

基于 Radon 变换的运动模糊图像恢复

廖永忠^{1,2*}, 蔡自兴¹, 何湘华²

(1. 中南大学 信息科学与工程学院, 长沙 410081; 2. 湖南第一师范学院 信息科学与工程系, 长沙 410205)

(* 通信作者电子邮箱 lyz031608@126.com)

摘要:提出了一种快速自然运动模糊图像恢复算法,采用一种新的基于 Radon 变换算法来确定模糊核函数;在确定模糊核函数后,对于模糊图像的恢复采用了一种改进的基于 l_1 范数和 l_2 范数混合保真项的变分图像恢复算法。实验结果表明,与 Fergus 的算法和 Levinss 的算法比较,所提算法对于一类线性运动占主要因素的强噪声模糊图像的恢复具有更快的速度和良好的恢复效果。

关键词:去卷积;运动模糊;保真项;全变分

中图分类号: TP391.4 **文献标志码:** A

Motion blurred image blind restoration based on Radon transform

LIAO Yongzhong^{1,2*}, CAI Zixing¹, HE Xianghua²

(1. School of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha Hunan 410002, China;

2. Department of Information Science and Engineering, Hunan First Normal University, Changsha Hunan 410205, China)

Abstract: In this paper, a fast blind restoration algorithm for motion blurred image was proposed, using a robust algorithm based on Radon transform-domain to determine the blur kernel function, then a modified total variation algorithm was used to restore the blurred images. Its cost function is the sum of three terms corresponding to total variation l_2 -norm regularization, least squares fidelity term and l_1 -norm fidelity term. Compared with Fergus' and Levin' algorithm, the experiment results show that the algorithm for a class of motion blurred image caused by the linear movement parallel to the lens has higher speed and good recovery effect.

Key words: deconvolution; motion blur; data fidelity term; total variation

0 引言

运动模糊图像是由于相机与场景的相对运动形成的一种图像降质的现象,其降质过程的数学模型可以看成是一个数学的卷积^[1]:

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

其中: $g(x, y)$ 指观测的降质图像; $f(x, y)$ 为要恢复的清晰图像; $h(x, y)$ 为模糊核函数(点扩散函数(Point Spread Function, PSF)); $n(x, y)$ 为噪声,一般假定 $n(x, y)$ 为零均值的高斯噪声。这里假设降质过程是一个空不变过程,即 $h(x, y, x', y') = h(x - x', y - y')$, 很明显,由式(1)可推出其频率域模型为:

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

从式(2)可以看出图像去模糊是一个数学上的反问题,模糊核函数反映了图像模糊过程的本质,对模糊核函数的准确建模和估计,在图像去模糊过程中,占有十分重要的作用。

图像去模糊技术是图像处理研究的难点和热点问题,图像去模糊可以分为已知模糊核函数的去模糊(直接去卷积)和未知模糊核函数的图像去模糊(盲去卷积)。一般来说,准确地获取模糊核函数是比较困难的,因此,对于实际图像去模糊,通常先估计模糊核函数,然后利用直接去卷积的方法恢复

模糊图像。

对于模糊核函数的估计,已经有很多学者进行较深入的研究,从早期的建立降质过程的数学模型然后估计模型参数的方法到最新的基于统计先验知识的模糊核函数的确定,一些新的研究成果不断出现。2006 年, Fergus 等^[2]提出一种基于多尺度贝叶斯模型的模糊核函数估计算法,利用自然图像的梯度的统计先验知识即其统计特性服从重尾分布和模糊核函数的稀疏特性,完成对模糊核函数的估计; Levin 等^[3]采用贝叶斯理论,证明求解最大边缘概率密度函数可以确定模糊核函数; Shan 等^[4]提出一种基于贝叶斯理论的自然图像局部统计先验知识和全局统计先验知识相结合的模糊核函数估计算法; Xu 等在文献[5]提出一种基于“信息边界”的模糊核函数估计算法; Cho 等在文献[6]中提出了一种基于二色模型的图像直线边界的 radon 变换的模糊核函数估计算法;针对噪声影响模糊函数估计准确性的问题, Zhong 等^[7]提出一种基于方向滤波的模糊核函数估计算法。基于统计先验知识的算法特点是计算复杂,但是对模型要求较低, Dobeš 等^[8]提出了一种快速的估计模糊核函数的算法,这是一种基于参数估计的模糊核函数估计算法,通过辨识运动模糊图像的频谱图的暗纹,实现模糊核函数估计。

一般来说,实际运动模糊图像的频谱暗纹并不清晰,这是

收稿日期: 2014-01-15; 修回日期: 2014-03-05。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(91220301, 61175064); 湖南省教育厅一般科研项目(14C0244)。

作者简介: 廖永忠(1975-), 男, 湖南常德人, 副教授, 博士研究生, 主要研究方向: 信号处理; 蔡自兴(1938-), 男, 福建莆田人, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 智能控制、模式识别; 何湘华(1977-), 女, 湖南常德人, 硕士, 主要研究方向: 多媒体技术。

由于实际运动模糊过程的复杂性所决定。本文提出了一种新的基于参数估计的模糊核函数估计算法,采用一种改进的变分去卷积算法,实现对模糊图像的快速恢复。

1 原理与模型

对于运动模糊图像,由于相机曝光时间相对较短,考虑在曝光时间内相机与场景的相对运动可以近似认为是匀速直线运动,模糊核函数的数学模型^[9]为:

$$h(x,y) = \begin{cases} 0, & y \neq x \tan \theta, -\infty \leq x \leq \infty \\ 1/L, & y = x \tan \theta, \text{且 } 0 \leq x < L \cos \theta \end{cases} \quad (3)$$

考虑 $f(x,y)$ 为离散 $M \times N$ 矩阵,则模糊核频谱^[9-10]为:

$$H(u,v) = \frac{\sin\left(\pi L\left(\frac{u \cos \theta}{M} + \frac{v \sin \theta}{N}\right)\right)}{\pi L\left(\frac{u \cos \theta}{M} + \frac{v \sin \theta}{N}\right)} \quad (4)$$

其中: L 为模糊长度, θ 为模糊方向。可以看出,模糊核函数的频谱是 sinc 函数,周期性零点的存在使得频谱图上表现为暗纹,如图 1 所示,识别这些暗纹的间隔和方向,就能确定 L 和 θ ,从而能够确定模糊核函数。

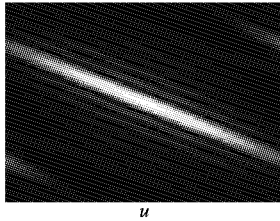


图1 直线匀速运动模糊核函数频谱图

2 模糊核的估计

识别频谱图中的暗纹可以确定去模糊长度和模糊方向,实现模糊核函数的估计。Sakano 等^[9]提出一种对小信噪比运动模糊核函数的估计,但其计算比较复杂。本文提出了一种新的基于 Radon 变换确定模糊函数的方法,在小信噪比和小模糊长度下仍然能较好的识别模糊核参数。

2.1 Radon 变换

对一个二维图像, Radon 变换可以看成图像 $f(x,y)$ 沿与 x 轴夹角 $\theta \in [0, 180^\circ]$ 的积分线 l 的一维投影,如图 2 所示,其数学表达式为:

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

式中 b 表示积分线到坐标原点的距离。对 $|G(u,v)|$ 求 Radon 变换有:

$$R_{|G|}(b, \theta) = \int_{-\infty}^{\infty} |G(b \cos \theta + \tau \sin \theta, b \sin \theta - \tau \cos \theta)| d\tau \quad (6)$$

在频率坐标 (u,v) 内,积分斜线方程可以表示为:

$$b = u \cos \theta + v \sin \theta$$

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ \sin \theta & -\cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b \\ \tau \end{bmatrix}$$

2.2 模糊方向估计

大量自然图像统计特性显示,图像的频谱有如下的先验知识,即在频率空间有 $\lg|F(u, u \tan \varphi)| \simeq -\alpha|u|^\beta$ ^[11],令 $F_d = \lg|F(u, u \tan \varphi)|$,故其沿 $v = u \tan \varphi$ 是单调递减的函

数,式中 $\alpha > 0, \beta > 0$,一般来说,其 α, β 值在一幅图中近似为常数。所以自然图像的频谱沿 $v = u \tan \varphi$ 特性是独立于 φ 角度的;也就是说其截面形状与截面的角度无关,如图 3 所示。

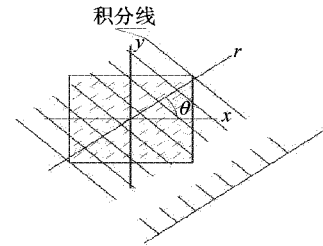


图2 Radon 变换

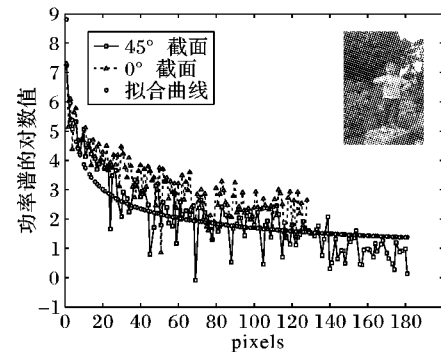


图3 频谱图像一维截面(只显示正部)

设

$$F_d = \begin{bmatrix} F_{11} & F_{12} & \cdots & F_{1n} \\ F_{21} & F_{22} & \cdots & F_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ F_{m1} & F_{m2} & \cdots & F_{mn} \end{bmatrix} \quad (7)$$

由 $G(u,v) = F(u,v)H(u,v)$, $H(u,v)$ 是一个近似 sinc 函数,令

$$R_{|G|}(b, \theta) = \begin{bmatrix} R_{b_1\theta_1} & R_{b_1\theta_2} & \cdots & R_{b_1\theta_n} \\ R_{b_2\theta_1} & R_{b_2\theta_2} & \cdots & R_{b_2\theta_n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ R_{b_m\theta_1} & R_{b_m\theta_2} & \cdots & R_{b_m\theta_n} \end{bmatrix} \quad (8)$$

可以构造其均值矩阵为

$$\overline{R_{|G|}(\theta)} = \begin{bmatrix} \overline{R_{\theta_1}} & \overline{R_{\theta_2}} & \cdots & \overline{R_{\theta_n}} \\ \overline{R_{\theta_1}} & \overline{R_{\theta_2}} & \cdots & \overline{R_{\theta_n}} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \overline{R_{\theta_1}} & \overline{R_{\theta_2}} & \cdots & \overline{R_{\theta_n}} \end{bmatrix}$$

式中 $\overline{R_{\theta_i}} = E([R_{b_1\theta_i}, R_{b_2\theta_i}, \dots, R_{b_m\theta_i}]^T)$ 。

令

$$MR(\theta) = R_{|G|}(\theta) - \overline{R_{|G|}(\theta)} = \begin{bmatrix} MR_{\rho_1\theta_1} & MR_{\rho_1\theta_2} & \cdots & MR_{\rho_1\theta_n} \\ MR_{\rho_2\theta_1} & MR_{\rho_2\theta_2} & \cdots & MR_{\rho_2\theta_n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ MR_{\rho_m\theta_1} & MR_{\rho_m\theta_2} & \cdots & MR_{\rho_m\theta_n} \end{bmatrix} \quad (9)$$

通过对上述分析,可以建立一个新的代价函数来确定模糊方向,即

$$\hat{\theta} = \arg \max_{\theta} \|MR(\theta_i)\|_1 \quad (10)$$

2.3 模糊长度的估计

估计好模糊方向 θ 后,然后就可以把频谱图像旋转角度,让暗纹处于水平方向,就可用来求水平匀速运动模糊长度的方法来求模糊长度。由式(4)可知模糊核函数的频谱是一个 $\text{sinc}(x)$ 函数,且模糊长度与条纹间距成比例关系,对频谱矩阵每列累加求和,得到一个形状近似的 sinc 函数的向量,如图4所示,选择一种启发式算法^[10,12]确定模糊长度,计算 $\tilde{L} = M/d$ 作为模糊长度估计值。

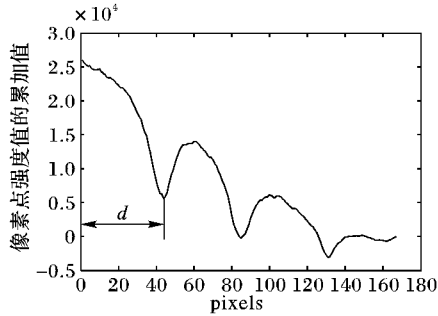


图4 频谱旋转 θ_i 角度后每列累加后的图形

2.4 合成模糊图像的测试

本文从 Berkeley Image database 数据库中选择的 160068 作为测试图像^[13],如图5所示,用 Matlab 生成运动模糊核函数,与图像相卷积,然后加入高斯白噪声,用本文的算法估计

信噪比分别是 6 dB 和 20 dB 模糊图像的模糊方向和模糊长度,与 Cepstrum 算法^[14]进行对比,实验结果如表1所示。从表中可见,本文的算法在较小信噪比和小模糊长度下对模糊核函数的模糊参数的识别效果要优于 Cepstrum 算法。

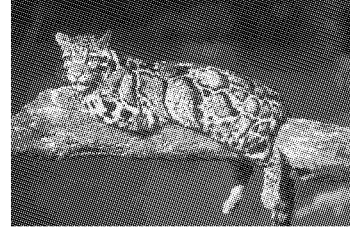


图5 人工模糊测试图像

3 模糊图像直接去卷积

在确定模糊核函数后,模糊图像的恢复就是一个去卷积的过程,一般来说,此类方程是病态的。求解此类方程方法很多,如简单而高效的 Richardson-Lucy (RL) 算法^[15]、正则化方法^[16]、全变分方法^[17]等。文献[2]采用的是 RL 算法,本文算法的模糊核函数采用线性核函数来近似实际模糊核函数,会产生核函数误差,而 RL 算法对核函数误差很敏感;而且噪声会进一步加大求解此类问题的病态性。因此本文算法要求非盲解卷积算法有很好的鲁棒性,这里提出了一种改进的全变分的算法,实验结果证明此算法能显著改善恢复的效果。

表1 模糊长度和模糊方向的估计值

PSNR	L	$\theta = 20^\circ$		$\theta = 40^\circ$		$\theta = 60^\circ$		$\theta = 80^\circ$	
		本文算法	Cepstrum 算法	本文算法	Cepstrum 算法	本文算法	Cepstrum 算法	本文算法	Cepstrum 算法
6 dB	4	6/18	37/102	6/34	0/0	5/43	33/78	6/82	13/138
	6	6/18	35/52	7/39	69/92	6/52	25/31	7/81	55/59
	8	8/20	80/86	8/39	52/81	8/59	52/81	8/81	59/105
	12	12/23	23/29	11/39	53/135	13/61	55/71	12/81	52/81
	20	19/21	33/54	20/39	52/81	18/61	19/73	18/80	40/11
20 dB	4	5/10	46/120	5/35	64/7	5/63	58/37	5/88	71/1
	6	6/20	16/90	6/40	52/65	6/59	14/94	6/81	12/76
	8	8/19	76/85	8/39	78/87	8/59	31/88	8/80	16/86
	12	12/20	12/20	11/39	12/42	12/60	13/61	12/80	12/81
	20	20/20	20/40	20/40	20/40	20/60	20/60	20/80	19/81

3.1 全变分模型

对于图像模糊方程(1),全变分优化模型为:

$$\tilde{f} = \min_f J(f) = \|h(x, y) \otimes f(x, y) - g(x, y)\| + \lambda \int_{\Omega} |\nabla f(x, y)| dx dy \quad (11)$$

定义图像的梯度 $\nabla f(x, y) = \left(\frac{\partial f}{\partial x}, \frac{\partial f}{\partial y} \right)$, Ω 是图像 $f(x, y)$ 的支持域, λ 为正则化参数, $J(f)$ 为代价函数。这里把图像和它的梯度矩阵表示成表示成向量形式,为简化起见,文中采用 f 和 g 表示, H_T 为模糊算子矩阵, D_x, D_y 为微分算子矩阵, D 为梯度算子矩阵,则:

$$\min_f J(f) = \|H_T f - g\|_2^2 + \lambda \| \sqrt{(D_x f)^2 + (D_y f)^2} \|_1 \quad (12)$$

其中: $\|H_T f - g\|_2^2$ 为保真项, $\lambda \| \sqrt{(D_x f)^2 + (D_y f)^2} \|_1$ 是正则项,令 $H_T f - g = (e_1, e_2, \dots, e_{mn})^T$; $\left(\frac{\partial f}{\partial x}, \frac{\partial f}{\partial y} \right) = D_y f =$

$$(\sigma_{y1}, \sigma_{y2}, \dots, \sigma_{ym \times n})^T; \left(\frac{\partial f}{\partial x} \right) = D_x f = (\sigma_{x1}, \sigma_{x2}, \dots, \sigma_{xm \times n})^T;$$

可以得出:

则

$$\|Df\|_1 = \|\nabla f(x, y)\|_1 =$$

$$\left\| \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y} \right)^2} \right\|_1 = \left\| \begin{matrix} \sqrt{\sigma_{x1}^2 + \sigma_{y1}^2} \\ \sqrt{\sigma_{x2}^2 + \sigma_{y2}^2} \\ \vdots \\ \sqrt{\sigma_{xm \times n}^2 + \sigma_{ym \times n}^2} \end{matrix} \right\|_1 \quad (13)$$

3.2 改进变分模型

由于本文算法的模糊核采用一个线性核函数来近似实际核函数,核函数的误差和噪声的影响使得这个方程是一个严重的病态方程,实验后发现采用标准的全变分模型(保真项为 l_2 范数项)恢复的图像过于光滑,同时产生了严重的对比度失真,基于 l_1 范数保真项的变分模型在对比度保持和非高

噪声的抑制都有很好的效果^[18],本文采用两个加权保真项的方法,模型如下:

$$\min_f J(f) = \|H_T f - g\|_1 + \alpha \|H_T f - g\|_2^2 + \lambda \left\| \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2} \right\|_1 \quad (14)$$

对于基于范数项的全变分模型的求解,很多学者提出了一些不同的算法来求解这类方程^[19],本文采用迭代加权求解的方法。

$$\text{令 } W_{B\xi} = \text{diag} \begin{cases} |e_i|^{\xi-2}, & |e_i| > \varepsilon_b \\ \varepsilon_b^{\xi-2}, & |e_i| \leq \varepsilon_b \end{cases}$$

式中 $\xi = 1$ 或 $\xi = 2$ 。

和

$$W_z = \text{diag} \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{\sigma_{xi}^2 + \sigma_{yi}^2}}, & \sqrt{\sigma_{xi}^2 + \sigma_{yi}^2} > \varepsilon_z \\ 0, & \sqrt{\sigma_{xi}^2 + \sigma_{yi}^2} \leq \varepsilon_z \end{cases} \quad (15)$$

式中: $\varepsilon_b, \varepsilon_z$ 为一个无穷小的阈值,则可以计算得到 $\|H_T f - g\|_{\xi}^{\xi} = \|W_{B\xi}^{1/2} (H_T f - g)\|_2^2$, 同理

$$\left\| \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2} \right\|_1 = \|W_z^{1/2} \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2}\|_2^2$$

可以推出:

$$\begin{aligned} \min_f J(f) &= \|H_T f - g\|_1 + \alpha \|H_T f - g\|_2^2 + \\ &\lambda \left\| \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2} \right\|_1 = \min_f \|W_{B1}^{1/2} (H_T f - g)\|_2^2 + \\ &\alpha \|W_{B2}^{1/2} (H_T f - g)\|_2^2 + \\ &\lambda \|W_z^{1/2} \left(\sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2} \right)\|_2^2 \end{aligned} \quad (16)$$

由 $\tilde{f} = \arg \min_f J(f) \Rightarrow J'(\tilde{f}) = 0$ 可以求出:

$$\begin{aligned} & (W_{B1}^{1/2} H_T)^T W_{B1}^{1/2} H_T \tilde{f} - (W_{B1}^{1/2} H_T)^T W_{B1}^{1/2} g + \\ & \alpha (W_{B2}^{1/2} H_T)^T W_{B2}^{1/2} H_T \tilde{f} - \alpha (W_{B2}^{1/2} H_T)^T W_{B2}^{1/2} g + \\ & \lambda (W_z^{1/2} D)^T (W_z^{1/2} D) \tilde{f} = 0 \\ & \tilde{f} = (H_T^T W_{B1} H_T + \alpha H_T^T W_{B2} H_T + \lambda D^T W_z D)^{-1} (H_T^T W_{B1} + \\ & \alpha H_T^T W_{B2}) g \end{aligned} \quad (17)$$

算法伪代码如下:

1) Initialize

$$f^{(0)} = (H_T^T H_T + \alpha H_T^T H_T + \lambda D^T D)^{-1} (H_T^T + \alpha H_T^T) g$$

2) repeat

(1) update weighted coefficient matrix;

$$W_{B\xi} = \text{diag} \begin{cases} |e_i|^{\xi-2}, & |e_i| > \varepsilon_b \\ \varepsilon_b^{\xi-2}, & |e_i| \leq \varepsilon_b \end{cases}$$

$$W_z = \text{diag} \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{\sigma_{xi}^2 + \sigma_{yi}^2}}, & \sqrt{\sigma_{xi}^2 + \sigma_{yi}^2} > \varepsilon_z \\ 0, & \sqrt{\sigma_{xi}^2 + \sigma_{yi}^2} \leq \varepsilon_z \end{cases}$$

(2) update solver:

$$f^{(k+1)} = (H_T^T W_{B1(k)} H_T + \alpha H_T^T W_{B2(k)} H_T + \lambda D^T W_z D)^{-1} (H_T^T W_{B1(k)} + \alpha H_T^T W_{B2(k)}) g$$

4 实验结果

选取三幅测试图像,如图6所示,在 Matlab 7.0 和 CPU 为 2.2 GHz 下,与文献[2]算法采用与相同的模糊核尺寸进行仿真实验,实验结果如图7所示,实验中选取2次迭代能实现很好的图像恢复效果。

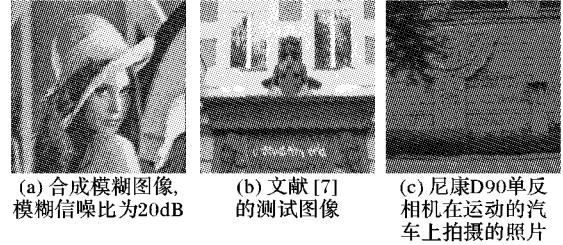


图6 测试模糊图像



图7 几种算法恢复的图像

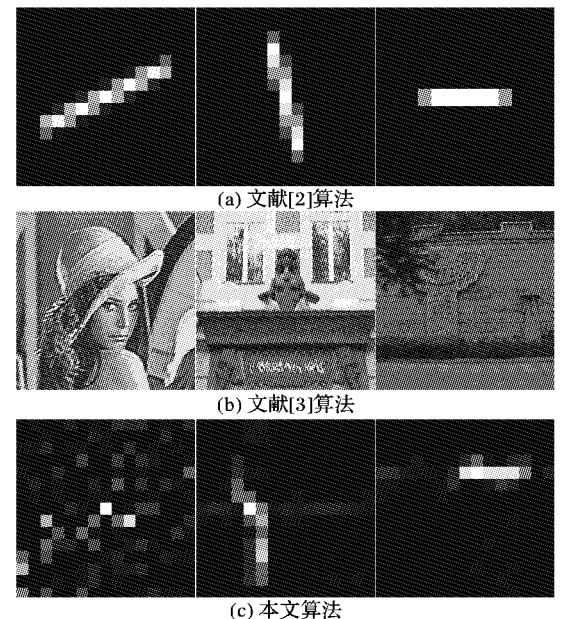


图8 几种算法估计的模糊核函数

与文献[2]和文献[3]算法比较,本文算法计算时间为其

的 $1/10 \sim 1/20$, 而且图像恢复后的视觉效果与其相比略好或大致相当。

5 结语

本文提出了一直基于 Radon 变换模糊核函数的参数估计算法, 在图像恢复算法上, 采用了改进的基于 l_1 范数和 l_2 范数保真项的变分图像恢复算法, 实验结果证明, 本算法有较快的速度和良好的恢复效果, 与文献[2-3]的算法比较, 由于这里把这类运动模糊核简化为一个线性函数, 计算复杂度大大降低; 对于噪声, 由于采用全变分的恢复算法, 在恢复的过程中, 对噪声有较好的抑制作用。

参考文献:

- [1] ZOU M. Deconvolution and signal recovery[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2001: 185-186. (邹谋炎. 反卷积和信号复原[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001: 185-186.)
- [2] FERGUS R, SINGH B, HERTZMANN A, *et al.* Removing camera shake from a single photograph[J]. ACM Transactions on Graphics, 2006, 25(3): 787-794.
- [3] LEVIN A, WEISS Y, DURAND F, *et al.* Efficient marginal likelihood optimization in blind deconvolution[C]// Proceedings of the 2011 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE, 2011: 2657-2664.
- [4] SHAN Q, JIA J, AGARWALA A. High-quality motion deblurring from a single image[J]. ACM Transactions on Graphics, 2008, 27(3): 73.
- [5] XU L, JIA J. Two-phase kernel estimation for robust motion deblurring[C]// Computer Vision - ECCV 2010. Berlin: Springer, 2010: 157-170.
- [6] CHO T S, PARIS S, HORN B K P, *et al.* Blur kernel estimation using the Radon transform[C]// Proceedings of the 2011 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE, 2011: 241-248.
- [7] ZHONG L, CHO S, METAXAS D, *et al.* Handling noise in single image deblurring using directional filters[C]// Proceedings of the 2013 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE, 2013: 612-619.
- [8] DOBEŠ M, MACHALA L, FÜRST T. Blurred image restoration: A fast method of finding the motion length and angle[J]. Digital Signal Processing, 2010, 20(6): 1677-1686.
- [9] SAKANO M, SUETAKE N, UCHINO E. A PSF estimation based on Hough transform concerning gradient vector for noisy and motion blurred images[J]. IEICE Transactions on Information and Systems, 2007, 90(1): 182-190.
- [10] LIAO Y, CAI Z, HE X. Fast algorithm for motion blurred image blind deconvolution[J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(10): 2688-2695. (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.)
- [11] CARASSO A S. Direct blind deconvolution[J]. SIAM Journal on Applied Mathematics, 2001, 61(6): 1980-2007.
- [12] MOGHADDAM M E, JAMZAD M. Motion blur identification in noisy images using fuzzy sets[C]// Proceedings of the 5th IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology. Piscataway: IEEE, 2005: 862-866.
- [13] MARTIN D, FOWLKES C, TAL D, *et al.* A database of human segmented natural images and its application to evaluating segmentation algorithms and measuring ecological statistics[C]// Proceedings of the 8th IEEE International Conference on Computer Vision. Piscataway: IEEE, 2001: 416-423.
- [14] KRAHMER F, LIN Y, MCADOO B, *et al.* Blind image deconvolution: Motion blur estimation[EB/OL]. [2013-10-10]. https://www.ima.umn.edu/2005-2006/MM8.9-18.06/activities/Wohlberg-Brendt/team5_rep.pdf.
- [15] RICHARDSON W H. Bayesian-based iterative method of image restoration[J]. Journal of the Optical Society of America, 1972, 62(1): 55-59.
- [16] MIGNOTTE M. A segmentation-based regularization term for image deconvolution[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2006, 15(7): 1973-1984.
- [17] SROUBEK F, MILANFAR P. Robust multichannel blind deconvolution via fast alternating minimization[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2012, 21(4): 1687-1700.
- [18] SHI Y, YANG X. New total variation regularized L1 model for image restoration[J]. Digital Signal Processing, 2010, 20(6): 1656-1676.
- [19] RODRIGUEZ P, WOHLBERG B. A generalized vector-valued total variation algorithm[C]// Proceedings of the 16th IEEE International Conference on Image Processing. Piscataway: IEEE, 2009: 1309-1312.

(上接第 2004 页)

- [7] SONG G, LIU Y. An adaptive histogram equalization method with enhancing the details[J]. Journal of Shandong University of Technology, 1999, 29(1): 81-85. (宋刚, 刘瑶华. 一种能强化细节的自适应直方图均衡法[J]. 山东工业大学学报, 1999, 29(1): 81-85.)
- [8] LI H, FAN Y, TANG J, *et al.* Method of infrared image enhancement based on regional histogram[J]. Application Research of Computers, 2012, 29(2): 772-776. (李绘卓, 范勇, 唐峻, 等. 一种区域多直方图红外图像增强方法[J]. 计算机应用研究, 2012, 29(2): 772-776.)
- [9] WANG G, ZHONG W. Study on modification and actualization at algorithm of gray image manipulation[J]. Application Research of Computers, 2005, 21(12): 175-176. (王国权, 仲伟波. 灰度图像增强算法的改进与实现研究[J]. 计算机应用研究, 2005, 21(12): 175-176.)
- [10] FAN C, LYU X. Algorithm of histogram equalization with detail preservation[J]. Microcomputer and its Applications, 2010(3): 59-61. (樊春玲, 吕欣. 保持图像细节的直方图均衡算法[J]. 微型机与应用, 2010(3): 59-61.)
- [11] CHEN W, LIAO B, XU X, *et al.* Piecewise histogram equalization based image enhancement[J]. Journal of Communications, 2011, 32(9): 153-160. (陈文飞, 廖斌, 许雪峰, 等. 基于 Piecewise 直方图均衡化的图像增强方法[J]. 通信学报, 2011, 32(9): 153-160.)
- [12] KIM J Y, KIM L S, HWANG S H. An advanced contrast enhancement using partially overlapped sub-block histogram equalization[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2001, 11(4): 475-484.