

文章编号 1004-924X(2013)10-2656-08

# 基于主成分分析的直线运动模糊参数估计

李海森<sup>1\*</sup>, 张艳宁<sup>1</sup>, 姚睿<sup>1</sup>, 孙瑾秋<sup>2</sup>

(1. 西北工业大学 计算机学院, 陕西 西安 710129;

2. 西北工业大学 精确制导与控制研究所, 陕西 西安 710072)

**摘要:**为了快速准确地估计直线运动模糊图像中的模糊参数,分析了直线运动模糊参数的长度和方向在频率域图像和倒谱图像中的表现形式,提出了一种基于主成分分析的运动模糊参数估计方法。首先,基于高斯建模对模糊图像中的倒谱图像进行二值化分割,得到倒谱图像中的亮线区域。然后,基于主成分分析提取亮线区域的主成分分量,主成分分量的方向即为模糊角度;依据估计的模糊角度,计算模糊图像傅里叶频率域图像相应角度的 Radon 变换,进行滤波去“毛刺”处理。最后,通过计算极小值之间的间距,估计模糊长度。实验结果表明:估计的模糊角度和模糊长度平均误差分别为  $0.1384^\circ$  和  $0.2739$  pixel,在同精度条件下,速度是传统的 Radon 变换方法的 10 倍左右,表明该方法能快速、准确地估计直线运动模糊参数。

**关键词:**直线运动模糊;模糊参数估计;主成分分析;Radon 变换

**中图分类号:**TP391.4 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20132110.2656

## Parameter estimation of linear motion blur based on principal component analysis

LI Hai-sen<sup>1\*</sup>, ZHANG Yan-ning<sup>1</sup>, YAO Rui<sup>1</sup>, Sun Jin-qiu<sup>2</sup>

(1. School of Computer Science, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China;

2. Institute of Precision Guidance and Control, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

\* Corresponding author, E-mail: haisenli.nwpu@gmail.com

**Abstract:** To estimate the blur parameter of a linear motion blur image accurately and quickly, this paper analyses how the blur length and direction show in a frequency image and a cepstrum image, respectively, and proposes a motion blur parameter estimation method based on the Principal Component analysis (PCA). Firstly, the cepstrum image of the blur image was segmented in a binaryzation based on the Gaussian distribution modeling, and the highlight line region in the cepstrum image was obtained. Then, the principal component of the highlight line was extracted based on the PCA, and the direction of the principal component was the blur direction. After the blur direction was estimated, the Radon transform of frequency image for the blur image under the estimated direction was calculated, then the result of Radon transform was smoothed to reduce some artifacts. Finally, the blur length was estimated via calculating the interval between the two local-minimas of the Radon trans-

收稿日期:2013-05-10;修订日期:2013-06-07.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61231016, No. 61272288);西北工业大学基础研究基金资助项目(No. JC201120, No. JC201148);西北工业大学翱翔之星计划资助项目(No. 12GH0311)

form. Experiment results indicate that the errors of the estimated blur direction and length are  $0.1384^\circ$  and  $0.2739$  pixel, respectively, and the calculation speed is nearly 10 times faster than that of the traditional estimated method based on Radon method with the same accuracy. It concludes that the proposed method can estimate the blur parameter accurately and rapidly.

**Key words:** linear motion blur; blur parameter estimation; principal component analysis; Radon transform

## 1 引言

在获取图像的过程中,如果成像设备和拍摄目标之间存在相对运动,那么获取到的图像通常是模糊的,这种模糊就叫运动模糊。根据成像设备与被拍摄的物体之间的相对运动形式,运动模糊图像可以分为匀速直线运动模糊、旋转模糊、变速直线运动模糊,以及无规则的运动模糊等<sup>[1]</sup>。在获取图片的时候由于成像设备快门的开启和关闭都是在瞬间完成的,所以快门的曝光时间相对来说是比较短的,成像系统与被拍物体之间的相对运动在曝光时间内可近似看成是匀速直线运动,因此,本文主要针对匀速直线运动模糊进行研究。由于模糊图像对图像的辨读和分析有严重的影响,因此,需要对运动模糊图像进行恢复处理。

对运动模糊图像恢复的方法有很多<sup>[2-6]</sup>,主要包括未知模糊核的盲图像复原算法和已知模糊核的非盲图像复原算法。由于在实际拍摄情况下,往往很难获得引起图像模糊的相对运动信息,因此,需要估计运动模糊图像的模糊核,属于盲图像复原。对于匀速直线运动模糊来说,由于其模糊核可以参数化表示,因此,很多方法都是通过模糊图像首先估计匀速直线运动模糊核的参数(直线运动的角度和距离),再对模糊图像进行恢复处理。

当前匀速直线运动模糊核参数估计的方法主要是利用模糊图像的傅里叶频率特性,基于 Radon 变换或者 Hough 变换估计模糊核参数<sup>[4,7-10]</sup>。如文献[7]基于直线运动在频率的条纹特性,计算频率的梯度图像在各个方向的 Radon 变换,然后通过一定的寻优准则求取直线运动模糊核的方向,最后通过计算条纹图像的间距求解运动距离。文献[9]基于模糊图像的傅里叶倒谱图像所表现的与运动方向垂直的亮条纹信息,通过 Hough 变换求解模糊方向。然而,基于 Radon 变换或者 Hough 变换的这些方法在求解模糊角度

的时候都需要对各个角度进行穷举,其精度受角度采样间隔的限制,因此,对估计结果的精确性要求越高,就需要耗费越长的时间。

为了快速且准确地估计匀速直线运动模糊的参数,本文提出了一种基于 PCA 的匀速直线运动模糊参数的估计方法。首先,对直线运动模糊的成像机理进行分析;然后,基于模糊图像的傅里叶倒谱图像的条纹特性,利用 PCA 估计直线运动的方向;最后,通过计算模糊图像傅里叶频谱在估计方向的 Radon 变换,求解模糊距离。实验结果表明,算法在获得高精度模糊参数估计的同时,大大提高了参数估计的效率。

## 2 直线运动模糊成像机理分析

### 2.1 图像退化模型

直线运动模糊图像的退化模型可以用如图 1 的一个线性模型来表示<sup>[11]</sup>。

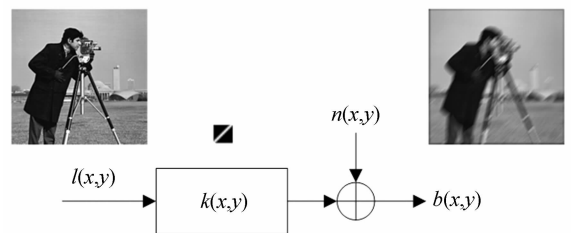


图 1 直线运动模糊图像退化模型

Fig. 1 Degraded model of linear motion blur image

模糊图像  $b(x,y)$  是清晰场景  $l(x,y)$  经由运动模糊核  $k(x,y)$  退化后,再加上成像过程中的随机噪声  $n(x,y)$  得到的。退化模型可以建模为如下形式:

$$b(x,y) = l(x,y) \otimes k(x,y) + n(x,y), \quad (1)$$

式中:  $\otimes$  表示卷积运算。

### 2.2 匀速直线运动模糊核参数化表示

模糊核是成像设备与拍摄目标之间相对运动关系的数学表现形式,假设曝光时间  $T$  内,运动模糊图像的模糊长度为  $M$ ,模糊角度为  $\theta$ ,那么,

模糊核可以由下式表示：

$$k(x,y) = \begin{cases} \frac{1}{M} & \sqrt{x^2+y^2} \leq \frac{M}{2} \text{ and } \frac{y}{x} = \tan \theta \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

可以看出匀速直线运动的模糊核是一个长度为  $M$ ，与水平方向夹角为  $\theta$  的均匀直线。

正因为匀速直线运动模糊核有这种参数化的表现形式，在估计模糊核时，只需要估计出模糊长度和模糊角度即可。

### 2.3 匀速直线运动模糊图像的频率变换计算

在忽略噪声项的情况下，对式(1)进行傅里叶变换可以得到匀速直线运动模糊图像的傅里叶频谱，如下式所示：

$$B(u,v) = L(u,v)K(x,y), \quad (3)$$

其中： $B(u,v)$ ， $L(u,v)$ ， $K(x,y)$  分别为  $b(x,y)$ ， $l(x,y)$ ， $k(x,y)$  的傅里叶变换。

同时，假设在曝光时间中的任一时刻，模糊图像在水平方向( $x$  方向)和垂直方向( $y$  方向)的运动距离分别为  $x(t)$  和  $y(t)$ ，那么，模糊图像可以用下式表示：

$$b(x,y) = \int_0^T l(x-x(t), y-y(t)) dt. \quad (4)$$

对式(4)进行傅里叶变换，并根据傅里叶变换的性质，进行如下推导：

$$\begin{aligned} B(u,v) &= \iint_{-\infty}^{+\infty} \left[ \int_0^T l(x-x(t), y-y(t)) dt \right] e^{-j2\pi(ux+vy)} dx dy = \\ & \int_0^T \left[ \iint_{-\infty}^{+\infty} l(x-x(t), y-y(t)) e^{-j2\pi(ux+vy)} dx dy \right] dt = \\ & \int_0^T L(u,v) e^{-j2\pi(ux(t)+vy(t))} dt = \\ & L(u,v) \int_0^T e^{-j2\pi(ux(t)+vy(t))} dt. \end{aligned} \quad (5)$$

对比式(3)和式(5)，可得：

$$K(x,y) = \int_0^T e^{-j2\pi(ux(t)+vy(t))} dt. \quad (6)$$

根据匀速直线运动模糊核的参数化表示，可以得到在曝光时间内模糊图像在水平和垂直方向的位移分别为  $M\cos \theta$  和  $M\sin \theta$ ，且满足

$$\begin{cases} x(t) = \frac{t}{T} M \cos \theta \\ y(t) = \frac{t}{T} M \sin \theta \end{cases}, \quad (7)$$

将式(7)代入式(6)可以得到：

$$K(x,y) = \frac{T \sin(\pi M \phi)}{\pi M \phi} e^{-j\pi M \phi}, \quad (8)$$

其中： $\phi = u \cos \theta + v \sin \theta$ 。

以上推导是基于连续信号进行推导，图像是离散信号，假设图像的长和宽均为  $W$ ，那么模糊核的离散傅里叶变换为：

$$K(x,y) = \frac{T \sin(\frac{\pi M}{W} \phi)}{\frac{\pi M}{W} \phi} e^{-j\pi \frac{M}{W} \phi}. \quad (9)$$

### 2.4 运动模糊参数与模糊图像频率域的关系

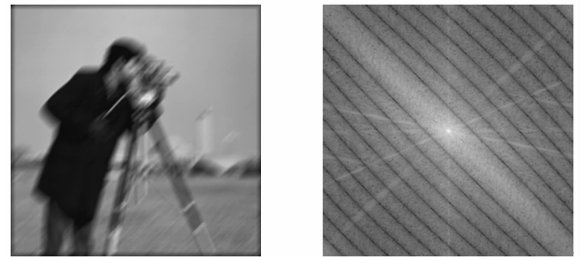
本节对运动模糊图像频谱进行分析，说明运动模糊参数在模糊图像频率域内。

#### 2.4.1 模糊长度

对式(9)取模，可得

$$|K(x,y)| = \left| \frac{T \sin(\frac{\pi M}{W} \phi)}{\frac{\pi M}{W} \phi} \right|. \quad (10)$$

显而易见，当  $\pi M \phi / W \neq 0$  时，上式才有意义，当  $M \phi / W \neq 0$  且为整数时， $|K(x,y)| = 0$ ，因此， $|K(x,y)|$  表现为在垂直模糊角度  $\theta$  存在一系列等间距的零值。又由于  $|B(u,v)| = |L(u,v)| |K(x,y)|$ ，所以，模糊图像频率模值  $|B(u,v)|$  在垂直模糊角度  $\theta$  方向也存在等间距的条纹。图 2(a) 所示为模糊方向为  $45^\circ$ ，模糊长度为 15 的运动模糊图像，图 2(b) 为其傅里叶频谱图，可以看出，图像在  $135^\circ$  方向存在着等间距的条纹。



(a) 模糊图像 (b) 傅里叶变换  
(a) Blurry image (b) Fourier transform

图 2 运动模糊图像及其傅里叶变换

Fig. 2 Motion blurry image and its Fourier transform

假设条纹间距为  $s$ ，则模糊距离  $M$  与条纹间距  $s$  的关系为  $W = M \times s$ ，因此，只要估计出条纹间距，模糊距离即为  $M = W / s$ 。

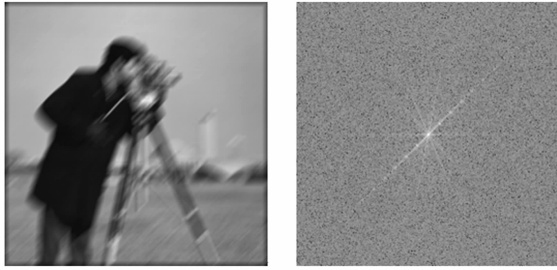
#### 2.4.2 模糊方向

图像的倒谱可以反映图像的一些本质信息，

其计算方法通常为<sup>[4]</sup>:

$$C_b = F^{-1}[\log(1 + |B(u, v)|)], \quad (11)$$

式中: $F^{-1}[\cdot]$ 为傅里叶反变换, $C_b$ 为模糊图像  $b(x, y)$  的倒谱图像。



(a) 模糊图像 (b) 倒谱图  
(a) Blurry image (b) Cepstrum image

图 3 运动模糊图像及其倒谱图

Fig. 3 Motion blurry image and its cepstrum image

图 3 为运动模糊图像与其倒谱图像,从图 3 (b) 可以看出,倒谱图像中存在一条模糊方向 ( $45^\circ$ ) 的亮线。因此,估计模糊方向  $\theta$  转化为估计出亮线的方向。

### 3 基于 PCA 的参数估计方法

本文提出了基于 PCA 运动模糊参数估计方法。该方法首先通过 PCA 估计模糊图像的倒谱图像中亮线的方向,然后,在估计角度的基础上,对模糊图像的频谱进行相应的 Radon 变换,计算模糊距离  $M$ 。

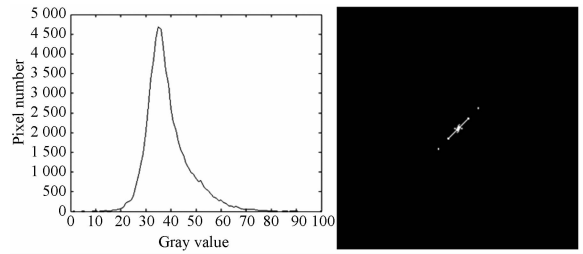
#### 3.1 模糊方向估计

前面已经分析了估计模糊表现为倒谱图中的亮线方向,本文的方法是先对倒谱图像进行二值化处理,提取出亮线。然后,基于 PCA 估计亮线的主成分即模糊方向。

##### 3.1.1 倒谱图二值化

首先,对模糊图像倒谱图的直方图进行分析,倒谱图 3(a) 的直方图如图 4(a) 所示,

本文假设模糊图像的倒谱图服从均值为  $\mu$ , 方差为  $\sigma$  的高斯分布,而其中的亮线为分布的外点。由于高斯信号在  $3\sigma$  内包含了整个信号绝大部分的能量,因此,采用  $\mu + 3\sigma$  为分割阈值,对倒谱图中的亮线进行自动提取。图 3(b) 所示倒谱图的二值化结果如图 4(b) 所示,可以看出,二值化方法能较好地提取出倒谱图中的亮线。



(a) 直方图 (b) 二值化  
(a) Histogram (b) Binary image

图 4 倒谱图像的直方图及二值化图像

Fig. 4 Histogram and the binary image of cepstrum

##### 3.1.2 PCA 估计角度

PCA 是一种得到广泛应用的高维数据特征提取和线性降维方法,可从模式矢量空间中选择模式特征子空间得到主特征矢量<sup>[12]</sup>。本文算法主要用 PCA 方法找出倒谱图像中亮线的主矢量,使得各个分量在此矢量方向上的投影最大,此矢量的方向即为亮线。

假设

$$\mathbf{X} = \{x_k, k=0, 1, 2, \dots\}, \quad (12)$$

其中: $x_k = (i_k, j_k)$  为二值化后图像中的亮点, $i_k$  和  $j_k$  分别为第  $k$  个点的横坐标和纵坐标。PCA 的目的是要估计一个方向  $\omega$ ,使得  $\mathbf{X}$  在该方向上的投影  $\mathbf{y} = \omega^T \mathbf{x}$  的方差最大。要求  $\omega$  可得到如下目标函数:

$$J = E[\|\mathbf{y}\|_2^2] = E[\|\omega^T \mathbf{X}\|_2^2] = \omega^T \mathbf{C} \omega, \quad (13)$$

其中: $\mathbf{C} = E[\mathbf{X}^T \mathbf{X}]$  为  $\mathbf{X}$  的协方差矩阵,且其为非负正定阵,因此,其特征值  $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_n \geq 0$ ,如果  $\lambda_k$  对应的特征向量为  $\mathbf{v}_k$ ,那么  $\mathbf{v}_1$  就是所求的主成分分量  $\omega$ 。由于  $x_k$  为 2 维向量, $\omega$  也为二维向量,设  $\omega = (i_\omega, j_\omega)$ ,那么,所求的倒谱直线方向为  $\theta = \arctan(j_\omega / i_\omega)$ 。

#### 3.2 模糊距离估计

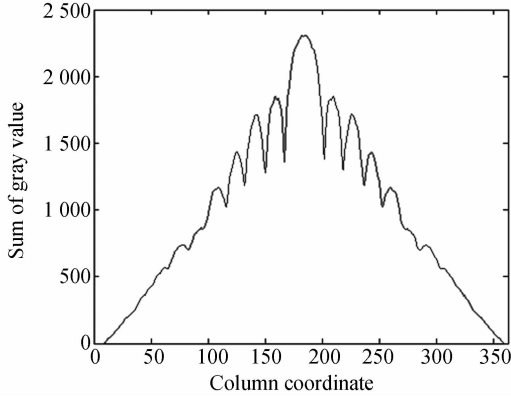
如前面的分析,估计图像的模糊距离就是估计模糊图像傅里叶变换中条纹的间隔  $s$ ,然后通过  $M = W/s$  计算模糊距离。

Radon 变换可以计算图像在任意角度的投影,基于估计的模糊角度,可以计算模糊图像的频谱图在模糊角度下的投影,如图 5(a) 所示。

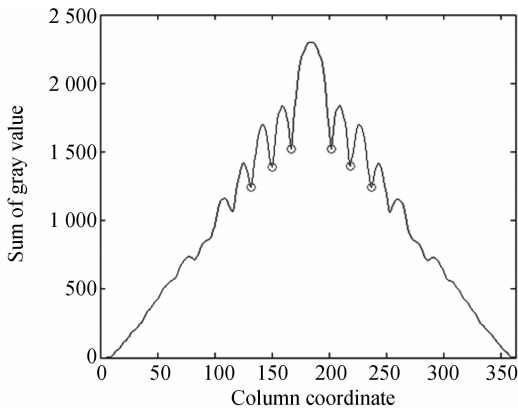
图 5(a) 的极小值就是频谱中的暗条纹位置,极小值之间的间距就是条纹间距,其中,最大值左右 2 个极小值间的距离为条纹间距的 2 倍。因此

可以通过寻找极小值之间的间距估计条纹间隔。

从图 5(a)中可以看出,Radon 变换图像后的存在着“毛刺”现象,会对图像的极小值求解产生影响。本文首先对变换图像进行长度为 5 的均值滤波去除变换图像的毛刺,然后,为了减小条纹间距的计算误差,计算靠近中心的 6 个极小值(如图 5(b)所示),在计算其对应的条纹间距,最后,将多个条纹间距取均值作为估计结果  $s$ ,那么,模糊长度  $M=W/s$ 。



(a) Radon 变换图  
(a) Radon transform image



(b) Radon 变换滤波图  
(b) Radon transform filtered image

图 5 模糊图像频谱在模糊角度下的 Radon 变换  
Fig. 5 Radon transform of the frequency spectrum under estimated angle

## 4 实验与结果分析

为了验证本文方法的有效性,在实验平台为 Matlab R2011a,硬件配置为 Intel Core i5 四核 3.2G CPU,8G 内存的计算机上进行了仿真实

验。实验数据如图 6 所示,图 6(a)、(b)的大小分别为  $256 \times 256$  和  $208 \times 208$ 。



(a)  $256 \times 256$



(b)  $208 \times 208$

图 6 仿真测试数据

Fig. 6 Simulation test data

### 4.1 算法性能测试

首先,随机生成不同模糊角度和方向的 10 组运动模糊参数,如表 1 第一列所示,将图 6(a)的图像分别卷积其对应的运动模糊核得到模糊图像,然后,用本文提出的算法进行参数估计,结果如表 1 所示。

从表 1 可以看出,模糊角度和方向的最小值分别为  $0.0455^\circ$  和 0 pixel,同时,模糊角度和长度估计的平均误差分别只有  $0.1384^\circ$  和 0.2739 pixel。本文的方法能较好地估计运动参数,获得较高精度的模糊参数,且避免了 Radon 变换和 Hough 变换精度与采样间隔相关的缺点。

表 1 运动模糊参数估计结果

Tab. 1 Estimated results of the linear motion

原始值	blur parameter [°, pixel]	
	估计值	误差
[47.6, 30]	[47.4790, 29.5385]	[0.1210, 0.4615]
[72.7, 15]	[72.6545, 15.2079]	[0.0455, 0.2079]
[19.4, 18]	[19.2891, 18.0706]	[0.1109, 0.0706]
[62.1, 24]	[62.1677, 23.6308]	[0.0677, 0.3692]
[5.9, 12]	[5.9947, 12.0000]	[0.0947, 0.0000]
[73.2, 25]	[73.3040, 24.7742]	[0.1040, 0.2258]
[62.4, 19]	[62.5591, 18.9630]	[0.1591, 0.0370]
[86.7, 27]	[86.5054, 26.4828]	[0.1946, 0.5172]
[10.0, 18]	[10.0852, 17.4545]	[0.0852, 0.5455]
[82.6, 17]	[82.1988, 16.6957]	[0.4012, 0.3043]
平均误差		[0.1384, 0.2739]

### 4.2 与其他算法对比

为了进一步验证本文算法的有效性,对本文

算法与文献[7]算法进行了对比。文献[7]算法是通过 Radon 变换去估计运动模糊角度,然后在模糊角度的 Radon 变换下求取模糊长度,取得了较好的性能。

试验方法为固定模糊长度为 15 pixel,而模糊角度从 0°到 180°以 0.5°离散采样,共生成了 361 组模糊参数,分别对图 6 中的 2 幅图像进行模糊,然后,用本文方法和文献[7]方法进行模糊参数估计。文献[7]方法用了 2 组参数,一组是 Radon 变换估计角度时,采样角度为 1°,另一组是采用角度间隔为 0.5°。采用的评价指标为:总的计算时间,模糊角度和模糊长度的最大误差和评价误差。实验结果如图 7 和图 8 所示。

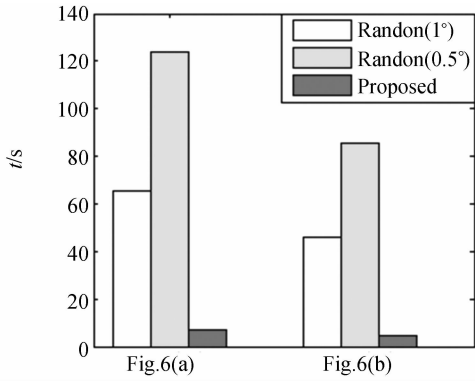


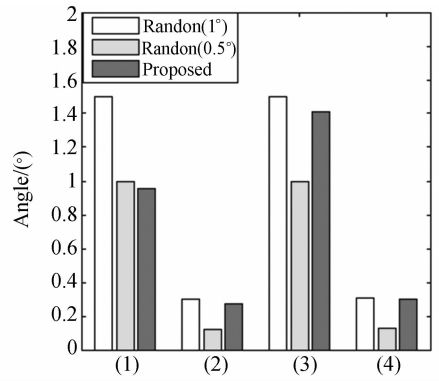
图 7 时间对比图

Fig. 7 Comparison of running time

在角度估计方面,从图 8(a)可以看出,本文方法的最大误差和平均误差要优于文献[7]方法采用间隔为 1°,而不及其采用间隔 0.5°的情况。这是由于随着采样间隔越小,文献[7]越能获得更优的结果;但是,随着采样间隔的减小,计算的时间会成倍增长,图 7 中可以看出采样间隔缩小一倍,计算时间相应的要增加一倍。本文方法是采用 PCA 进行角度估计,不需要进行角度的采样,计算时间相较于采样间隔 1°的方法提升了近 10 倍。

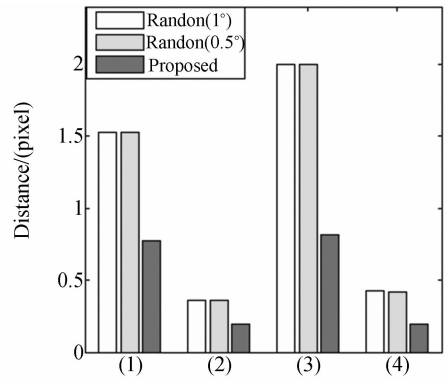
在模糊估计方面,由于本文的方法在对 Radon 变换图像求极小值时采用了“去毛刺”的预处理手段,从图 8(b)中可以看出,本文方法比文献[7]的 2 组参数情况下估计的精度都高。

由于试验中对模糊角度从 0°到 180°都进行了采样,因此,从误差可以评价算法的稳定性。从图 8(a)可以看出,本文方法在测试数据上的角度估计的最大误差不超过 1.5°,平均误差不超过



(a) 角度误差比较

(a) Comparison of the estimated angles



(b) 距离误差比较

(b) Comparison of the estimated distance

图 8 估计的角度误差和距离误差的比较,(1)(2)(3)(4)分别表示图 6(a)的最大误差、平均误差和图 6(b)的最大误差、平均误差。

Fig. 8 Comparison of the estimated errors for angle and distance, (1) (2) represent the the max error and mean error of the Fig 6(a), (3)(4) represent the max error and mean error of Fig 6(b).

0.3°,距离估计的最大误差不超过 1 pixel,平均误差不超过 0.3 pixel,具有较高的稳定性。

### 5 结 论

在分析运动模糊图像成像机理的基础上,针对模糊参数在频率域图像的等间距条纹及倒谱图像中亮线特性,提出了一种基于 PCA 的直线运动模糊图像参数估计方法。该方法首先基于 PCA 对倒谱图像的亮线角度进行估计,然后,对模糊图像进行模糊角度方向的 Radon 变换,根据计算频

率域图像的条纹宽度来估计模糊长度。实验结果表明,该方法能够实现直线运动模糊参数高精度快速估计,估计的模糊角度和模糊长度平均误差

分别为  $0.1384^\circ$  和  $0.2739$  pixel,在同精度条件下,比传统的 Radon 变换方法的估算速度快近 10 倍。

### 参考文献:

- [1] HARMELING S, HIRSCH M, SCHOLKOPF B. Space-variant single-image blind deconvolution of removing camera shake [C]. *Proceedings of Advances in Neural Information Processing Systems* 23, 2010:829-837.
- [2] BABACAN S D, MOLINA R, DO M N, *et al.*. Bayesian blind deconvolution with general sparse image priors [C]. *Proceedings of the 12th European Conference on Computer Vision, Florence, Italy*, 2012:341-355.
- [3] KRISHNAN D, TAY T, FERGUS R. Blind deconvolution using a normalized sparsity measure [C]. *Proceedings of the 12th European Conference on Computer Vision, Colorado, USA*, 2011: 233-240.
- [4] 石明珠,许廷发,张坤.运动成像混合模糊的全变分图像复原[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(8): 1973-1981.  
SHI M Z, XU T F, ZAHNG K. Total variation image restoration for mixed blur in moving image [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(8): 1973-1981. (in Chinese)
- [5] 范赐恩,陈曦,张立国,等.双 CMOS 成像系统中运动模糊图像的复原[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(6): 1389-1396.  
FANG C E, CHEN X, ZHANG L G, *et al.*. Restoration of motion blurred image in dual CMOS imaging system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(6): 1389-1396. (in Chinese)
- [6] 冯亮,王平,许廷发,等.运动模糊退化图像的双字典稀疏复原[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(8): 1982-1989.  
FENG L, WANG P, XU T F, *et al.*. Dual dictionary sparse restoration of blurred images [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(8): 1982-1989. (in Chinese)
- [7] MICHAL D, LIBOR M, TOMAS F. Blurred image restoration: A fast method of finding the motion length and angle [J]. *Digital Signal Processing*, 2010, 10: 1677-1686.
- [8] WU Z Y, HUANG X H, LI X D, *et al.*. A simultaneous localization and mapping method based on fast-Hough transform [J]. *Information Technology Journal*, 2008, 7(1): 190-194.
- [9] FANG X Y, WU H, WU Z B, *et al.*. An improved method for robust blur estimation [J]. *Information Technology Journal*, 2011, 10(9): 1709-1716.
- [10] 孙辉,等.相位相关技术实现离焦模糊图像运动估计[J]. *液晶与显示*, 2012, 27(2): 223-228.  
SUN H. Estimation of Displacement for out-of-focus blurred image using phase-only correlation [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2012, 27(2): 223-228. (in Chinese)
- [11] LI H S, ZHANG Y N, ZHANG H C, *et al.*. Blind image deblurring based on sparse prior of dictionary pair [C]. *Proceeding of 21st International Conference on. IEEE Pattern Recognition*. 2012: 3054-3057.
- [12] BISHOP C M. *Pattern Recognition and Machine Learning* [M]. New York: Springer, 2006.

### 作者简介:



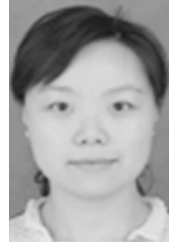
李海森(1985—),男,湖南永州人,博士研究生,2011年于西北工业大学获得硕士学位,主要从事图像复原处理、模式识别等方面的研究。E-mail: haisenli.nwpu@gmail.com



张艳宁(1967—),女,陕西武功人,教授,博士生导师,1996年于西北工业大学获得博士学位,主要从事计算机视觉、数字图像处理等方面的研究。E-mail: ynzhang@nwpu.edu.cn



姚 睿(1982—),男,河南南阳人,博士研究生,2009年于西北工业大学获得硕士学位,主要从事计算机视觉、数字图像处理等方面的研究。E-mail: yaorui@mail.nwpu.edu.cn



孙瑾秋(1980—),女,陕西西安人,博士,讲师,2009年于西北工业大学获得博士学位,主要从事空间目标图像处理方面的研究。E-mail: sunjinqiu@nwpu.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)