

基于方向微分的运动模糊方向鉴别

陈前荣¹⁾ 陆启生¹⁾ 成礼智²⁾

¹⁾(国防科技大学光电科学与工程学院,长沙 410073) ²⁾(国防科技大学理学院,长沙 410073)

摘要 在曝光的瞬间,造成图像模糊的被摄景物与相机的相对运动,虽可近似作为直线运动来处理,但模糊图像中的运动模糊方向未知。若能由模糊图像出发,估计出运动模糊方向,则可以通过图像旋转将运动模糊方向旋转到水平轴,这样图像恢复就可由 2 维问题转化为 1 维问题,这就大大降低了图像恢复的难度,并为图像恢复的并行计算创造了有利条件。为实现这一目的,将原图像看作是各向同性的一阶马尔科夫过程,提出了一种新的基于方向微分的运动模糊方向鉴别方法,该方法不仅可以高精度鉴别匀速运动、加速运动、振动等各种运动的模糊方向,而且具有鉴别范围大、鉴别精度高、稳定性好的优点。另外,为了具体实现这种鉴别,还给出了采用双线性插值或三次 C 样条插值进行方向鉴别的详细计算方法,其中双线性插值方法计算量小,但三次 C 样条插值方法的鉴别精度比双线性插值方法高,而且通过加权平均,还可进一步降低各种随机因素引起的鉴别误差,这不仅提高了鉴别精度,而且增强了运动模糊方向鉴别的稳定性,因此能够更加有效地进行方向鉴别。

关键词 图像恢复 马尔科夫过程 模糊 运动 方向 微分 C 样条插值 加权平均法
中图分类号: TP391.41 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2005)05-00590-06

Identification of Motion Blur Direction from Motion Blurred Image by Direction Derivation Method

CHEN Qian-rong¹⁾, LU Qi-sheng¹⁾, CHENG Li-zhi²⁾

¹⁾(College of Photoelectricity Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073)

²⁾(College of Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073)

Abstract The direction of the motion that blurs the image can be dealt with as unchanged during the short expose time. It is a pity that the actual motion blur direction in the blurred image is often unknown. It is meritorious to identify the motion blur direction from the blurred images. Then the motion blurred direction can be adjusted to the horizontal axis by image rotation, and the image restoration will become a one-dimension problem, which is much more easy than the two-dimension that it was. Dealing with the original image as an isotropy one rank Markov process, this paper give a new way to identify the motion blur direction from the blurred images by direction derivation method. The new way can identify the blur directions of the images blurred by uniform motion, accelerate motion, vibration etc. It can identify any direction, from -90° to 90° , with high precision. It works with high stabilization. Double linear interpolation or C spline interpolation is used in the identification. The detailed computing processes of the interpolations are presented. Double linear interpolation needs less computing time, but C spline interpolation works out with higher identification precision. The new way to identify the motion blur direction is developed by introducing into the weighted averages method, which is helpful to restrain the random factors that cause identification errors, to enhance the identification stabilization, to work out with higher identification precision.

Keywords image restoration, Markov process, blur, motion, direction, derivative, C spline interpolation, weighted averages method

1 引言

在图像摄取过程中,被摄景物与像面之间的相

对运动是十分普遍的,如普通照相时手的抖动、航空侦察时飞机相对于地面的运动,等等。这些运动会造成图像模糊和降低图像的分辨率,因此,为了提高对图像的应用效率,需要提取出模糊图像中被运动

收稿日期:2003-08-21;改回日期:2004-08-23

第一作者简介:陈前荣(1972 ~),男。2000 年获国防科技大学光学工程专业硕士学位,现为国防科技大学光学工程专业 2000 级博士生。研究方向为图像恢复和光学信息处理。E-mail: chen_qianrong@126.com;chenqianrong_cn@sina.com

模糊所掩盖的信息,其可以采用多种方法对模糊图像进行恢复^[1-7]。

由于物体运动都有一定的惯性,因此在摄取图像的短暂曝光时间内,运动方向一般可认为是近似不变的,仅运动模糊方向未知,若能由模糊图像估计出该方向,则可以通过图像旋转将模糊方向旋转到水平轴方向(一般以图像中心为旋转轴),随后的运动模糊点扩散函数的估计及图像恢复工作就由 2 维问题转化为 1 维问题,这就大大降低了解决问题的难度,并为图像恢复的并行计算创造了有利条件。为此,运动模糊方向的鉴别,正是本文研究的内容。

大家知道,匀速直线运动的点扩散函数是矩形函数,其与模糊图像对应的频域上有周期性的零值条纹,且运动方向与零值条纹方向相垂直,Cannon 等利用这一特点从模糊图像中估计出运动方向和点扩散函数^[8,9],但该方法仅局限于匀速直线运动,不适用于加速运动、振动等的模糊点扩散函数的估计,而且也没有给出自动鉴别方法。Yitzhaky、Kopeika 和 Hadar 等采用一个 2×2 微分乘子来鉴别运动模糊方向^[10-20],但是该微分乘子只能鉴别 $0^\circ \sim 45^\circ$ 范围内的运动模糊方向,且鉴别误差比较大。

上述的运动模糊方向鉴别方法都不是很成功,且它们都没有提到或讨论过“鉴别精度”。

本文提出了一种新的基于方向微分的运动模糊方向鉴别方法,其可以高精度鉴别匀速运动、加速运动、振动等各种运动的模糊方向。文中还给出了采用双线性插值或三次 C 样条插值时方向鉴别的详细计算方法,其中双线性插值方法虽具有计算量小的优点,但由于三次 C 样条插值方法的插值精度比较高,故鉴别精度比双线性插值方法高。若同时对其加权平均,则可以使鉴别精度得到进一步的提高。

2 基于方向微分的运动模糊方向鉴别模型

图像统计表明,通常可以将原图像看作是各向同性的一阶马尔科夫过程,即原图像的自相关及其功率谱是各向同性的。运动模糊只降低了运动方向上图像的高频成分,而对于其他方向上图像的高频成分影响较小,不仅方向偏离越大影响越小,而且对于垂直于运动方向上的图像的高频成分没有影响。如果对模糊图像进行方向性的高通滤波(方向微分),则当滤波方向为运动模糊方向时,由于与此方

向模糊图像对应的高频成分最少,且高通滤波(方向微分)使模糊图像能量损失最大,其得到的微分图像灰度值(绝对值)之和必然最小,所以,方向微分得到图像灰度值(绝对值)之和最小时,其对应的方向即为模糊图像方向。

如图 1 所示,运动模糊图像函数为 $g(i, j)$, (\hat{i}, \hat{j}) 是模糊图像中以点 (i, j) 为圆心、以 Δr 为半径的半圆弧上的一点;其中 Δr 是进行方向微分时的微元长度, Δr 值的大小可根据被鉴别的模糊图像的模糊尺度(blur extent, 即点扩散函数的长度)及运动类型(匀速直线运动、加速运动、振动等)适当选取,如取 1、1.5、2 等,其可以为整数,也可以为小数,而且 Δr 值选取得当可以提高鉴别精度; α 是进行方向微分时的方向角(定义水平轴为 0° , α 角上负下正,顺时针方向增大, $-\pi/2 \leq \alpha < \pi/2$)。 $g(\hat{i}, \hat{j})$ 可由模糊图像插值获得,其中

$$\begin{cases} \hat{i} = i + \Delta r \cdot \sin \alpha \\ \hat{j} = j + \Delta r \cdot \cos \alpha \end{cases} \quad (1)$$

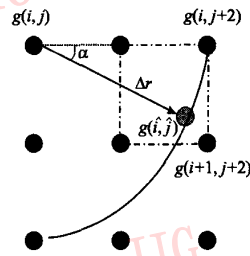


图 1 方向微分示意图(微元 $\Delta r = 2$)

Fig. 1 Direction derivation ($\Delta r = 2$)

通过插值求得 $g(\hat{i}, \hat{j})$ 后,即可求得微分(微元大小为 Δr , 方向为 α 角)图像灰度值 $\Delta g(i, j)_\alpha$

$$\Delta g(i, j)_\alpha = g(\hat{i}, \hat{j}) - g(i, j) \quad (2)$$

然后对方向微分得到的微分图像灰度值 $\Delta g(i, j)_\alpha$ (绝对值)求和

$$I(\Delta g)_\alpha = \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{M-1} |\Delta g(i, j)_\alpha| \quad (3)$$

即在 $\alpha \in \left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right)$ 范围内,按一定步长(如 0.5°)取 α 值,首先求出对应的微分图像灰度值(绝对值)之和 $I(\Delta g)_\alpha$,并求出其中的最小值 $\min(I(\Delta g)_\alpha)$, 则与最小值 $\min(I(\Delta g)_\alpha)$ 对应的 α 角即为运动模糊图像中运动模糊方向与水平轴的夹角。

当求和范围 M, N 选取为图像尺度参数时,则是

对整幅图像求和鉴别。在精度允许的情况下,也可以通过限制求和范围,对微分图像进行局部求和鉴别,这样还可以减少计算量。

3 插值方法与鉴别效果

由式(1)知, (\hat{i}, \hat{j}) 点的值一般为非整数, $g(\hat{i}, \hat{j})$ 值可由模糊图像 $g(i, j)$ 插值获得, 但不同的插值方法将有不同的鉴别精度和计算量。

3.1 双线性插值

双线性插值是一种分段插值方法, 它是用一个经过 4 个控制点的双曲面去近似 4 个控制点之间各点的值。例如图 1 的情况, 此时 $g(\hat{i}, \hat{j})$ 值只由其邻近的 $g(i, j+1)$ 、 $g(i, j+2)$ 、 $g(i+1, j+2)$ 、 $g(i+1, j+1)$ 4 点(即虚线框联结起来的 4 点)的值决定。

取

$$i_{int} = \lfloor \hat{i} \rfloor, j_{int} = \lfloor \hat{j} \rfloor \quad (4)$$

其中, i_{int} 、 j_{int} 分别为非整数下标 \hat{i} 、 \hat{j} 的整数部分, $\lfloor \cdot \rfloor$ 为向下取整运算, 如 $\lfloor -1.5 \rfloor = -2$; $\lfloor -0.5 \rfloor = -1$; $\lfloor 0.5 \rfloor = 0$; $\lfloor 1.5 \rfloor = 1$

令

$$w_i = \hat{i} - i_{int}; w_j = \hat{j} - j_{int} \quad (5)$$

显然

$$0 \leq w_i < 1; 0 \leq w_j < 1 \quad (6)$$

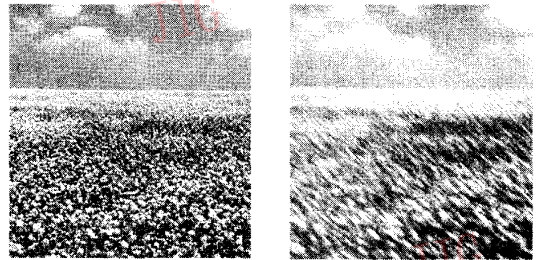
则

$$g(\hat{i}, \hat{j}) = (1 - w_i - w_j + w_i w_j) g(i_{int}, j_{int}) + (w_j - w_i w_j) g(i_{int}, j_{int} + 1) + (w_i - w_i w_j) g(i_{int} + 1, j_{int}) + w_i w_j \cdot g(i_{int} + 1, j_{int} + 1) \quad (7)$$

代入式(2)即可求得与 α 角对应的微分图像 $\Delta g(i, j)_\alpha$, 进而代入式(3), 以求出对应的微分图像灰度值(绝对值)之和 $I(\Delta g)_\alpha$ 。在 $\alpha \in \left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right]$ 范围内按一定步长(如 0.5°)取 α 值, 当求出对应的微分图像灰度值(绝对值)之和 $I(\Delta g)_\alpha$, 即得 $I(\Delta g)_\alpha - \alpha$ 曲线, 当求出该曲线的最小值点 $\min(I(\Delta g)_\alpha)$, 则与最小值 $\min(I(\Delta g)_\alpha)$ 对应的 α 角即为鉴别出的运动模糊方向。

图 2(a) 是一幅清晰的蓝天白云下盛开鲜花的草地图像 f_0 , 若将它旋转 -40° , 则得到旋转后图像 f_1 , 再在水平方向以尺度为 10 pixels 的矩形函数与

之进行卷积运算, 以仿真匀速直线运动模糊, 则得到运动模糊图像 f_2 , 再将 f_2 旋转 40° , 量化后, 即得到运动模糊图像 g (如图 2(b) 所示), 显然, g 中的真实的运动模糊方向为 40° 。图 3 是利用前述方法(取 $\Delta r = 2$)对运动模糊图像(图 2(b))进行运动模糊方向鉴别所用的鉴别曲线 $(I(\Delta g)_\alpha - \alpha)$, 计算中, α 值步长取 0.5° , 由图 3 可以看出, α 值离真实运动模糊方向越近时, 对应的 $I(\Delta g)_\alpha$ 值越小, 当 $I(\Delta g)_\alpha$ 值最小时, 对应的 α 值即为鉴别出的运动模糊方向, 由图 3 还可以看出, 鉴别出的运动模糊方向为 41° , 误差 1° 。



(a) 原图 (b) 运动模糊图像

图 2 盛开鲜花的草地图像

Fig. 2 Image of flowery grassland

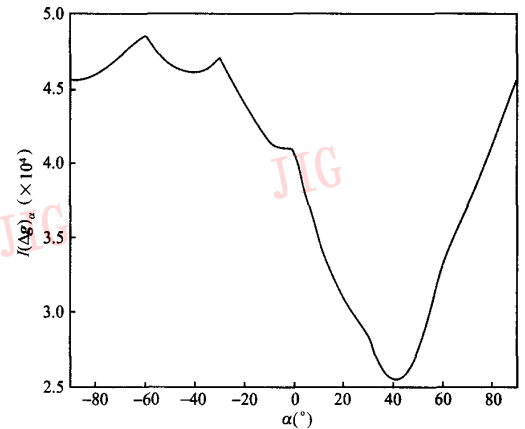


图 3 运动模糊方向鉴别曲线

(模糊尺度 10 pixels, 真实运动模糊方向为 40° , 鉴别运动模糊方向为 41°)

Fig. 3 Curve of motion blur direction identification

采用前述的“旋转-模糊-旋转”方法, 可得到图 2(a) 的一系列模糊方向各异的匀速直线运动模糊图像(模糊尺度为 10 pixels), 而利用前述方法(取 $\Delta r = 2$)对其运动模糊方向进行鉴别, 则鉴别的均方误差为 2.1074° , 其鉴别结果见表 1。

情况,且各种随机因素会引起鉴别误差,为了降低这种随机性,提高鉴别精度,本文以上述方法为基础,提出采用加权平均法来进行鉴别。

如图 4 所示,对于微元 Δr_1 ,可首先利用双线性插值或双三次 C 样条插值的方法求出 $g_1(i, j)$,再利用式(2)、式(3)求出 $I(\Delta g)_{\Delta r_1, \alpha}$,但是并不马上用鉴别曲线 $I(\Delta g)_{\Delta r_1, \alpha} - \alpha$ 进行运动模糊方向鉴别,而是先取另一个适当大小的微元 Δr_2 来对模糊图像进行上述的方向微分,同样可求得 $I(\Delta g)_{\Delta r_2, \alpha}$;再取 Δr_3 ,可得 $I(\Delta g)_{\Delta r_3, \alpha}$;……,然后将这些鉴别曲线按适当的权值 $[q_1 \ q_2 \ \dots \ q_i]$ 相加,有

$$I(\Delta g)_\alpha = \sum_{i=1}^n q_i \cdot I(\Delta g)_{\Delta r_i, \alpha} \quad (14)$$

最后才利用式(14)得出的鉴别曲线 $(I(\Delta g)_\alpha - \alpha)$ 进行鉴别(即求与最小值 $\min(I(\Delta g)_\alpha)$ 对应的 α 角)。

表 3 为加权平均法对图 2(a) 的一系列模糊方向各异的匀速直线运动模糊图像(模糊尺度为 10 pixels)的鉴别结果,其中微元 $\Delta r_i (i=1, 2, \dots)$ 依次取为 [2 3 4 5], 权值 q_i 依次取为 [0.25 0.25 0.25 0.25], α 的搜索步长为 1° , 采用三次 C 样条

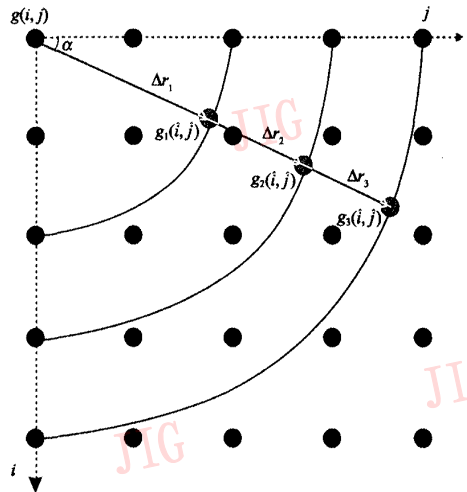


图 4 采用加权平均法的运动模糊方向鉴别

Fig. 4 Motion blur direction identification with weighted averages method

插值,得到的鉴别均方误差为 1.0572° ,可见,其鉴别精度比前面的都要高。

表 3 基于方向微分的运动模糊方向鉴别结果(采用双三次 C 样条插值及加权平均)单位($^\circ$)

Tab. 3 The results of the motion blur direction identification via directional derivation and weighted average using C spline(Unit($^\circ$))

真实运动方向 α	-90	-80	-70	-60	-50	-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40	50	60	70	80
鉴别运动方向 $\hat{\alpha}$	-90	-81	-69	-59	-48	-40	-29	-19	-9	0	9	20	29	40	48	59	69	79
鉴别误差 e	0	-1	1	1	2	0	1	1	1	0	-1	0	-1	0	-2	1	1	-1

注: $e = \hat{\alpha} - \alpha$; 均方误差 $\sigma = 1.0572^\circ$

微元 Δr_i 值可根据被鉴别的模糊图像的模糊尺度及运动类型(匀速直线运动、加速运动、振动等)适当选取,如取 1、1.5、2 等,一般 Δr_i 最大可取到模糊尺度的一半,再大的话则鉴别精度会降低。由于权值 q_i 的选取受运动类型影响更大些,因此一般对于匀速直线运动模糊,可以取等权(如表 3 所示),而对于匀减速直线运动、振动,则与较小的 Δr_i 值对应的权值 q_i

可以适当取大一些,但是,最佳微元及权值的选取方法,至今仍是一个有待深入探讨的问题。

5 各种鉴别的均方误差统计

不同插值方法与加权平均方法组合,有不同的鉴别精度和计算量。表 4 给出不同鉴别方法对匀速

表 4 不同运动模糊方向鉴别方法的均方误差统计(表中数据为鉴别均方误差)单位($^\circ$)

Tab. 4 The identification precision comparison among various methods by uniform motion blur (the data in the table is the average variation of the identification) Unit($^\circ$)

运动类别	鉴别方法				
	文献[10]方法 2x2 微分乘子	方向微分法 (双线性插值)	方向微分法 (C 样条插值)	加权平均法 (双线性插值)	加权平均法 (C 样条插值)
匀速直线运动模糊	5.4365	2.1074	1.8311	1.5775	1.0572
快速振动模糊	6.0162	4.5264	1.8980	2.4191	1.0871
加速运动模糊	5.4135	2.2233	1.8185	1.8091	1.2201

注:原始清晰图像为 ck093.bmp,3 种运动模糊的模糊尺度均为 10 pixels

直线运动模糊、快速振动模糊、加速运动模糊的方向鉴别均方误差。由表4可以看出,当模糊尺度相同时,由于匀速直线运动对图像造成的模糊程度最大,有利于方向鉴别,故其方向鉴别精度也比快速振动、加速运动的高。

为了解本文方法的鉴别效果,对30多幅图片进行了方向的鉴别实验,运动类型包括匀速直线运动、加速运动、振动,实验结果表明,本文这种新的鉴别方法是有效可靠的,不仅鉴别精度高,且鉴别范围大。

6 结论

本文提出了一种新的基于方向微分的运动模糊方向鉴别方法,其不仅可以高精度鉴别匀速运动、加速运动、振动等各种运动的模糊方向,而且具有鉴别范围大、鉴别精度高、稳定性好的优点。

双线性插值方法虽具有计算量小的优点,但由于三次C样条插值方法的插值精度比较高,故鉴别精度比双线性插值方法高,而加权平均法鉴别方案,则不但降低了各种随机因素会引起的鉴别误差,还增强了运动模糊方向鉴别的稳定性,并可使鉴别精度得到进一步提高。

参考文献 (References)

- 1 Legendijk R, Tekalp A M, Biemond J. Maximun likelihood image and blur identification: a unifying approach [J]. *Optical Engineering*, 1990, **29**(5): 422 ~ 435.
- 2 WANG Xiao-hong, ZHAO Rong-chun. Restoration of arbitrary direction motion-blurred images[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2000, **5A**(6): 525 ~ 529. [王晓红, 赵荣椿. 任意方向运动模糊的消除[J]. *中国图象图形学报*, 2000, **5A**(6): 525 ~ 529.
- 3 YAN Pei-min, LIU Hong. Image restoration based on Markov random fields and genetic algorithms [J]. *Journal of Shanghai University (Natural Science)*, 2000, **6**(4): 119 ~ 123, 128. [严佩敏, 刘泓. 基于马尔科夫随机场和遗传算法的图像恢复[J]. *上海大学学报 (自然科学版)*, 2000, **6**(4): 119 ~ 123, 128.
- 4 CHEN Rong, LIU Xiao-jun, ZOU Mou-yan. Binary image restoration based on MRF [J]. *Journal of Image and Graphic*, 1999, **4A**(7): 557 ~ 561. [陈嵘, 刘小军, 邹谋炎. 基于 Markov 场的二值图象复原算法[J]. *中国图象图形学报*, 1999, **4A**(7): 557 ~ 561.
- 5 CAI Han-tian, ZHANG Jun-ping. A wavelet based on iteration regularized image restoration algorithm [J]. *Journal of Image and Graphics*, 1999, **4A**(3): 229 ~ 233. [蔡汉添, 张军萍. 一种基于小波变换的迭代正则化图象恢复算法[J]. *中国图象图形学报*, 1999, **4A**(3): 229 ~ 233.
- 6 ZHAO Bao-jun, SHI Cai-cheng, SHEN Sheng-hong, et al. The

image restoration based on CMAC [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2001, **6A**(8): 780 ~ 783. [赵保军, 史彩成, 沈胜宏等. 一种基于 CMAC 的图象恢复算法[J]. *中国图象图形学报*, 2001, **6A**(8): 780 ~ 783.]

- 7 LU Jun, SHU Zhi-long, RUAN Qiu-qi. The research of dimension restoration based image restoration [J]. *Journal of China Institute of Communication* [J], 2000, **21**(7): 67 ~ 71. [陆俊, 舒志龙, 阮秋琦. 基于尺度旋转的图像恢复研究[J]. *通信学报*, 2000, **21**(7): 67 ~ 71.
- 8 Cannon M. Blind deconvolution of spatially invariant image blurs with phase [J]. *IEEE Transactions Acoustics Speech Signal Processing*, 1976, **24**(1): 58 ~ 63.
- 9 WANG Xiao-hong, ZHAO Rong-chun. Estimating the PSF of motion-blurred images [J]. *Computer Applications*, 2001, **21**(9): 40 ~ 41. [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.]
- 10 Yitzhaky Y, Kopeika N S. Identification of blur parameters from motion blurred images [J]. *Computer Vision Graphic Image Processing: Graphical Models and Image Processing*, 1997, **59**(5): 310 ~ 320.
- 11 Yitzhaky Y, Kopeika N S. Vibrated image restoration from a single frame [J]. *Proceedings of SPIE*, 1999, **3808**: 603 ~ 613.
- 12 Adrian S, Kempner E, Shukrun A, et al. Restoration and resolution enhancement of a single image from a vibration distorted image sequence [J]. *Proceedings of SPIE*, 1999, **3808**: 224 ~ 233.
- 13 Yitzhaky Y, Mor I, Lantzman A, et al. Direct method for restoration of motion-blurred images [J]. *Journal Optical Society America (A)*, 1998, **15**(6): 1512 ~ 1519.
- 14 Hadar O, Robbins M, Novogrozky Y, et al. Image motion restoration from a sequence of images [J]. *Optical Engineering*, 1996, **35**(10): 2898 ~ 2904.
- 15 Yitzhaky Y, Milberg R, Yohaev S, et al. Comparison of direct blind deconvolution methods for motion-blurred images [J]. *Applied Optics*, 1999, **38**(20): 4325 ~ 4332.
- 16 Wulich D, Kopeika N S. Image resolution limits resulting from mechanical vibrations [J]. *Optical Engineering*, 1987, **26**(6): 529 ~ 533.
- 17 Rudoler S, Hadar O, Fisher M, et al. Image resolution limits resulting from mechanical vibrations. Part 2: Experiment [J]. *Optical Engineering*, 1991, **30**(5): 577 ~ 589.
- 18 Hadar O, Fisher M, Kopeika N S. Image resolution limits resulting from mechanical vibrations. Part III: numerical calculation of modulation transfer functions [J]. *Optical Engineering*, 1992, **31**(3): 581 ~ 589.
- 19 Hadar O, Dror I, Kopeika N S. Image resolution limits resulting from mechanical vibrations. Part IV: real-time numerical calculation of optical transfer functions and experimental verification [J]. *Optical Engineering*, 1994, **33**(2): 566 ~ 578.
- 20 Stern A, Kopeika N S. General restoration filter for vibrated-image restoration [J]. *Applied Optics*, 1998, **37**(32): 7596 ~ 7603.