的参数估计。但这些算法对小尺度运动模糊图像的方向估计误差较大。本文经过分析推导, 得出图像长宽比与暗条纹和模糊方向之间的关系。利用高斯-拉普拉斯(Laplacian of Gaussian, LoG)边缘检测算子突出频谱中暗条纹轮廓, 以提高方向的估算精度。实验数据表明, 新算法适用于不同尺寸比率的模糊图像方向估计, 而且对于小尺度运动模糊图像的方向估计也较为准确。

1 理论分析

1.1 运动模糊的退化模型

图像的退化过程如图 1 所示。

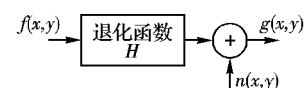


图 1 图像退化模型的一般形式

如果系统 H 是一个线性、位置不变性的过程, 那么在空间中退化图像可表示为:

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

其中: “*” 表示空间卷积, $h(x,y)$ 是退化系统的点扩散函数

(Point Spread Function, PSF), $f(x,y)$ 是原始图像, $n(x,y)$ 是加性噪声, $g(x,y)$ 是退化模糊图像。对式(1)做傅里叶变换得到图像退化过程的频域描述为:

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

其中: $G(u,v)$ 、 $H(u,v)$ 、 $F(u,v)$ 、 $N(u,v)$ 分别是退化图像、PSF、原始图像、加性噪声的傅里叶变换。若不考虑噪声的影响,则退化过程表示为:

$$G(u,v) = H(u,v)F(u,v) \quad (3)$$

若退化过程为匀速直线运动,令 $x_0(t)$ 和 $y_0(t)$ 分别为 t 时间内在 x 和 y 方向上运动的变化分量, T 表示曝光时间。在不考虑噪声影响的情况下,运动模糊退化图像为:

$$g(x,y) = \int_0^T f(x - x_0(t), y - y_0(t)) dt \quad (4)$$

对式(4)进行傅里叶变换,由时移特性得:

$$G(u,v) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} g(x,y) \exp(-j2\pi(ux + vy)) dx dy = F(u,v) \int_0^T \exp(-j2\pi(ux_0(t) + vy_0(t))) dt \quad (5)$$

由式(5)可得匀速直线运动模糊点扩散函数的傅里叶变换为:

$$H(u,v) = \int_0^T \exp(-j2\pi(ux_0(t) + vy_0(t))) dt \quad (6)$$

设 a 、 b 是在曝光时间 T 内图像分别在 x 、 y 方向上所移动的距离,则 $x_0(t) = (at/T)$, $y_0(t) = (bt/T)$,代入式(6)求解得:

$$H(u,v) = \frac{T \sin(\pi(ua + vb))}{\pi(ua + vb)} \exp(-j\pi(ua + vb)) \quad (7)$$

设图像尺寸为 $M \times N$,对式(7)进行离散化得:

$$H(u,v) = \frac{T \sin(\pi(\frac{ua}{N} + \frac{vb}{M}))}{\pi(\frac{ua}{N} + \frac{vb}{M})} \exp(-j\pi(\frac{ua}{N} + \frac{vb}{M})) \quad (8)$$

$\text{sinc}(x)/x$ 称作辛格函数,用 $\text{sinc}(x)$ 表示,是偶函数。在 x 为0时函数取得最大值1, x 为 $n\pi$ (n 是不为0的整数) 时函数值为0。因此, $(\frac{ua}{N} + \frac{vb}{M})$ 为0时 $H(u,v)$ 取最大值 T , $(\frac{ua}{N} + \frac{vb}{M})$ 为非0的整数时 $H(u,v)$ 等于0。由以上分析和式(3)可知,在运动模糊退化图像的频谱图中平行于亮条纹两边将出现等间距的暗条纹。而且条纹倾斜角度 φ 即为直线 $(\frac{ua}{N} + \frac{vb}{M}) = 0$ 斜率所对应角度,可用公式表示为:

$$\tan(\varphi) = -\frac{a}{b} \cdot \frac{M}{N} \quad (9)$$

设 θ 为运动模糊方向与 x 轴正向的夹角,则 $\tan(\theta) = b/a$,联立式(9),得:

$$\tan(\theta) = \tan(\varphi - \frac{\pi}{2}) \frac{M}{N} \quad (10)$$

由式(10)可得,仅当 $M = N$ 时,条纹角度与模糊角度是垂直的。当模糊图像的长和宽不相等时(大部分的待处理图像都是长宽不等的),简单认为模糊方向和暗条纹垂直是不准确的。对任意尺寸的运动模糊图像,检测出频谱条纹角度后,可根据式(10)计算运动模糊角度。图2是两幅长宽相等和长宽不等的运动模糊图像和其频谱图,其中两幅图的模糊方向都是 45° ,模糊尺度是20像素。

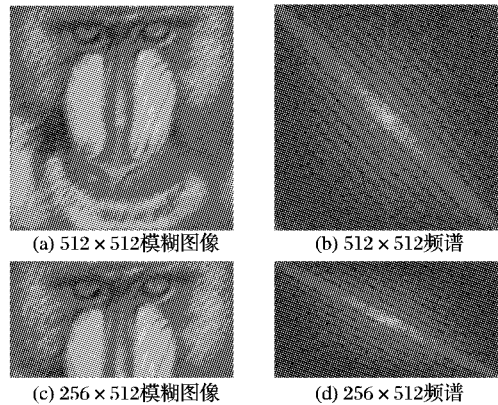


图2 运动模糊图像和其频谱图

1.2 边缘检测

边缘是图像局部特性不连续性的反映,这种不连续性包括灰度突变、颜色变化、纹理结构突变等。在一幅图像中,边缘有方向和幅度两个特征,一般沿边缘走向的灰度变化比较平缓,而垂直于边缘方向走向的灰度变化剧烈,这种变化可能是阶跃形,也可能是斜坡形。边缘检测的实质就是将目标与背景之间在灰度或者纹理特征上突变边界线提取出来。运动模糊图像频谱中的暗条纹在模糊尺度较小及噪声干扰时将变得非常不易识别,使运动模糊方向估计变得困难。对频谱图进行边缘检测突出条纹轮廓,将有利于运动模糊方向估计。

常用的边缘检测算子^[12]有 Sobel 算子、Prewitt 算子、Roberts 算子、Laplacian of Gaussian (LoG) 算子、Zero crossings 算子、Canny 算子等。在 Matlab 中可以调用函数“edge”对图像做边缘检测。图3是用上面6种算子对图2(b)进行边缘检测的结果,6种算子均检测出暗条纹的轮廓。

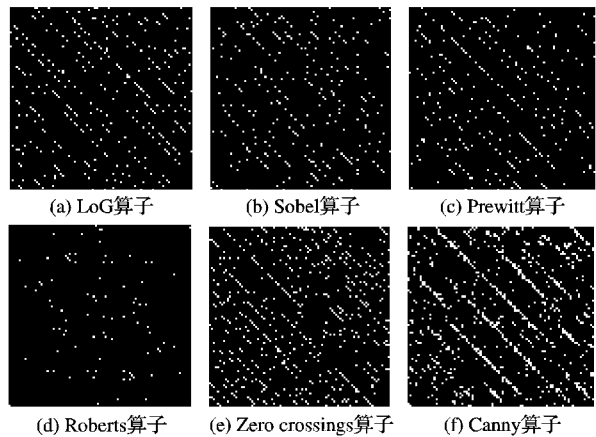


图3 边缘检测结果

1.3 Radon 变换

二维空间中函数 $f(x,y)$ 的 Radon 变换定义为:

$$R(\beta,\rho) = \iint_S f(x,y) \delta(\rho - x \cos(\beta) - y \sin(\beta)) dx dy \quad (11)$$

其中: S 是被积函数所在区域, β 是旋转角度, ρ 是原点到一直线的距离, δ 是冲激函数。式(11)表示 $f(x,y)$ 在一条直线上的投影,即沿该直线的线积分。这条直线斜率为 $\tan(\beta + \frac{\pi}{2})$,截距为 $(\rho/\sin(\beta))$ 。图4所示给出了 Radon 变换的示意。对于一幅图像,当 β 一定, ρ 取遍所有值时,就得到其在 β 方向上的投影;再改变 β 值,就可以得到图像在不同方向上的投影。

Radon 变换与 Hough 变换一样,都可以将图像平面上的

线转换成参数平面上的点。Radon 变换可以理解为图像在 $\rho\beta$ 平面上的投影, $\rho\beta$ 平面上的每一点都对应着 XY 平面上的的一条线。因此, 图像中一条高灰度值的线就会在 $\rho\beta$ 平面上形成一个亮点; 低灰度值的线则会形成一个暗点。图像平面直线的检测就转化为在参数平面对亮、暗点的检测。对图像做 $1 \sim 180^\circ$ 的 Radon 变换, 结果可用一矩阵 R 表示。该矩阵有 180 列, 每一列向量是图像在一个角度上沿一簇直线积分的投影值。由模糊图像频谱特征可知, 当在运动方向上做 Radon 变换时, 由于积分直线束与频谱中的亮暗条纹平行, 所得投影向量中应有一个最大值, 此值所对应的列数就是模糊方向与横轴正向的夹角。

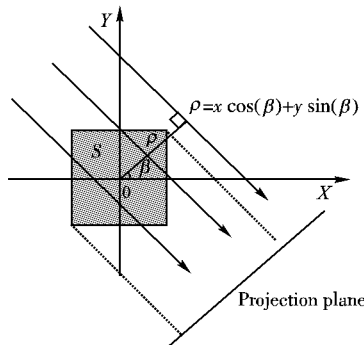


图 4 Radon 变换示意图

图 5 所示为对图 2(b) 和图 3(a) 做 $1 \sim 180^\circ$ 的 Radon 变换, 取每个角度上 Radon 变换的极大值形成的曲线。两图的极大值对应角度均是 45° , 但从图中看出, 对频谱进行边缘检测后做 Radon 变换要比直接对频谱做 Radon 变换更突出极大值点。这种优势在模糊尺度较小时, 将能保证角度判断的准确性。

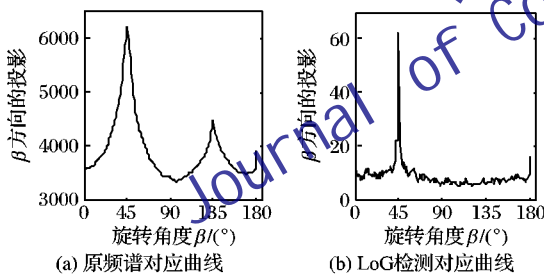


图 5 Radon 变换极大值曲线

2 算法实现

根据以上的理论分析, 提出估计运动模糊方向与横轴正向夹角 θ 的算法过程如下:

- 1) 计算退化图像频谱 $G(u, v)$, 并且移位使 $u = 0, v = 0$ 位于中心位置, 为压缩频谱的灰度值范围, 取对数形式 $\ln(1 + |G(u, v)|)$ 。
- 2) 使用 LoG 边缘检测算子对 1) 中结果进行边缘检测得二值化频谱。
- 3) 对二值化频谱做 $1 \sim 180^\circ$ 的 Radon 变换, 找出变换极大值对应的角度 β , 该角度为频谱暗条纹垂直方向与横轴正向夹角, 即 $\beta = \varphi - (\pi/2)$ 。
- 4) 根据图像长宽比由式(10) 计算模糊角度 θ 。

使用 LoG 边缘检测算子时, 应根据频谱灰度分部情况选择适当的阈值。阈值太大, 不能检测出暗条纹轮廓; 阈值太小, 又会使检测结果出现太多不需要的轮廓, 不能突出暗条纹。实验中可根据检测效果多次调整阈值, 以使检测结果能最佳地突出暗条纹轮廓。如图 3(a) 的检测结果其阈值为

0.08。另外, 在边缘检测结果的四周靠近边界处会出现水平和垂直的伪轮廓, 导致 Radon 变换在 90° 和 180° 处出现峰值, 从而影响 β 的估计。所以, 对第二步边缘检测得到的二值化频谱设置其四周靠近边界 10 像素以内的值为零, 以消除伪轮廓。

3 实验与结果分析

实验图像选用图 2(a)、(c) 所示的 512×512 和剪裁为 256×512 的 Baboon 模糊图像。模糊尺度分别为 7, 10, 20, 30, 运动模糊角度 θ 范围为 $[1^\circ, 180^\circ]$ 。表 1~2 为文献[9]算法、文献[11]算法和本文算法对不同模糊尺度下的不同模糊角度的估计结果。实验中, 文献[11]算法对频谱二值化的阈值取频谱最大值与最小值的平均值的 0.8 倍; 本文算法的 LoG 边缘检测算子的阈值取 0.08。

表 1 512×512 的 Baboon 图像模糊角估计结果

模糊尺度/ 像素	模糊角/ ($^\circ$)	估计值/误差绝对值		
		文献[9]算法	文献[11]算法	本文算法
7	1	0/1	8/7	1/0
	15	45/30	21/6	15/0
	60	45/15	59/1	60/0
	150	135/15	148/2	150/0
20	1	0/1	7/6	1/0
	15	14/1	17/2	16/1
	60	57/3	59/1	60/0
	150	146/4	150/0	150/0
30	1	0/1	2/1	1/0
	15	16/1	17/2	15/0
	60	58/2	59/1	60/0
	150	149/1	150/0	150/0

表 2 256×512 的 Baboon 图像模糊角估计结果

模糊尺度/ 像素	模糊角/ ($^\circ$)	估计值/误差绝对值		
		文献[9]算法	文献[11]算法	本文算法
7	1	116/115	14.3/13.3	0.5/0.5
	15	64/49	10/5	14.9/0.1
	60	74/14	60.2/0.2	60.2/0.2
	150	117/17	143.5/6.5	150.9/0.9
10	1	116/115	8.2/7.2	0.5/0.5
	15	46/31	19.3/4.3	16.1/1.1
	60	74/14	60.2/0.2	60.2/0.2
	150	116/34	147.4/2.6	150.1/0.1
20	1	116/115	4.5/3.5	0.5/0.5
	15	63/48	17.4/2.4	14.9/0.1
	60	74/14	60.2/0.2	60.2/0.2
	150	116/34	149.2/0.8	150.1/0.1
30	1	116/115	1.5/0.5	1/0
	15	64/49	16.7/1.7	14.9/0.1
	60	74/14	60.2/0.2	60.2/0.2
	150	129/21	149.2/0.8	150.1/0.1

表 1 数据显示, 对长宽相等的图像, 文献[9, 11] 在模糊尺度较大(如: 20, 30 像素) 时, 运动模糊方向估计相对准确, 估计误差不超过 2° 。模糊尺度小于 10 像素后, 估计误差很

(下转第 776 页)

表 1 不同算法和特征分类结果比较表 %

分类方法	特征提取方法		
	多分形谱	小波变换	本文方法
BP 神经网络	89.89	89.94	96.69
SVM	89.30	83.80	87.70
k-NN	87.50	82.70	85.40

从表 1 可看出:本文提取方法结合 BP 神经网络进行分类相比多分形谱特征提取和分类方法具有较好的识别率。

5 结语

本文将四元数小波变换与多分形理论相结合,提出一种纹理分类的方法,该方法克服了传统小波变换用于纹理分类中针对旋转不变纹理图像的局限,同时也克服了应用分形理论进行纹理分析中的某些不足,通过实验表明该方法计算复杂度低,分类正确率较高,是一种较为理想的纹理分类方法。

参考文献:

- [1] KIM S C, KANG T J. Texture classification and segmentation using wavelet packet frame and Gaussian mixture model[J]. Pattern Recognition, 2007, 40(4): 1207 - 1221.
- [2] LIU XIUWEN, WANG DELIANG. Texture classification using spectral histograms[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2003, 12(6): 661 - 670.
- [3] MALLAT S G. A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1989, 11(7): 674 - 693.
- [4] UNSER M. Texture classification and segmentation using wavelet frames[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1995, 4(12): 1549 - 1566.
- [5] ARIVAZHAGAN S, GANESAN L, PADAM P S. Texture classifica-

- tion using Gabor wavelets based rotation invariant features [J]. Pattern Recognition Letters, 2006, 27(16): 1976 - 1982.
- [6] 柳莲花,丁万山. 四元数小波变换在图像处理中的应用[J]. 电子科技, 2010, 23(4): 89 - 93.
- [7] CHAN W L, CHOI H, BARANIUK R. Quaternion wavelets for image analysis and processing [C]// International Conference on Image Processing. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2004: 3057 - 3060.
- [8] SOULARD R, CARRE P. Quaternionic wavelets for texture classification [C]// 2010 IEEE International Conference on Acoustics Speech and Signal Processing. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2010: 4134 - 4137.
- [9] MANDELBROT B B. Fractals: Form, chance and dimension [M]. San Francisco: Freeman, 1977.
- [10] 王克奇,谢永华,陈立君. 基于分形理论的木材纹理特征研究[J]. 林业机械与木工设备, 2005, 33(7): 19 - 20.
- [11] 吴高洪,章毓晋,林行刚. 基于分形的自然纹理自相关描述和分类[J]. 清华大学学报, 2000, 40(3): 90 - 93.
- [12] XIA YONG, FENG DAGANG, ZHAO RONGCHUN, et al. Multifractal signature estimation for textured image segmentation [J]. Pattern Recognition Letters, 2010, 31(2): 163 - 169.
- [13] CHAN W L, CHOI H, BARANIUK R G. Coherent multiscale image processing using dual-tree quaternion wavelets [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2007, 17(7): 1069 - 1082.
- [14] 王美玲,王念平,李晓. BP 神经网络算法的改进及应用[J]. 计算机工程与应用, 2009, 45(35): 47 - 48.
- [15] Datasets for computer vision research[EB/OL]. [2010-05-10]. http://www-cvrl.ai.uiuc.edu/ponce_grp/data/.
- [16] KINGSBURY N G. A dual-tree complex wavelet transform with improved orthogonality and symmetry properties [C]// International Conference on Image Processing. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2000: 375 - 378.

(上接第 772 页)

大,估计角度已不能正确反映运动模糊方向。而本文算法对模糊尺度从 7 到 30 像素的运动模糊图像估计角度非常精确,仅在某些方向上出现了 1° 的误差。

表 2 数据显示,对长宽不等的图像,文献[9]由于未考虑图像长宽比与频谱暗条纹和运动模糊方向的关系,其估算结果出现错误。文献[11]和本文算法的估算角度出现小数是因为长宽比代入公式计算时产生的。文献[11]仍然仅是对模糊尺度大的运动方向估计准确,模糊尺度小时估计误差较大。若对估算值取四舍五入,则本文算法的运动方向估计结果基本以实际运动方向吻合,仅在某些方向上有 1° 的误差。

4 结语

运动模糊方向估计是运动模糊图像复原的重要步骤。很多基于频谱估计的算法都未分析图像长宽比不为 1 时模糊方向的估算问题,本文分析了图像长宽比与暗条纹和模糊方向之间的关系,推导出计算公式。利用 LoG 边缘检测算子突出频谱中暗条纹轮廓,使 Radon 变换寻找角度更加精确。仿真结果验证本文算法对不同尺寸图像的运动模糊方向估计精确度高,估算结果以实际运动方向基本吻合。但噪声干扰时,退化图像频谱中的暗条纹减弱,甚至消失。所以本文算法和其他基于频谱估计的方法一样,对噪声干扰的退化图像估计准确度降低,有待于进一步改进。

参考文献:

- [1] 邸慧,于起峰. 基于自相关的匀速运动模糊尺度参数识别[J]. 国

- 防科技大学学报, 2006, 28(5): 123 - 125.
- [2] 贺卫国,黎绍发. 匀速直线运动模糊长度的精确估计[J]. 计算机应用, 2005, 25(6): 1316 - 1317.
- [3] 郭永彩,丁小平,高潮. 基于差分自相关的运动模糊图像尺度参数识别[J]. 光电工程, 2011, 38(6): 134 - 140.
- [4] 叶嘉鲁,李福德,肖伟,等. 含噪声的运动模糊图像点扩散函数尺度鉴别[J]. 电子器件, 2007, 30(2): 593 - 595.
- [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] 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]. 中国图象图形学报, 2005, 10(5): 590 - 595.
- [7] 谢伟,秦前清. 基于倒频谱的运动模糊图像 PSF 参数估计[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2008, 33(2): 128 - 131.
- [8] 谢飞,车宏,蔡猛,等. 一种基于倒频谱鉴别模糊参数的图像复原算法[J]. 电光与控制, 2011, 18(7): 49 - 54.
- [9] 邓泽峰,熊有伦. 基于频域方法的运动模糊方向识别[J]. 光电工程, 2007, 34(10): 98 - 101.
- [10] 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[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(5): 963 - 969.
- [11] 李宇成,贾宝华,杨光明. 运动模糊图像的参数估计与恢复[J]. 计算机工程与设计, 2010, 31(19): 4247 - 4249.
- [12] GONZALEZ R C, WOODS R E. Digital image processing [M]. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 2002.