

文章编号:1007-2780(2014)05-0751-05

运动模糊图像点扩散函数的频谱估计法

贤 光^{1,2*}, 颜昌翔¹, 张新洁¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 在深入研究无噪声情况下的匀速直线运动模糊图像的点扩散函数特性, 提出一种基于频域的识别运动模糊图像模糊方向和模糊长度的算法。分析了对模糊图像频谱图出现平行暗条纹的原因, 从理论和实验说明暗条纹的方向与模糊方向垂直的特性, 并采用 RADON 变换法检测这些暗条纹, 给出精确的数值估算方法。采用 SOBEL 算子对模糊图像进行一阶微分运算, 求其自相关鉴别曲线, 并估算出其模糊长度。仿真分析结果表明, 该算法可以准确地识别图像运动模糊参数, 其模糊角度绝对误差不超过 2° , 模糊长度绝对误差不超过 1 个像素。

关键词: 运动模糊; 点扩散函数; Radon 变换; 频域估计

中图分类号: TH741; TP391.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/YJYXS20142905.0751

Motion-blurred image point spread function estimation method based on spectral analysis

XIAN Guang^{1,2*}, YAN Chang-xiang¹, ZHANG Xin-jie¹

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,*
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)*

Abstract: This paper studied the characteristics of uniform linear motion blurred image of the point spread function in noiseless case, and proposed an algorithm which identify the direction of motion-blurred image blur and blur length in frequency domain. Firstly, the causes of parallel dark stripes appeared in blurred image spectrogram were analyzed, and the characteristics of the direction of dark stripes perpendicular to fuzzy orientation were explained both in the theoretical and experimental methods. Then the RADON transform method was used to detect these dark stripes, for giving precise numerical estimation method. The SOBEL operator was used as first-order differential operators to the fuzzy image, to seek its autocorrelation curve, and estimates its blur length. The simulation analysis shows that the algorithm can accurately identify the image motion blur parameters, the absolute error of angle and length does not exceed 2° and 1 pixel, respectively.

Key words: motion-blur; point spread function; Radon transform; frequency domain estimation

收稿日期: 2013-12-23; 修订日期: 2014-01-20.

基金项目: 国家 863 高新技术发展资助 (No. 2011AA12A103); 中国地质调查局工作项目 (No. 1212011120227)

* 通信联系人, E-mail: xg1004@163.com

1 引言

图像去运动模糊是图像恢复中的一个重要课题。如果在曝光瞬间,目标影像与探测器之间存在相对影像运动,拍摄到的图像便是运动模糊图像。运动模糊在实践中经常会遇到,大到航空拍摄小到日常相机拍照等,其中以匀速直线运动最为常见。匀速直线运动模糊图像的点扩散函数由模糊方向和模糊长度确定。前人在模糊辨识问题上取得了很大的发展^[1-2],例如,He 等^[3]设计了一种自适应 Adaline Network 来估计运动模糊尺度,由于该方法需要原始清晰图像的模糊尺度的初始粗略估计值作为网络输入量,使其应用时有一定局限性。郭永彩等^[4]提出了一种在倒谱域鉴别运动模糊参数的方法。李楠等^[5]根据倒数矩阵自相关的曲线特征来估计模糊参数。

本文主要根据运动模糊图像和原始图像在频谱上存在对应关系,用 RADON 变换确定运动模糊的方向,并用微分自相关法估算模糊长度。最后仿真试验,模糊角度检测绝对误差不超过 2° ,模糊长度估计绝对误差不超过 1 像素,证明该估计算法比较准确。

2 匀速直线运动模糊图像的点扩散函数

当曝光时间很短时,像点的运动可看做是匀速直线运动,即经过匀速直线运动清晰图像退化成模糊图像,忽略噪声影响,其退化降值过程可表示为:

$$g(x, y) = f(x, y) \times h(x, y), \quad (1)$$

其中: $f(x, y)$ 是清晰图像, $g(x, y)$ 是模糊图像, $h(x, y)$ 是点扩散函数 (PSF)。实践证明匀速直线运动的模糊核是矩形函数^[6]。曝光时间 t 内图像在角度 θ 方向上移动像素数为 σ 的运动模糊点扩散函数为:

$$h(x, y) = \begin{cases} \frac{1}{\sigma}, y = x \tan \theta, 0 \leq x \leq \sigma \cos \theta \\ 0, y \neq x \tan \theta, -\infty \leq x \leq +\infty \end{cases}. \quad (2)$$

由式(2)可知,运动模糊有 2 个参数,模糊长度 σ 和运动方向 θ 。如果运动方向已知,则可以通过图像旋转,将运动模糊方向旋转到水平方向,那么对应的点扩散函数也随之变为一维的,大大降

低了运动模糊图像恢复的难度。由式(2)计算水平匀速直线运动模糊的 PSF 为:

$$h(x, y) = \begin{cases} \frac{1}{\sigma}, y = 0, 0 \leq x \leq \sigma \\ 0, y \neq 0, -\infty \leq x \leq +\infty \end{cases}. \quad (3)$$

则点扩散函数的傅里叶变换如下:

$$H(u, v) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} h(x, y) e^{-j2\pi(ux+vy)} dx dy = \int_0^\sigma \frac{1}{\sigma} e^{-j2\pi ux} dx = \frac{1}{\sigma} \cdot \frac{e^{-j2\pi ux}}{-j2\pi u} \Big|_0^\sigma = \frac{\sin(\pi u \sigma)}{\pi u \sigma} e^{-j\pi u \sigma}. \quad (4)$$

那么其幅度值为:

$$|H(u, v)| = \left| \frac{\sin(\pi u \sigma)}{\pi u \sigma} \right|. \quad (5)$$

幅度值曲线图如图 1 所示。可以看出 $H(U, V)$ 频谱图的过零点都是以 $1/\sigma$ 为间隔,且幅值呈递减趋势。

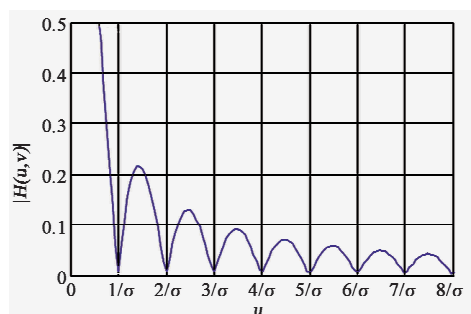


图 1 $|H(u, v)|$ 曲线图

Fig. 1 Curve of $|H(u, v)|$

3 频域参数估计算法

以水平方向匀速直线运动模糊图像为例。由式(1)、(3),做傅里叶变换,可得在频域中模糊图像:

$$G(u, v) = F(u, v) \cdot H(u, v). \quad (6)$$

由于传输函数零点的存在,可推知模糊图像的频谱上有一系列的平行暗条纹,并且条纹的位置对应于零点。由图像的运动分析可知变换得到的频域存在周期性的零值条纹^[7-8],运动方向与零值条纹的方向垂直,运动尺度也和条纹的位置有关,故通过检测暗条纹的方向可得到模糊运动方向。本文首先采用 Radon 变换方法来精确测出模糊退化函数的模糊角度。

对于一幅图像(二维函数),Radon 变换可以

具体计算函数在某个方向上的几何投影,这种投影就是对函数在该方向上进行线积分。Radon 变换的二维形式定义如下(沿角度 θ 方向):

$$R_{\theta}(x') = \int f(x' \cos \theta - y' \sin \theta, x' \sin \theta + y' \cos \theta) dy'. \quad (7)$$

当投影方向存在长直线,对应的 $R(x)$ 将取得最大值^[9]。利用这一性质,对 $G(u, v)$ 的频谱图做 $0 \sim 180^\circ$ 的 Radon 变换,取每个角度上 Radon 变换的极大值。由极大值形成的曲线,可取曲线上最大值对应的角度即为所求的运动方向,采用标准差曲线来鉴别。

在运动方向上模糊图像的背景像素点具有很强的相关性,即沿着运动模糊的轨迹,背景像素点的灰度值逐渐变化或者不变^[10]。对于模糊长度的估计,先对模糊图像进行一阶微分,然后进行自相关运算,可得一条鉴别曲线,曲线上会出现对称的相关峰,峰值为负,两相关峰之间的距离等于运动模糊长度。

4 实验仿真

4.1 检测模糊角度

为了验证上述算法的可靠性和通用性,以典型图像 Lena、Baboon、Airplane 作为实验对象,运动方向在 $0 \sim 180^\circ$ 连续取值,步长取为 1° 。若要提高运算的精度,可在上述结果的 $\pm 1^\circ$ 范围之内采用较小的步长进行精计算,例如步长设为 $0.1^\circ, 0.01^\circ$ 。

表 1 运动模糊角度的估计结果

Tab. 1 Results of motion blur angle estimation

Actual angle	Lena		Baboon		Airplane	
	Measured angle	Error	Measured angle	Error	Measured angle	Error
0	0	0	0	0	0	0
10	10	0	11	1	10	0
30	32	2	30	0	31	1
45	45	0	45	0	45	0
60	60	0	60	0	59	-1
90	90	0	90	0	90	0
120	120	0	119	-1	120	0
145	146	1	145	0	144	0
160	160	0	159	-1	160	0
180	180	0	180	0	180	0

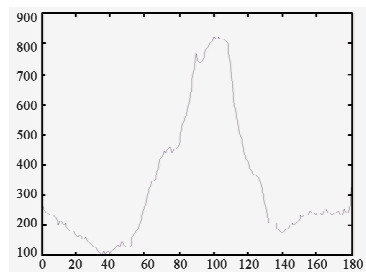
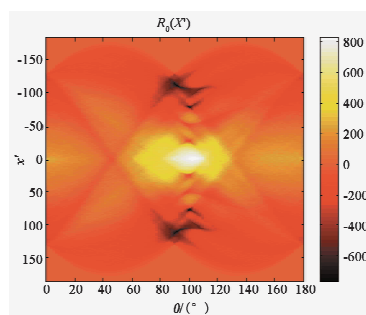
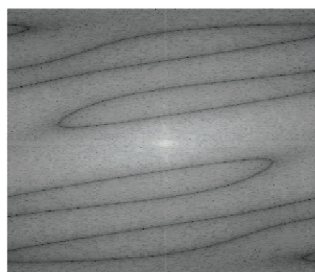


图 2 $\theta=100^\circ, \sigma=10$ 时 Baboon 图的运动模糊角度估计过程

Fig. 2 Estimation of motion blur angle of Baboon

首先对预处理后的频谱图进行二值化的阈值处理,然后在极坐标系 $R-\theta$ 中进行 Radon 变换,

得到 Radon 变换最大值对应的角度。运动模糊角度的估计结果如表 1 所示。

由表 1 中的测试数据表明,该算法大多数情形下都能准确识别出运动方向,个别情况出现较大的误差。 30° 时,有识别的绝对误差值最大为 2° 。图 2(a、b、c、d)为 $\theta=100^\circ, \sigma=10$ 时,Barboon 图的模糊角度估算过程。表 1 中其他示例图像模糊角度值估算曲线类似,不予一一列出。

4.2 估算模糊长度

采用 Sobel 算子对模糊图像进行一阶微分运算,得到其自相关曲线。利用 MATLAB 的 Data Cursor 可以测得两负峰之间的距离。该仿真测得值与理论值较精确吻合。

表 2 运动模糊长度的估计结果

Tab. 2 Results of motion blur length estimation

Actual length	Measured length	Error
10	10	0
20	20	0
30	31	1
40	40	0
50	49	-1
60	60	0
80	80	0
100	100	0
120	120	0

表 2 中的测试数据(Airplane 为例)表明,该算法能准确地估算模糊长度,其绝对误差不超过 1 个像素。以表 2 数据为例,模糊长度为 50 时的

自相关曲线图,如图 3 所示。其他模糊长度值的曲线图与其类似,不予一一列出。

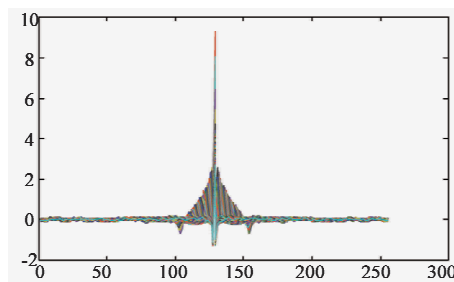


图 3 $\sigma=50$ 时的自相关曲线

Fig. 3 Autocorrelation curves of $\sigma=50$

采用本文算法来估计运动模糊退化函数的模糊角和模糊长度与传统频谱测定法相比,测定精度上有一定优势。有了运动参数,可以建立任意方向直线运动模糊图像的二维点扩散函数的表达。

5 结 论

本文给出了基于频域,利用 RADON 变换和 SOBEL 算子的运动模糊图像的点扩散函数参数的改进估计算法,实验证明了其精确性和有效性,其模糊角度绝对误差不超过 2° ,模糊长度绝对误差不超过 1 个像素。该算法易于理解和操作,实用性较广,具有一定的研究价值。但是这种方法也存在一些不足,即对于低信噪比图像的估计不理想。但总体来说,该算法性能较好,对图像恢复及其他相关领域的研究具有重要意义。

参 考 文 献:

- [1] Moghaddam M E. Finding point spread function of motion blur using Radon transform and modeling the motion length [C]. *Proceedings of the Fourth IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology*, 2004:314-317.
- [2] Sun H W, Michel. Motion blur adaptive identification from natural image model [C]. *16th IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, 2009: 137-140.
- [3] 李海森,张艳宁,姚瑞,等.基于主成分分析的直线运动模糊参数估计[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(10):2656-2663. Li H S, Zhang Y N, Yao R. Parameter estimation of liner motion blur based on principal component analysis [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(10):2656-2663. (in Chinese)
- [4] 郭永彩,郭瑞瑞,高潮.运动模糊图像点扩散函数的参数鉴别[J]. *仪器仪表学报*, 2010, 31(5):1052-1057. Guo Y C, Guo R R, Gao C. Identification of blur parameters from motion blurred images [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2010, 31(5): 1052-1057. (in Chinese)
- [5] 李楠,路小波.散焦和运动模糊复合模型及参数估计[J]. *仪器仪表学报*, 2011, 32(11):2523-2529.

- Li N, Lu X B. Hybrid model and parameter estimation combining defocus and motion blur [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2011, 32(11): 2523-2529. (in Chinese)
- [6] 廖永忠,蔡自兴,何湘华.快速运动模糊图像盲解卷积算法[J].光学精密工程,2013,21(10):2688-2695.
Liao Y Z, Cai Z X, He X H. Fast algorithm for motion blurred image blind deconvolution [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(10): 2688-2695. (in Chinese)
- [7] 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].中国图像图形学报,2013,18(6):637-646.
Kong Y Q, Lu M, Pan Z G. Motion blur direction detection based on pre-processing of spectrum image [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2013, 18(6): 637-646.
- [8] 乐翔,程建,李氏.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 X, Cheng J, Li M. Improved approach to motion blur identification based on Radon transform [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(5): 963-969.
- [9] 赵鹏,曹军等,韦星竹.匀速直线运动模糊图像的模糊参数鲁棒识别[J].光学精密工程,2013,21(9):2431-2438.
Zhao P, Cao J, Wei X Z, et al. Identification of robust blur parameter for uniform liner motion blurred images. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(9): 2431-2438. (in Chinese)
- [10] 张敏.基于Radon变换的超分辨率运动模糊图像恢复[D].成都:西南交通大学,2009:26-36.
Zhang M. The super-resolution restoration of motion blurred images based on Radon transform [D]. Chengdu: Southwest Jiao Tong University, 2009: 26-36.

作者简介:贤光(1988—),女,内蒙古乌兰浩特人,博士研究生,主要从事航空成像质量研究。E-mail: xg1004@163.com
颜昌翔(1973—),男,湖北洪湖人,研究员,博士生导师,主要从事空间光学遥感技术方面的研究。E-mail: yancx@ciomp. an. cn