

文章编号: 2095-4980(2015)01-0148-06

基于频谱分析的运动模糊图像参数检测

唐春菊

(攀枝花学院 电气信息工程学院, 四川 攀枝花 617000)

摘要: 为了提高运动模糊图像的运动方向和运动像素的检测精确度, 本文提出了基于频谱分析的运动模糊图像参数识别的改进算法, 从频谱分析的角度出发推导了暗条纹宽度、图像大小、条纹倾斜角度与运动尺度、运动像素之间的关系; 采用二次傅里叶变换的方法细化亮条纹, 分析并简化了条纹倾斜角与运动方向角之间的关系; 分析了频谱中十字亮线产生的原因及位置, 提出了去除十字亮线的新方法; 然后, 对处理后的频谱进行 Radon 变换, 根据变换结果得出模糊图像的运动方向和运动像素。实验证明, 该算法能够检测出不同大小模糊图像的运动方向和运动像素, 检测误差控制在 0.5° 、2 个像素的范围之内。

关键词: 频谱分析; 运动方向; 运动像素; 十字亮线

中图分类号: TN911.73; TP317 **文献标识码:** A **doi:** 10.11805/TKYDA201501.0148

Parameter detection method of motion blur images based on spectrum analysis

TANG Chunju

(Institute of Electrical and Information Engineering, Panzhihua University, Panzhihua Sichuan 617000, China)

Abstract: A modified algorithm for parameter identification of moving blur images is proposed based on the spectrum analysis in order to improve detecting quality of the direction and pixel for moving objects in blurred image. The relationships among dark fringe width, image size, inclination angle and kinematic scale, kinematic pixel are derived. The twice Fourier transform is applied to meet refinement of bright fringe. And then the relationship between inclination angle of fringe and moving angle is analyzed. A new algorithm for eliminating the cross bright line is proposed by analyzing its generation reasons and position. Radon transform is applied to the processed image, and the moving direction and the moving pixel are obtained according to the transform results. Simulation results show that the proposed algorithm can detect the moving direction and pixel of different sizes of blur images with a detection error under 0.5° and two pixels.

Key words: spectrum analysis; moving direction, moving pixel; cross bright line

精确地复原运动模糊图像对图像的后续处理具有重要意义。目前, 针对运动所导致的模糊图像的复原算法很多, 维纳滤波就是最好的算法之一, 但这些算法都必须提供退化模型, 并且退化模型直接影响到复原效果。因此, 如何获取图像的退化模型是运动模糊图像复原效果的关键。匀速直线运动所导致的图像退化模型(即点扩散函数)由运动方向和运动尺度共同确定。在模糊运动方向的估计方面, 文献[1]提出了模糊图像频谱中的明暗条纹与运动方向相互垂直的几何关系, 通过分析明暗条纹的倾斜情况来估计运动方向。但是, 通过分析发现, 该几何关系只适合于图像矩阵行列数相等的情况, 对于行列数不相等的图像, 这种关系是一种不精确的几何关系, 且频谱图像亮条纹较分散, 检测误差大; 文献[2]针对频谱图中十字亮线对运动方向检测的影响, 提出了用模糊图像分块 Radon 投影的思想来避开十字亮线, 但是该方法需要人工划分不同区域, 这使得该方法的使用受到了一定的限制。在模糊尺度识别方面, 文献[3]提出用曲线拟合的方法建立模糊尺度与暗条纹宽度之间的关系, 但所给曲线形式复杂, 参数较多; 文献[4]利用周期性约束识别模糊方向和模糊尺度, 但算法复杂度较高。文献[5]采用了相关系数法, 文献[6]采用哈里斯边缘检测法, 文献[7]采用霍夫变换来检测模糊参数, 但这些方法都假设图像模糊方向与频谱暗条纹相互垂直, 且模糊长度与暗条纹间距成简单的反比。

针对上述不足，为了提高运动模糊图像的运动方向和运动像素的检测精确度，本文从频谱分析角度出发，提出了基于频谱分析的运动模糊图像参数识别算法。首先对模糊图像进行二次傅里叶变换，然后根据二次傅里叶变换后的频谱图中的十字亮线产生原因，去除十字亮线，再对频谱进行二值化处理 and Radon 变换，最后根据 Radon 变换的结果计算出模糊图像运动方向和运动尺度，并构造点扩展函数，利用维纳滤波进行图像复原。本文算法改进了剔除十字亮线的方法，给出了各参数之间的关系模型，扩展检测图像的使用范围，提高了检测精确度。

1 运动模糊图像参数估计的理论分析

假设对平面匀速运动的物体采集一幅图像 $f(x,y)$ ， $x_0(t)$ 和 $y_0(t)$ 分别是景物在 x 和 y 方向的运动分量， T 是采集时间长度， a, b 分别为图像在水平方向和垂直方向的运动距离，忽略其他因素，实际采集到的模糊图像 $g(x,y)$ 为：

$$g(x,y) = \int_0^T f[x-x_0(t), y-y_0(t)] dt = \int_0^T f[x-at/T, y-bt/T] dt \quad t \in [0, T] \tag{1}$$

对式(1)进行傅里叶变换可以得到：

$$G(\mu, \nu) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} g(x,y) e^{-j2\pi(\mu x + \nu y)} dx dy = F(\mu, \nu) \int_0^T e^{-j2\pi[\mu a t/T + \nu b t/T]} dt \tag{2}$$

因此，匀速直线运动退化函数的频域形式为：

$$H(\mu, \nu) = \int_0^T e^{-j2\pi[\mu a t/T + \nu b t/T]} dt = \frac{T}{\pi(\mu a + \nu b)} \sin[\pi(\mu a + \nu b)] e^{-j\pi(\mu a + \nu b)} \tag{3}$$

设图像大小为 $N \times M$ ，将上述退化函数离散化即可得到数字图像匀速直线运动的退化函数：

$$H(\mu, \nu) = \frac{T}{\pi\left(\frac{\mu a}{M} + \frac{\nu b}{N}\right)} \sin\left[\pi\left(\frac{\mu a}{M} + \frac{\nu b}{N}\right)\right] e^{-j\pi\left(\frac{\mu a}{M} + \frac{\nu b}{N}\right)} = T \text{sinc}\left[\pi\left(\frac{\mu a}{M} + \frac{\nu b}{N}\right)\right] e^{-j\pi\left(\frac{\mu a}{M} + \frac{\nu b}{N}\right)} \tag{4}$$

设 $\mu a/M + \nu b/N = n$ ，则当 $n=0$ 时， $H(\mu, \nu)$ 取最大值，而当 n 为非零整数时， $H(\mu, \nu) = 0$ ，同时 $G(\mu, \nu) = 0$ ，从而使模糊图像的频谱出现平行的、明暗相间的条纹，条纹的倾斜角度 α 与直线 $\mu a/M + \nu b/N = n$ ($n \neq 0$) 的倾斜角度一致，即

$$\tan \alpha = -\frac{a}{b} \frac{N}{M} \tag{5}$$

设运动模糊方向与 x 轴的夹角为 ϕ ，则 $\tan \phi = \frac{b}{a}$ ，上式可转换为：

$$\tan \phi = -\frac{N}{M} \frac{1}{\tan \alpha} = \frac{N}{M} \tan\left(\alpha - \frac{\pi}{2}\right) \tag{6}$$

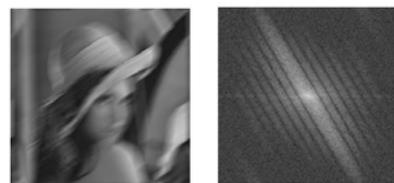
从式(6)可以看出，文献[1,5-8]中所假设的模糊运动方向和频谱暗条纹相互垂直只局限于 $M=N$ 的情况，当 $M \neq N$ 时，根据式(6)可求出运动方向。设目标物体发生相对运动的直线距离为 l 像素，则 $a = l \sin \phi$ ， $b = l \cos \phi$ 。

根据傅里叶变换的平移特性，常常将 $\mu=0, \nu=0$ 点移到频谱中心位置，直线 $\mu a/M + \nu b/N = 1$ 对应着第 1 条暗条纹，根据点到直线的距离可知，点 $(0,0)$ 到 $\mu a/M + \nu b/N = 1$ 的距离为：

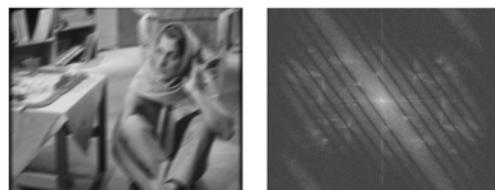
$$d = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{a}{M}\right)^2 + \left(\frac{b}{N}\right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{l \sin \phi}{M}\right)^2 + \left(\frac{l \cos \phi}{N}\right)^2}} \tag{7}$$

$$l = \frac{1}{d \sqrt{\frac{\sin^2 \phi}{M^2} + \frac{\cos^2 \phi}{N^2}}} \tag{8}$$

当 $M=N$ 时， $l=M/d$ ，当 $M \neq N$ 时，可由式(8)求出模糊运动尺度。因此，文献[5-7,9]认为 $l=M/d$ 只适合于 $M=N$ 的情况，当 $M \neq N$ 时是一种不精确的估计。



(a) Lena motion blur image and log spectrum



(b) Barbara motion blur image and log spectrum

Fig.1 Two differently sized motion blur images and the log spectrums
图 1 两幅不同大小运动模糊图像及傅里叶谱图

为说明模糊运动方向、频谱条纹及图像大小的关系，图 1 给出了 Lena 图像(256×256)和 Barbara 图像(720×580) 运动方向角 $\phi=30^\circ$ ，运动尺度为 20 像素的运动模糊图像及移中后的傅里叶对数谱，由 2 幅图像的频谱图可以看出，暗条纹宽度约 56 个像素，在运动方向角一致的情况下，条纹倾斜角度并不一致，因此，运动方向和条纹倾斜方向并不是简单的垂直关系，而与图像的大小有关。

2 运动模糊图像参数估计

2.1 频谱图的预处理

由式(6)可知，模糊运动方向和频谱暗条纹不是简单的垂直关系，而要通过一定的换算，这给检测者带来很多不便，同时频谱亮条纹的宽度较大，这使得亮条纹在 Radon 变换中投影半径较大，影响运动方向的检测精确度。实验发现，对频谱图再进行一次傅里叶变换可以达到细化亮条纹的目的，同时使得变换后亮条纹的倾斜角与运动方向角一致，而与图像的大小无关。设二次傅里叶变换后亮条纹的倾斜角为 β ，由式(6)可知：

$$\tan \beta = \frac{N}{M} \tan \left(\phi - \frac{\pi}{2} \right) = -\frac{N}{M} \frac{1}{\tan \phi} = -\frac{N}{M} \cdot \left(-\frac{M}{N} \tan \alpha \right) = \tan \alpha \quad (9)$$

由式(9)可知， $\beta = n\pi + \alpha, n=0,1,2,\dots$ ，当运动方向角在 $[0,\pi]$ 时， $\beta = \alpha$ 。图 2 给出了 Lena,Barbara 图像经过二次傅里叶变换后的傅里叶对数谱，显然，亮条纹的倾斜角是一致的，等于运动方向角。

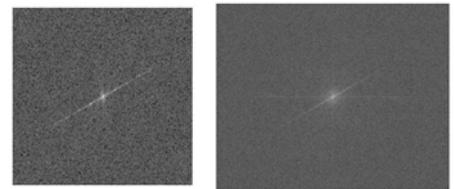
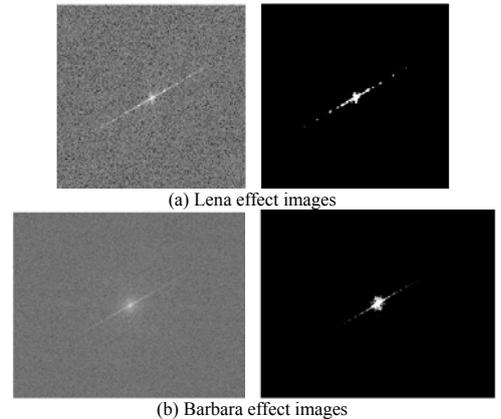


Fig.2 Twice Fourier log spectrums
图 2 二次傅里叶对数谱图

2.2 十字亮线的去除

由图 1、图 2 可以看出，对图像进行傅里叶变换后所得到的移位后的频谱图往往会在垂直方向和水平方向上出现 2 条亮线，这将严重影响运动方向的检测精确度，同时在进行 Radon 变换时，十字亮线将在各个角度方向上产生一定的线积分，导致变换结果模糊。

文献[8]采用滑动邻域法，计算频谱图中每个像素 8 邻域内像素的灰度平均，将平均值作为去除十字亮线的依据，但这种方法只适合于二值化之后的频谱图，且易删除频谱本身，影响检测精确度。经过分析发现，频谱图中的水平亮线是由图像中的垂直条纹产生，而垂直亮线主要由一些灰度规律变化的水平线产生，且其宽度为 1 个像素，设图像大小为 $M \times N$ ，则当 M, N 为奇数时，十字亮线出现在 $(M+1)/2$ 行， $(N+1)/2$ 列；当 M, N 为偶数时，十字亮线出现在 $M/2+1$ 行， $N/2+1$ 列。基于以上分析，本文首先根据亮线宽度判断水平及垂直亮线是否是由于图像中的条纹引起的十字亮线，若是十字亮线，则使该像素的值等于上下相邻像素的灰度值，从而去除十字亮线，同时又不影响频谱图以及目标对象在水平和垂直方向运动的检测。图 3 给出了图 2 中 Lena,Barbara 的频谱图经去除十字线及二值化的效果图，Lena 图像纹理比较简单，十字线亮度较低，而 Barbara 图像纹理相对复杂，十字亮线亮度也较高，实验结果表明，该方法可以有效去除十字亮线。



(a) Lena effect images
(b) Barbara effect images
Fig.3 Spectrum images removed cross line
图 3 去除十字线后的频谱图

2.3 Radon 变换

Radon 变换是计算图像在某一指定角度射线方向上投影的变换方法，它将线检测问题转换为函数极值搜索问题。设存在与 x 轴夹角 θ 方向垂直的射线，且射线的间距为 1 个像素，则 Radon 变换过程，如图 4 所示。Radon 变换的定义为：

$$R(\rho, \theta) = \iint f(x, y) \delta(\rho - x \cos \theta - y \sin \theta) dx dy \quad (10)$$

式中 ρ 表示图像空间中原点到积分射线的距离。图像灰度值越大，积分值越大，Radon 空间中的亮度值越高，因此，Radon 空间中亮度最大的点对应着频谱图中的亮线位置，由频谱对称性可知， 2ρ 表示中心亮条纹的宽度，由图 4 可以看出，当 $\theta < \pi/2$ 时，亮线倾斜角 $\phi = \theta + \pi/2$ ，当 $\theta \geq \pi/2$ 时，亮线倾斜角 $\phi = \theta - \pi/2$ 。

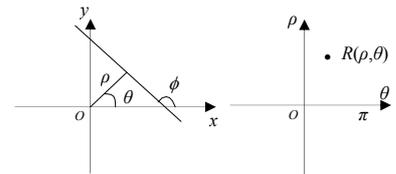
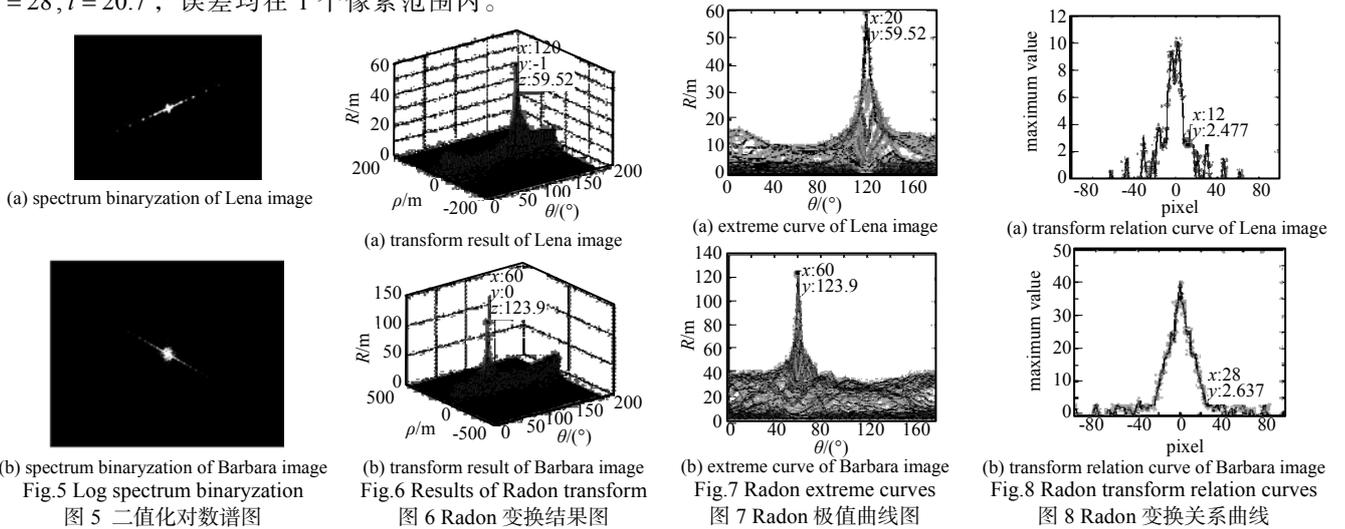


Fig.4 Schematic diagrams of Radon transform
图 4 Radon 变换示意图

图 5~图 7 给出了 Lena, Barbara 图像运动方向角分别为 $\phi = 30^\circ, \phi = 150^\circ$ ，运动像素为 20 的模糊图像二值化频谱、Radon 变换结果及 Radon 极值曲线。从图 6、图 7(a)中可以看出，Radon 变换极值点出现在 $\theta = 120^\circ$ 处，亮线倾斜角(即运动方向角) $\phi = 30^\circ$ ，而图 6、图 7(b)中 $\theta = 60^\circ$ ，运动方向角 $\phi = 150^\circ$ 。

2.4 运动尺度检测

在运动方向角 ϕ 已知的情况下，可根据式(8)求出运动尺度。图 8 给出了 2.3 节所给模糊图像的 Radon 变换关系曲线。从图 8(a)可知，频谱中心到第 1 条暗条纹的距离 $d = 12$ ，根据式(8)，运动尺度 $l = 21$ ，图 8(b)中， $d = 28, l = 20.7$ ，误差均在 1 个像素范围内。



3 本文算法描述

基于以上讨论，本文算法步骤如下：

1) 对模糊图像 $g(x,y)$ 进行傅里叶变换得到频谱图 $G(\mu,v)$ ，并对其幅度谱进行对数运算 $\log(|G(\mu,v)|+1)$ ，以增强暗条纹的清晰度，求得其对数谱 $|G'(\mu,v)|$ 。

2) 将 $|G'(\mu,v)|$ 作为输入参数，对对数谱进行傅里叶变换，并对其幅度谱进行对数运算，得到二次傅里叶变换对数谱 $|G''(\mu,v)|$ 。

3) 根据中心亮线宽度判断频谱中心位置的水平和垂直亮线是由于图像中的条纹引起的十字亮线，还是由图像运动模糊方向引起的频谱亮条纹。若是十字亮线，则使该像素的值等于上下相邻像素的灰度值，去除十字亮线，并对去除十字亮线后的频谱进行二值化处理，令处理后的图像为 B 。

4) 对图像 B 进行 Radon 变换，将变换结果记做 $R(\rho,\theta)$ ，画出 Radon 变换曲线。

5) 搜索 $R(\rho,\theta)$ 空间亮度最大点的坐标 (ρ,θ) ，根据 2.3 节分析方法，计算模糊图像运动方向 ϕ 。

$$\phi = \begin{cases} \theta + \frac{\pi}{2} & \theta < \frac{\pi}{2} \\ \theta - \frac{\pi}{2} & \theta \geq \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (11)$$

6) 搜索 $R(\rho,\theta)$ 空间中离中心点最近的亮度最小点的坐标 (ρ',θ') ， ρ' 频谱中心到第 1 条暗条纹的距离 d ，根据式(8)计算模糊图像运动尺度 l 。

7) 根据估计方向 ϕ 和尺度 l ，构造点扩展函数 $H(u,v) = \frac{T}{\pi(ul \cos \phi + vl \sin \phi)} \sin[\pi(ul \cos \phi + vl \sin \phi)] e^{-j\pi(ul \cos \phi + vl \sin \phi)}$ ，利用维纳滤波进行图像复原。

4 实验分析

上述分析中，用 Lena 和 Barbara 图像验证了本文参数估计方法的正确性，为了进一步说明算法的可靠性，

在 Matlab7.0 环境下,进行了大量模糊图像的运动方向、运动像素的检测和恢复实验,现选取 2 幅典型模糊图像的还原实验来进行分析说明。

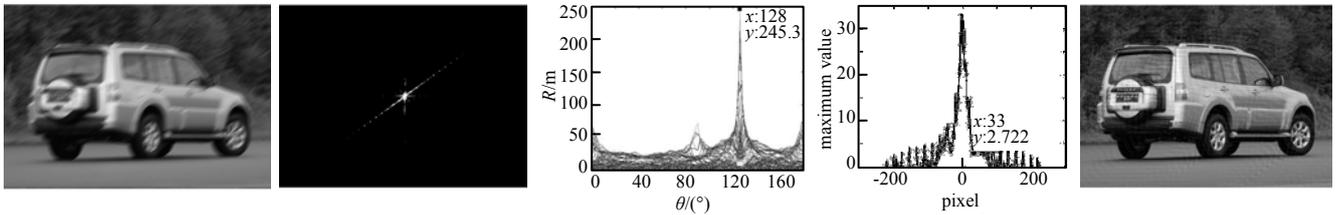


Fig.9 Parameter detection method of motion blur images and image restoration
图 9 car 模糊图像运动参数检测及图像复原

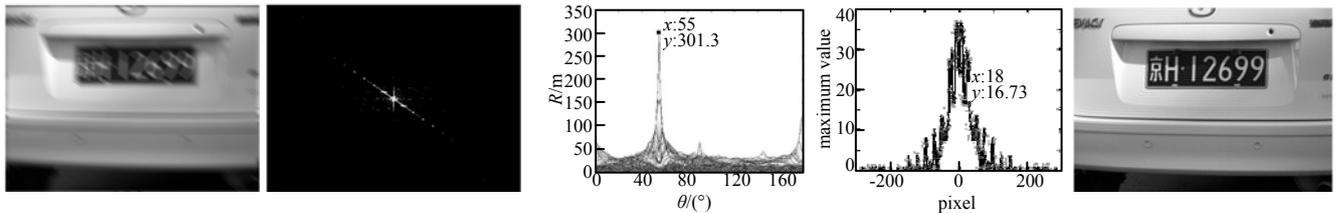


Fig.10 Parameter detection method of license-plate motion blur images and image restoration
图 10 license-plate 模糊图像运动参数检测及图像复原

图 9 对 car 图像(782×1173)运动方向角 $\phi=36^\circ$, 运动尺度为 30 像素的运动模糊图像进行了仿真,给出了二值化后的二次傅里叶对数谱、2 组 Radon 变换极值曲线,由 Radon 极值曲线可知, $\theta=126^\circ, d=33$, 由式(11)、式(8)分别得出运动方向角 $\phi=36^\circ$, 运动像素 $l=31$, 运动方向误差为 0, 运动像素误差为 1 像素。图 9 也给出了用该鉴别值对模糊图像进行维纳滤波复原的结果,与原图像相似度为 95%,其效果较好。

为了研究该算法在模糊运动方向角 $\phi \in [0, \pi/2]$ 和 $\phi \in (\pi/2, \pi]$ 2 个区间的有效性,图 10 对 license-plate 图像(959×1279)运动方向角 $\phi=145^\circ$, 运动尺度为 60 像素的运动模糊图像进行了仿真,由 Radon 极值曲线可知, $\theta=55^\circ, d=18$, 那么 $\phi=145^\circ$, 运动像素 $l=59$, 运动方向误差为 0, 运动像素误差为-1 像素,与原图像相似度为 96%,复原后图像效果较好。

表 1 car 模糊图像运动方向检测结果

motion scale/pixel	$\phi /(^{\circ})$				
	0	30	60	90.0	120
10	0	30	60	90.5	120
15	0	30	60	90.0	120
20	0	30	60	90.0	120
25	0	30	60	90.0	120

表 2 license-plate 模糊图像运动方向检测结果

motion scale/pixel	$\phi /(^{\circ})$				
	0	30	60	90.0	120
10	0	30	60	90.0	120
15	0	30	60	89.5	120
20	0	30	60	90.0	120
25	0	30	60	90.0	120

表 3 car 模糊图像运动尺度检测结果

$\phi /(^{\circ})$	motion scale/pixel				
	10	15	20	25	30
0	10.7	15.1	21.0	24.3	31.4
30	10.3	15.0	20.5	24.7	31.0
90	10.0	15.3	21.2	25.3	30.8
120	10.2	14.8	21.4	25.1	31.2

表 4 license-plate 模糊图像运动尺度检测结果

$\phi /(^{\circ})$	motion scale/pixel				
	10	15	20	25	30
0	11.3	15.1	20.6	25.1	31.6
30	10.6	15.6	19.8	25.7	30.2
90	10.1	14.7	20.4	24.7	30.4
120	11.0	15.2	21.2	25.4	30.9

car 和 license-plate 在不同模糊参数下,运动方向和运动像素检测的实验数据如表 1~表 4,由实验数据可验证本算法在不同大小图像的运动方向检测误差在 0.5° 的范围之内,运动像素检测误差在 2 像素范围之内,图像恢复质量好。

5 结论

为了提高运动模糊图像的运动方向和运动像素的检测精确度,本文从频谱分析角度出发,推导并分析了暗条纹宽度、图像大小、条纹倾斜角度与运动尺度、运动像素之间的关系;采用二次傅里叶变换的方法细化亮条纹后,分析了频谱中十字亮线产生的原因及位置,在不影响频谱图以及目标对象在水平和垂直方向运动的检测的情况下提出了一种新的去除十字亮线的方法,有效去除由于图像纹理产生的十字亮线,对处理后的频谱进行 Radon 变换,根据变换结果得出模糊图像的运动方向和运动像素。

参考文献：

- [1] 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. (WANG Xiaohong,ZHAO Rongchun. Estimating the PSF of motion-blurred images[J]. Computer Applications, 2001,21(9):40-41.)
- [2] 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. (LE Xiang,CHENG Jian,LI Min. Improved approach to motion blur identification based on Radon transform[J]. Infrared and Laser Engineering, 2011,40(5):963-969.)
- [3] Moghaddam M E,Jamzad M. Finding point spread function of motion blur using radon transform and modeling the motion length[J]. Signal Processing and Information Technology, 2005:862-866.
- [4] JI Hui,LIU Chaoqiang. Motion blur identification from image gradient[C]// Processing of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition,Anchorage. Anchorage,AK:IEEE, 2008:1-8.
- [5] Masayuki Tanaka,Kenichi Yoneji,Masatoshi Okutomi. Motion blur parameter identification from a linearly blurred image[C]// International Conference on Consumer Electronics,Digest of Technical Papers. Las Vegas,NV:IEEE, 2007:1-2.
- [6] 周玉,彭召意. 运动模糊图像的维纳滤波复原研究[J]. 计算机工程与应用, 2009,45(19):181-183. (ZHOU Yu,PENG Zhaoyi. Study on Wiener filtering for restoration of motion blurred image[J]. Computer Engineering and Applications, 2009,45(19):181-183.)
- [7] 高梅,陈树越. 匀速直线运动模糊图像的恢复[J]. 计算机工程与应用, 2004,40(31):59-60. (GAO Mei,CHEN Shuyue. Restoration of the image blurred by motion at arbitrary direction[J]. Computer Engineering and Applications, 2004,40(31): 59-60.)
- [8] 孔勇奇,卢敏,潘志庚. 频谱预处理模糊运动方向鉴别的改进算法[J]. 中国图象图形学报, 2013,18(6):637-646. (KONG Yongqi,LU Min,PAN Zhigeng. Motion blur direction detection based on pre-processing of spectrum image[J]. Journal of Image and Graphics, 2013,18(6):637-646.)
- [9] 范海菊,刘艳芳,冯乃勤. 运动模糊图像点扩散函数参数识别的新方法[J]. 计算机工程与应用, 2011,47(30):188-223. (FAN Haiju,LIU Yanfang,FENG Naiqin. New parameter identification method of point spread function from motion blurred image. Computer Engineering and Applications, 2011,47(30):188-223.)

作者简介：



唐春菊(1984-), 女, 四川省南充市人, 硕士, 讲师, 主要研究方向为认知无线电技术及图像处理.
email:tangchunju@126.com.