

中图法分类号: TP391.4 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2011)07-1164-06

论文索引信息: 梁宛玉, 孙权森, 夏德深. 利用频谱特性鉴别运动模糊方向 [J]. 中国图象图形学报, 2011, 16(7): 1164-1169

# 利用频谱特性鉴别运动模糊方向

梁宛玉, 孙权森, 夏德深

(南京理工大学计算机科学与技术学院, 南京 210094)

**摘要:** 点扩展函数(PSF)的精确估计是运动模糊图像恢复的关键。匀速直线运动模糊的PSF参数主要由模糊角度(方向)和模糊尺度两个参数组成,然而模糊角度的估计又是重中之重。针对R Lokhande等人提出的霍夫变换的运动模糊方向估计法进行改进,通过增加边缘检测等预处理步骤,利用霍夫变换检测直线,并利用改进的霍夫变换峰值提取方法来估计角度值。实验表明,该方法能够得到比原方法更精确的角度值,并且具有抗噪能力强、鉴别精度高的优点。

**关键词:** 模糊图像;点扩展函数(PSF);边缘检测;霍夫变换;峰值提取

## Identification of the motion blur direction using spectral property

Liang Wanyu, Sun Quansen, Xia Deshen

(School of Computer Science & Technology, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094 China)

**Abstract:** The accurate estimation of the point spread function (PSF) is very important in restoration of motion-blurred image. The uniform linear motion blur PSF is composed of two parameters, namely blur angle(direction) and blur length. However, estimation of the motion-blurred angle is the most important. The motion-blurred direction based on Hough transform, which is proposed by R. Lokhande et al, is improved. The improvement adopts more pretreatments such as edge detection, detect the straight line by Hough transform, and takes advantage of the improved Hough transform peak extraction method to estimate the value of the angle. Experiments show that the method can be more accurate than the original method of angle values, and has anti-noise ability, identification of high precision.

**Keywords:** blur Images; point spread function (PSF); edge detection; Hough transform; peak extraction

## 0 引言

运动模糊,即采集图像时由于采集设备与目标之间产生相对运动造成图像降质而导致的图像模糊,是各种目标识别系统中首要解决的问题。在各种形式的运动模糊中,由匀速直线运动所造成的模糊更具有一般性和代表性,因为变速的、非直线的运动在成像瞬间可以视为匀速直线运动。

对模糊图像的恢复依赖于图像的退化模型,而在退化模型中最关键的问题就是点扩展函数(PSF)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。已有研究提出了多种方法来估计模糊参数<sup>[1-4]</sup>。空间域里这方面的工作一般都需要知道PSF的先验知识。当有严重模糊时估计是不准确的,因为图像的特征不准确<sup>[5]</sup>。另外,基于频域估计的方法也有提出<sup>[6-11]</sup>。文献[6]通过在图像的功率倒频谱中检测

收稿日期:2010-02-08;修回日期:2010-07-13

基金项目:国家自然科学基金项目(60773172);江苏省自然科学基金项目(BK2008411);教育部博士学科点基金项目(200802880017)。

第一作者简介:梁宛玉(1985—),女。现为南京理工大学计算机科学与技术学院硕士研究生,主要研究方向为图像处理、模式识别。E-mail:wanyu-7018@163.com。

负峰来识别点扩展函数 (PSF) 的参数;文献[7]提出通过 Randon 变换识别模糊方向。但这些方法的主要缺点是对噪声十分敏感。于是文献[8]中在使用 Randon 变换识别模糊参数的同时,首次将模糊集的概念用到了模糊参数的识别中,该方法对噪声影响大的运动模糊图像特别有效。但是 Randon 变换结构复杂,计算量大。文献[9]提出通过对图像频域进行对数变换并取二值图后,应用霍夫变换及 1 维频域来识别模糊参数。但它没有考虑噪声以及霍夫变换参数空间峰值簇拥等情况,使估计结果的精度降低。

为了使霍夫变换更好地检测直线和克服参数空间峰值簇拥情况,本文在文献[9]提出基于霍夫变换的运动模糊图像模糊角度识别的基础上,针对该方法进行了改进。

### 1 模糊图像的频域特性

假设图像  $f(x, y)$ , 存在一个运动方向, 与  $x$  轴正向成  $\theta$  角。令  $x(t)$  和  $y(t)$  分别为该运动在  $x$  和  $y$  方向上的变化分量,  $t$  表示运动时间。如果曝光时间为  $T$ , 则有

$$g(x, y) = \int_0^T f[x - x_0(t), y - y_0(t)] dt \quad (1)$$

上式即为匀速直线运动模糊图像的退化模型,  $g(x, y)$  为运动引起的模糊图像。

对(1)式两边进行傅里叶变换, 交换积分次序并根据傅里叶变换的移位性可得

$$G(u, v) = \int_0^T F(u, v) \cdot \exp\{-j2\pi[u x_0(t) + v y_0(t)]\} dt \quad (2)$$

如果令

$$H(u, v) = \int_0^T \exp\{-j2\pi[u x_0(t) + v y_0(t)]\} dt \quad (3)$$

则可以得到

$$G(u, v) = F(u, v)H(u, v) \quad (4)$$

这是已知模糊图像退化模型的傅里叶变换式。 $H(u, v)$  即为匀速直线运动模糊的传输函数。

假设图像只存在单一方向  $x$  方向的运动, 曝光时间为  $T$ , 图像移动的总距离, 即像素的个数为  $a$ , 其位移为  $x_0(t) = \frac{at}{T}, y_0(t) = 0$ 。此时, 根据式(3)可得

$$H(u, v) = \int_0^T \exp\{-j2\pi u x_0(t)\} dt = \int_0^T \exp\left\{-j2\pi u \frac{at}{T}\right\} dt = T \cdot \frac{\sin(\pi ua)}{\pi ua} \cdot \exp(-j\pi ua) \quad (5)$$

可见, 单一方向  $x$  方向上的运动传输函数在  $u = n/a$  ( $n$  为整数) 处为零, 这些零点会迫使退化图像的频谱在某些特定的频率上变为零, 即模糊图像的频谱图上特定位置将出现平行的暗条纹。

由点扩展函数和线扩展函数傅里叶变换之间的关系可以证明, 和  $x$  轴成  $\theta$  夹角的直线的影像, 其傅里叶变换等于在  $(u, v)$  平面内, 与  $u$  轴成  $\theta + 90^\circ$  夹角的方向上  $H(u, v)$  的截面。类似可得, 对于  $\theta$  方向的匀速直线运动模糊图像, 其频谱图一定在  $\theta + 90^\circ$  方向存在暗线。图 1 是以  $512 \times 512$  的标准图像库中的 peppers.bmp 图像做实验所得结果。从图 1 可以明显地看出, 非模糊的原始清晰图像的频谱是各向同性的, 它的光谱是朝各个方向的; 而运动的模糊图像的频谱是各向异性的, 它的光谱偏向于模糊方向。

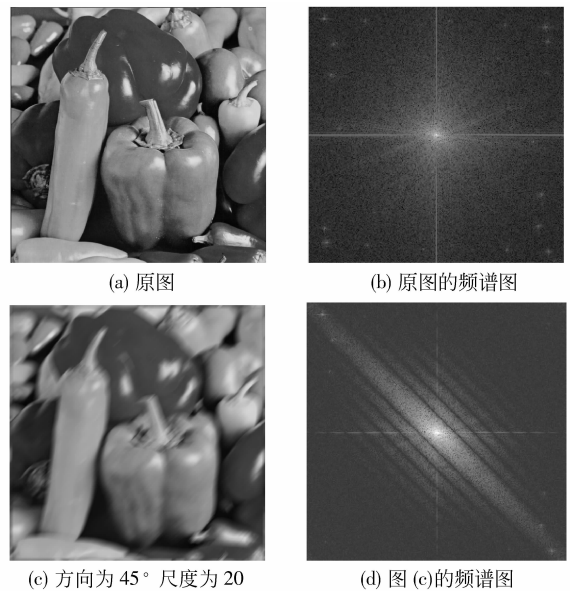


图 1 运动模糊图像及相应的频谱图

Fig. 1 Motion-blurred images and the corresponding frequency spectrum

### 2 霍夫变换

霍夫变换的基本思想是点-线的对偶性, 即研究空间的线到点的变换, 是一种线描述方法, 可以将平

面直角坐标系的线变换为极坐标系中的点。直线的标准表示方法为

$$\rho = x \cos \theta + y \sin \theta \quad (6)$$

式中,  $\rho$  是直线距原点的法线距离,  $\theta$  为该法线与  $x$  轴正向的夹角。

图 2(a) 所示说明了参数  $\rho$  和  $\theta$  的几何解释; (b) 中的每一条正弦曲线表示通过特定点  $(x_i, y_i)$  的一簇直线, 交点  $(\rho', \theta')$  对应于通过  $(x_i, y_i)$  和  $(x_j, y_j)$  两点直线; (c) 所示说明霍夫变换是把  $\rho, \theta$  参数空间细分为所谓的累加器单元, 其中  $(\rho_{\min}, \rho_{\max})$  和  $(\theta_{\min}, \theta_{\max})$  是参数值的期望范围。

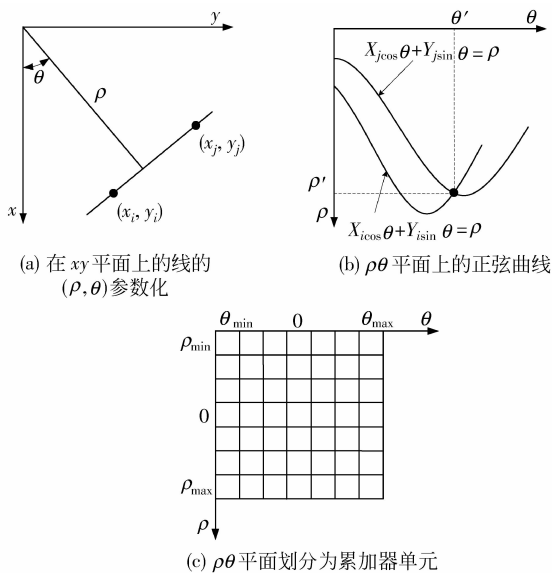


图 2 霍夫变换原理示意图

Fig. 2 The principle of Hough transform

由此可见, 霍夫变换使不同坐标系中的线和点建立了一种对应关系。霍夫变换根据这些关系把在图像空间中的检测问题转换到参数空间, 通过在参数空间进行累加统计完成检测任务, 即将图像中给定形状曲线或直线的检测问题, 变成寻找参数空间中峰值点的问题。

### 3 模糊角度的估计

由于霍夫变换具有几何解析简单、检测直线的抗噪性强以及并行实现潜力等优点, 因此, 文献[9]使用霍夫变换可以得到较满意的结果, 但存在一定的范围误差。文献[9]的实验结果显示, 模糊图像角度识别的误差最大达到  $5^\circ$ , 而本文在对该方法进

行的大量的实验中, 角度识别的误差更大。因此, 有必要对该方法进行一定的改进, 使得识别角度更加精确。

#### 3.1 预处理操作的改进

文献[9]的算法对运动模糊图像  $g(x, y)$  的频谱图  $G(x, y)$  进行对数变换后将其转换为二值图, 这样做使得边界二值图的平行暗线边界并不明显, 且伴有大量的杂点(见图 3(a))。这些都不利于霍夫变换的检测。

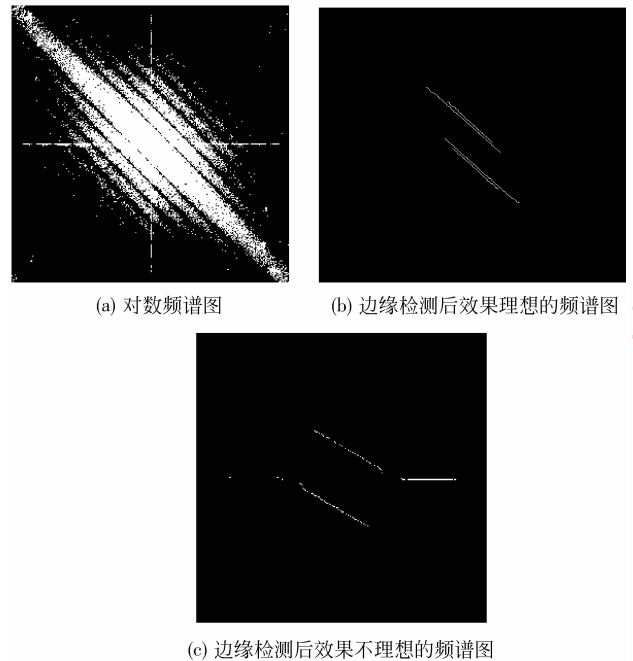


图 3 预处理效果比较

Fig. 3 Comparative effects of pretreatment

为使图像更利于霍夫变换的直线检测, 提出在模糊图像的对数频谱图的基础上对图像进行边缘检测来代替二值化操作。边缘检测的算子中, Canny 算子的边缘检测效果优于传统的 Sobel 和 Roberts 等检测算子。由于 Canny 算子具有对高斯噪声不敏感、低误判率、高定位精度以及抑制虚假边缘等优点, 因此, Canny 边缘检测算法可以减少模板检测中的边缘中断, 有利于得到较完整的线段, 从而有利于霍夫变换进行直线检测。本文具体的做法是: 1) 对傅里叶变换后的图像  $G(x, y)$ , 进行对数变换, 使得图像频谱图的暗线更加明显; 2) 对对数频谱图做 Canny 边缘检测, 得到频谱图的边缘检测图像。

从图 3(b) 可以看出, 经过上述 Canny 边缘检测, 在边缘检测图像的中心点两侧就会存在两条有

一定间隔的清晰直线,从而能让后续的霍夫变换操作得到更精确的结果。从多次实验结果得出,Canny算子边缘检测的阈值设为0.85效果最好。如果模糊图像存在噪声,则模糊图像频谱图上的一部分暗线会变得不清晰,甚至消失。这时,可以在遵循上述算法的基础上,在对模糊图像进行傅里叶变换取对数之后,对其应用滤波操作进行去噪。因为噪声种类繁多,不同的滤波操作得到的结果可能不同。这就要根据具体情况具体对待。

### 3.2 霍夫变换峰值提取的改进

文献[9]算法中,应用霍夫变换在二值图中检测直线时,寻找的是累加数组的最大值 $A(\rho_m, \theta_m)$ ,从而得到相应的直线 $\rho_m = x \cos \theta_m + y \sin \theta_m$ ,进而得到运动模糊方向角。

但由图3(b)(c)可以看出,尽管进行了相应的处理,最后得到图像上的直线也并不是完全平行的唯一两条直线,而是由一些断断续续的局部曲线所构成的。由霍夫变换的特点可知,如果图像空间中包含一条直线,则在参数空间中有一个对应的累加器会出现局部最大值。由于预处理后的图像中直线不唯一,因此文献[9]中的算法直接取累加数组的最大值所对应的直线,有时会与希望得到的频谱中平行暗线的边界产生一定的误差,且随着图像噪声的增大,这种误差会越来越来大。

由于位于同一条直线的数据点经过霍夫变换对参数空间进行投票之后,在积累峰值的较大领域内各积累单元的积累值也比较大。这就导致通过设定阈值提取出来的备选积累单元有一些是完全相邻的。而这些相邻备选积累单元的积累值完全是同一条直线上数据点投票积累的结果。因此,为了得到更加准确的直线估计参数,本文将文献[9]算法中的只寻找累加数组的最大值改为寻找累加数组中的多个较大值。从对实验结果的分析中可知,一般取前3个数据点按累加器中数值大小从大到小分别记为 $H_{\max}, H_{\max1}$ 和 $H_{\max2}$ 。它们对应的角度分别记为与 $\theta, \theta_1$ 和 $\theta_2$ 。然后让 $\theta$ 和 $\theta_2$ 分别与 $\theta_1$ 进行比较,如果 $\theta$ 和 $\theta_1$ 差的绝对值大于设定的阈值(根据经验这个阈值一般设为 $5^\circ$ ),并且 $\theta_1$ 和 $\theta_2$ 差的绝对值小于设定的阈值(根据经验阈值一般设为 $1^\circ$ ),则将 $\theta_1$ 和 $\theta_2$ 进行加权均值运算得到估计的直线的方向角度(本文采用的是等权值的均值运算);反之,则将 $\theta$ 和 $\theta_1$ 进行加权均值运算得到估计的直线的方向角度:即

$$\theta_{\text{result}} = \begin{cases} (a\theta_2 + b\theta_1)/(a+b) & | \theta_1 - \theta | \geq \varepsilon \text{ 且} \\ & | \theta_1 - \theta_2 | \leq \mu \\ (a\theta + b\theta_1)/(a+b) & \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

式中 $\varepsilon, \mu$ 分别是要设定的阈值1和阈值2,根据上式计算得到估计的直线的方向角度 $\theta_{\text{result}}$ ,即为根据频谱图上的直线方向和实际模糊角度的关系而得到的运动模糊图像的模糊角度估计值。

### 3.3 算法实现

基于以上讨论,得到如下的具体算法:

1) 对运动模糊图像 $g(x, y)$ 做傅里叶变换,计算其频谱,得到运动模糊图像 $g(x, y)$ 的频谱图 $G(u, v)$ ;

2) 对 $G(u, v)$ 进行对数变换,得到清晰的对数频谱图,方便提取暗线信息;在噪声影响大的情况下,可对其进行滤波去噪处理;

3) 对频谱图 $G(u, v)$ 做Canny边缘检测,得到频谱图的边缘检测图像 $e(x, y)$ ;

4) 对边缘检测图像 $e(x, y)$ 在规定的角度范围内进行霍夫变换(角度范围可以根据需要调整),得到累加数组 $A$ ;

5) 在累加数组 $A$ 中找到3个峰值点 $H_{\max}, H_{\max1}$ 和 $H_{\max2}$ ;

6) 由 $H_{\max}, H_{\max1}$ 和 $H_{\max2}$ 3点可以得到3条直线,从而得到3个对应的角度值( $\theta, \theta_1$ 和 $\theta_2$ ),然后根据式(7)计算得到估计直线方向角度;

7) 根据频谱图上的直线方向和实际模糊角度的关系,对步骤6)得到的角度进行适当转换得到运动模糊图像的模糊角度的估计值。

## 4 实验分析

为了进一步对以上理论进行验证,用Lena图像(256×256)及其各种模糊图像进行实验,实验结果如图4所示。

从图4上可以清晰看到一些明暗相交的条纹,从而验证了第2节中所论述的理论分析的正确性。(e)(f)分别是(d)(g)边缘检测后的图,可以看出用Canny边缘检测后所得到的图像比直接用模糊图像的对数频谱图更有利于霍夫变换精确地检测出频谱图上的平行暗条纹。

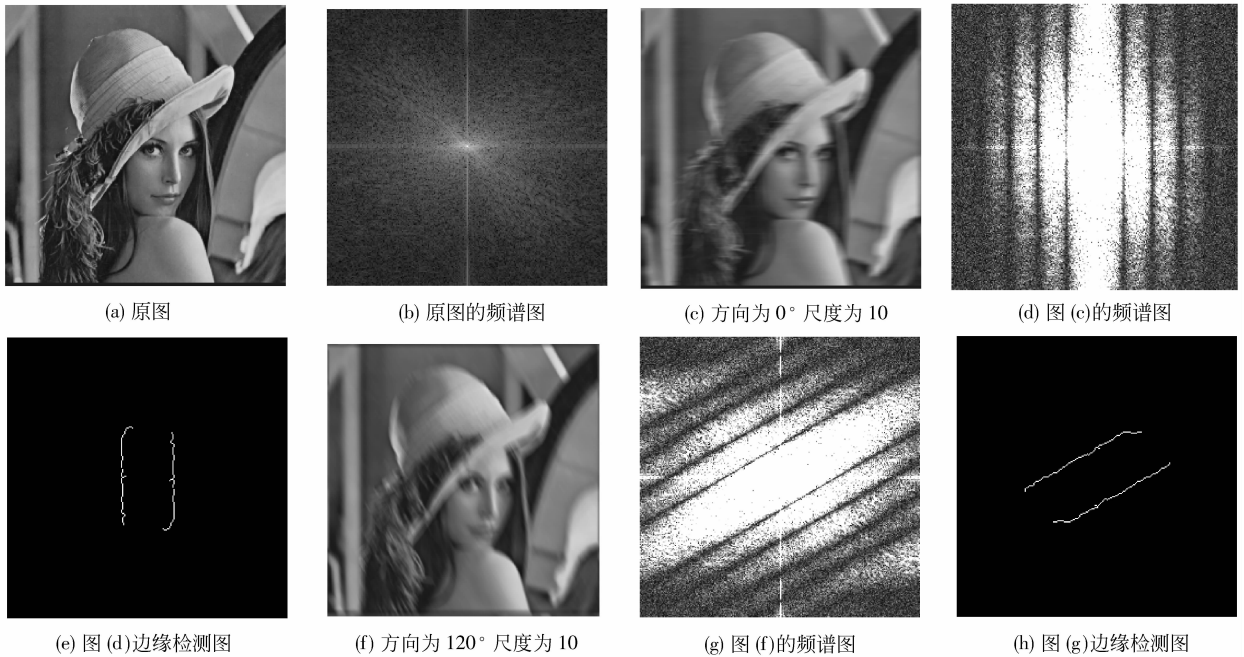


图 4 Lena 图像运动模糊方向鉴别实验结果

Fig. 4 The result of identify the direction of motion-blurred Lena image

为了检验本文鉴别方法的准确性和稳定性,对标准图像库中的图像 (Peppers. bmp, Lena. bmp) 进行了不同模糊方向 ( $0^\circ \leq \theta < 180^\circ$ ) 和模糊尺度为 10 个像素的匀速直线运动模糊,然后采用本文的算法进行运动模糊角度的鉴别,鉴别结果如表 1 和表 2 所示。其中,鉴别误差 = 鉴别角度 - 真实角度,本文算法的均方误差为 0.185。

表 1 Lena 图像的实验结果

Tab. 1 The results of Lena image

图片	真实角度	鉴别角度	误差
Lena_angle0_len10. bmp	0	0	0
Lena_angle15_len10. bmp	15	15	0
Lena_angle30_len10. bmp	30	30	0
Lena_angle45_len10. bmp	45	45	0
Lena_angle60_len10. bmp	60	60.5	0.5
Lena_angle75_len10. bmp	75	75	0
Lena_angle90_len10. bmp	90	90	0
Lena_angle105_len10. bmp	105	105	0
Lena_angle120_len10. bmp	120	120	0
Lena_angle135_len10. bmp	135	135	0
Lena_angle150_len10. bmp	150	150	0

从表 1 和表 2 的实验结果可以明显看出,本文算法对于匀速直线运动模糊图像几乎可准确估计出

表 2 Peppers 图像的实验结果

Tab. 2 The results of Peppers image

图片	真实角度	鉴别角度	误差
Peppers_angle0_len10. bmp	0	0	0
Peppers_angle15_len10. bmp	15	15	0
Peppers_angle30_len10. bmp	30	30.5	0.5
Peppers_angle45_len10. bmp	45	45	0
Peppers_angle60_len10. bmp	60	60	0
Peppers_angle75_len10. bmp	75	75	0
Peppers_angle90_len10. bmp	90	90	0
Peppers_angle105_len10. bmp	105	104.5	0.5
Peppers_angle120_len10. bmp	120	120	0
Peppers_angle135_len10. bmp	135	135	0
Peppers_angle150_len10. bmp	150	150	0

模糊方向的角度,鉴别精度较高,同时本文算法对  $0^\circ \sim 180^\circ$  的模糊角度都可以鉴别,鉴别范围大。

本文算法针对文献[9]中运动模糊角度鉴别方法而做了改进,因此本文采用文献[9]中的参数对标准图像库中的图像 (Peppers. bmp, Lena. bmp) 进行运动模糊仿真,然后分别用文献[9]和本文的算法进行运动模糊角度鉴别,实验结果如表 3 和表 4 所示。

表3 无噪情况下两种算法实验结果比较

Tab.3 Noise-free case, the results of two methods

图像名	模糊宽度/像素	模糊角度/(°)	文献[9]估计结果/(°)	本文估计结果/(°)
Lena. bmp	15	0	0	0
	15	30	29	30
	23	18	18	18
	38	30	31	30
	60	40	39	40
Peppers. bmp	15	45	45	45
	20	50	45	50
	30	60	58	60
	35	15	14	15
	50	0	0	0

表4 有噪情况下两种算法实验结果比较

Tab.4 Noisy cases, the results of two methods

图像名	模糊宽度/像素	模糊角度/(°)	加入噪声方差	文献[9]估计结果/(°)	本文估计结果/(°)
Lena. bmp	15	20	65.025	22	19
	15	45	195.075	48	44
	23	18	195.075	19	17
	35	0	130.05	0	0
	38	30	130.05	31	30.5
Peppers. bmp	20	42	130.05	45	45
	32	47	65.025	45	47.5
	35	45	65.025	45	45
	37	15	130.05	15	15
	40	10	130.05	10	9

表3是在模糊图像不含噪声的情况下两种算法实验的结果,表4是对模糊图像增加均值为0,不同方差的高斯噪声后两种算法实验的结果。从表3和表4实验结果可以明显看出,针对两幅标准图,本文算法在无噪和有噪两种情况下鉴别误差都比文献[9]算法的鉴别误差小很多,说明本文算法估计精度更高,抗噪声性能更好,有助于运动模糊图像的精确复原。

## 5 结论

由于霍夫变换主要是用来检测频谱图上的直线,所以频谱图的清晰程度对该鉴别方法会有较大影响,考虑到以上因素,本文在霍夫变换之前增加了对图像频谱的一些预处理。另外,为了使鉴别结果更加准确,本文对霍夫变换的峰值提取也进行了改

进,第4节中的实验结果说明了本文方法的稳定性和准确性。但当噪声很大时,模糊图像的频谱图进行边缘检测之后可能会出现多条不符合条件的杂段,这个问题可以通过模糊图像的先验知识调整霍夫变换的检测范围来解决。

## 参考文献 (References)

- [1] Al Maki W F, Shimahashi T, Matsubara M, et al. PSF estimation and image restoration for noiseless motion blurred images [C]//Proceedings of the 7th WSEAS International Conference on Signal, Speech and Image Processing. Wisconsin, USA:WSEAS, 2007:1-7.
- [2] Chen Li, Yap Kim hui. Efficient discrete spatial techniques for blur support identification in blind image deconvolution [J]. IEEE Trans. Signal Processing, 2006, 54(4):1557-1562.
- [3] Yitzhaky Y, Kopeika N S. Identification of blur parameters from motion blurred images [J]. Graphical Models and Image Processing, 1997, 59 (5):310 - 320.
- [4] Krahmer F, Lin Y, McAdoo B, et al. Blind image deconvolution: motion blur estimation[EB/OL]. (2006-08-18) [2009-01-30]. <http://www.ima.umn.edu>.
- [5] Wu Shiqian, Lin Weisi, Xie Shoulie, et al. Blind blur assessment for vision-based applications [J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2009, 20(4):231-241.
- [6] Cannon M. Blind deconvolution of spatially invariant image blurs with phase [J]. IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing, 1976, 24(1): 58-63.
- [7] Moghaddam M E, Jamzad M. Finding point spread function of motion blur using radon transform and modeling the motion length [C]//Proceedings of the 4th IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology. Rome, Italy: IEEE ISSPIT, 2004: 314-317.
- [8] Moghaddam M E, Jamzad M. Linear motion blur parameter estimation in noisy images using fuzzy sets and power spectrum [J]. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2007, 10(1):1-8.
- [9] Lokhande R, Arya K V, Gupta P. Identification of parameters and restoration of motion blurred images [C]// Proceedings of the 2006 ACM Symposium on Applied Computing. New York, NY, USA: ACM, 2006:301-305.
- [10] Moghaddam M E, Jamzad M. Motion blur identification in noisy images using mathematical models and statistical measures [J]. Pattern Recognition, 2007, 40(7):1946-1957.
- [11] Wu Shiqian, Lu Zhongkang, Lin Weisi, et al. Blind image blur identification in cepstrum domain [C]// Proceedings of the 16th International Conference on Computer Communications and Networks. Hawaii, USA: IEEE ICCCN, 2007:1166-1171.