

文章编号 1004-924X(2009)05-1119-08

# 应用像素运动模糊特征分割的空间移变降质复原

张玉叶<sup>1,2</sup>, 周晓东<sup>2</sup>, 王春歆<sup>2</sup>

- (1. 海军航空工程学院 青岛分院, 山东 青岛 266041;
2. 海军航空工程学院 控制工程系, 山东 烟台 264001)

**摘要:**为了复原由动机座上的相机拍摄运动目标得到的降质图像,提出了基于像素运动模糊特征分割图像的复原方法。根据运动模糊的卷积作用,分析了图像中目标与背景不同的运动特性及像素平移叠加机理,得出了目标背景的叠加区域中相邻像素灰度值的变化程度相似的结论。基于该灰度变化特征检测运动模糊方向上的目标边缘,并利用 Canny 算子检测平行于模糊方向的边缘,两部分边缘进行求或运算并进行形态学处理,从而分割得到完整的目标模糊图像。剔除该目标图像叠加区的背景灰度信息,并补零扩充为完全卷积的模糊图像,最后利用反卷积复原算法去除模糊。复原实验结果表明,该方法复原得到的目标图像内部纹理清晰,复原图像的信噪比为 9.64 dB,即主观和客观评价都表明该方法能够有效处理该类空间移变降质图像的复原问题。

**关键词:**图像复原;空间移变降质;图像分割;运动模糊

**中图分类号:**TP391.4 **文献标识码:**A

## Space-variant blurred image restoration based on pixel motion-blur character segmentation

ZHANG Yu-ye<sup>1,2</sup>, ZHOU Xiao-dong<sup>2</sup>, WANG Chun-xin<sup>2</sup>

- (1. Qingdao Branch, Navy Aeronautical and Astronautical University, Qingdao 266041, China;
2. Control Engineering Department, Navy Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China)

**Abstract:** An image restoration method based on pixel motion-blur character image segmentation is presented to restore a kind of space-variant blurred image taken by a moving camera. According to the convolution of motion blur, the motion characteristics of a target and a background and the shift superposition theory are analyzed. It is concluded that the gray changes of neighboring pixels within a superposition region are similar. According to the feature, the blurred edge of the target in the superposition region can be detected, and the target edge parallel to the motion blur direction is detected by a Canny operator. Then the background information of the superposition region is subtracted from the target image, and the target image is restored by adding zeros and a deconvolution algorithm. The experimental results show that the restored target image has clear textures and the improved Signal-to-Noise Ratio (SNR) is 9.64 dB, which shows proposed approach can effectively realize the restoration

收稿日期:2008-06-23;修订日期:2008-08-28.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2006AA0619)

for this kind of space-variant motion blurred image.

**Key words:** image restoration; space-variant blur; image segmentation; motion blur

## 1 引言

对降质图像复原可去除由拍摄条件及光学系统造成的图像模糊,得到可识别的图像。如果降质图像是由整幅原始图像与一个近光轴的降质函数卷积得到的,则该降质系统是线性空间移不变的<sup>[1]</sup>。模糊图像复原问题的研究一直以来都基于空间移不变的假设,围绕着反卷积理论及技术进行,并产生了许多重要成果。而实际上,图像在获取过程中受拍摄条件及光学成像系统影响,降质函数容易随空间变化而变化<sup>[2]</sup>。以本文讨论的空间移变运动模糊为例说明,若运动平台上的成像相机对运动目标拍摄,且相机与目标存在相对运动,则目标图像与背景图像分别受到不同的运动模糊作用,其图像退化过程就不能简单表示为一个降质函数与整图卷积的线性退化模型,不能由整图估计点扩散函数,也就不能直接进行复原处理。

空间移变降质的恢复是图像复原领域的一个难题,研究者们陆续提出了一些针对性的方法,如针对旋转运动模糊的恢复方法<sup>[3]</sup>、针对场曲等高斯型模糊的多项式拟合方法<sup>[4]</sup>、矩阵分解法<sup>[5]</sup>、坐标变换法<sup>[6-7]</sup>、卡尔曼滤波恢复<sup>[8-9]</sup>及图像分块法<sup>[10-11]</sup>等。这些方法的思想或者将图像转化为局部空间移不变降质,或者将降质函数转化为随空间变化的形式,它们对于其相应情况的处理是有效的,但是这些方法不适合处理该类空间移变运动模糊图像。比如对旋转运动的模糊图像,沿模糊路径恢复,模糊路径为闭合圆环,在该圆环上的运动模糊实际上可认为是空间移不变的。多项式拟合方法不能用于处理运动模糊的空间移变降质,因为运动模糊函数存在零点,且不能处理含噪声情况。矩阵分解法只适用于高斯模糊函数等可分解的函数。坐标变换法针对一维空间变化降质的模糊比较有效,但是因为降质函数二维空间尺度变化的多样性,该方法对图像的处理很困难。卡尔曼滤波恢复法适合恢复非平稳运动的目标图像,即目标的运动是非线性和位移变的,但是不适用于处理这种目标与背景局部运动性质不同的图

像。图像分块法将整幅图像分为若干个局部区域,然后假设在各个局部区域内的模糊是空间不变的,再利用空间不变的图像复原算法进行复原;该方法的缺点是较难确定空间移不变的降质区域。另外单纯的分割方法容易导致复原结果在区域边界产生振铃现象,但是该方法的思想适于解决本文讨论的空间移变运动模糊问题,难点在于如何准确地分割出运动目标的模糊图像。

本文通过分析模糊图像的像素灰度值变化特征,提出了一种比较可靠的运动模糊目标分割方法,并说明了如何对分割出的目标图像进行复原。

## 2 模糊图像的成像模型及复原思路

运动平台上的相机对运动目标拍摄时,由于目标与背景在曝光时间内的运动性质不同,会产生目标与背景空间移变的运动模糊图像。背景图像运动模糊的存在,破坏了整个图像与降质函数的单一卷积关系,不但影响了目标图像运动模糊点扩散函数(PSF)的判别,也干扰了对目标图像的复原。为了复原这类图像,需要将整幅图像转化为局部空间移不变的降质图像,该过程的数学模型可表示如下:

$$g(x, y) = \iint f(\alpha, \beta) h(x, y, \alpha, \beta) d\alpha d\beta + n(x, y) = \iint_{(\alpha, \beta) \in T} f(\alpha, \beta) h_1(x, y, \alpha, \beta) d\alpha d\beta + \iint_{(\alpha, \beta) \in B} f(\alpha, \beta) h_2(x, y, \alpha, \beta) d\alpha d\beta + n(x, y) = \iint_{(\alpha, \beta) \in T} f(\alpha, \beta) h_1(x - \alpha, y - \beta) d\alpha d\beta + \iint_{(\alpha, \beta) \in B} f(\alpha, \beta) h_2(x - \alpha, y - \beta) d\alpha d\beta + n(x, y), \quad (1)$$

式中,  $(x, y)$  是像平面的坐标,  $(\alpha, \beta)$  是物平面的坐标。像平面上的每一个点是物平面上的点混合叠加生成的。 $T$  表示目标区域,  $B$  表示背景区域,两部分区域在成像过程中经过运动模糊及像素位移叠加,得到观测图像  $g(x, y)$ 。 $n(x, y)$  表示附加噪声。 $h_1$  和  $h_2$  为不同的运动模糊 PSF,虽然  $T$ 、 $B$  分别经过  $h_1$  和  $h_2$  的模糊叠加作用得到  $g$  的

过程是空间移变非线性的,但其各自区域的模糊都是线性的。

观测图像可以表示为全目标、全背景、目标背景叠加 3 个区域。例如圆形目标相对背景水平向右运动产生叠加区(如图 1 所示)。背景区域的运动模糊由相机的运动性质决定,目标区域的运动模糊由相机和目标的相对运动速度决定。两区域的运动模糊参数也可以分别进行图像分析得到,但是叠加区域的运动模糊规律较难把握。在实际应用中,为了拍摄到较清晰目标,相机采用小视场拍摄,这样目标在图像中的比例较大,背景灰度就比较干净均匀,对背景灰度均匀的图像进行分析处理有其典型性与应用价值。这里均匀的背景灰度使得叠加区域的模糊规律分析成为可能。

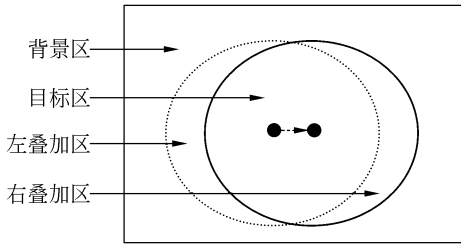


图 1 圆形目标相对背景向右运动产生两个叠加区域  
Fig. 1 Two superposition regions produced by relative motion between round target and background

如果能够分割出目标区和叠加区,并去除叠加区的背景灰度,就能得到完整的目标模糊图像。认为该图像是模糊函数与真实目标图像完全卷积<sup>[12]</sup>的结果,即可以利用常规的反卷积方法复原目标图像,这样就避免了目标边缘信息的丢失所造成的振铃波纹。

### 3 基于像素模糊特征的目标图像分割

在图像处理研究领域中,运动目标的分割大都针对序列图像进行,对于单帧图像则很难处理。为了寻找分割目标图像的方法,首先分析模糊图像的目标与背景像素的位移叠加特征。

#### 3.1 像素运动特点分析

设相机与目标的相对运动为水平方向的线性运动,模糊长度为  $L$  个像素。由于曝光时间很短,目标图像的运动模糊可认为是匀速直线运动,

其模糊函数表示如下<sup>[13]</sup>：

$$h(i, j) = \begin{cases} \frac{1}{L} & \text{若 } 0 \leq i \leq L \text{ 且 } j = 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

运动模糊过程可以用  $h(i, j)$  与真实目标图像卷积表示,该过程实际是运动方向上的像素叠加,并且由于匀速直线运动性质,每个像素经过相邻像素位置的时间是相同的。若真实图像尺寸为  $M \times N$ ,  $h(i, j)$  的尺寸为  $Mh \times Nh$ , 则得到的模糊图像尺寸为  $(M + Mh - 1) \times (N + Nh - 1)$ , 因为分析的是水平运动,所以,  $Mh = L, Nh = 1$ , 得到的模糊图像尺寸为  $(M + L - 1) \times N$ 。既然目标图像垂直方向尺寸不变,则只讨论水平方向的宽度即可。因为要提取的目标区域形状是不规则的,所以按照目标区域的宽度  $M$  和模糊长度  $L$  的大小,分两种情况讨论目标边缘像素的灰度值变化规律。

设真实目标边缘像素灰度值为  $m_i, (i = 1, 2, \dots, L)$ , 均匀背景灰度值为  $b$ 。

#### (a) $M \geq L$ 的情况

经过运动模糊的卷积作用,目标的宽度变为  $M + L - 1$ , 目标背景叠加区域的宽度为  $L - 1$ 。如表 1 列出的左叠加区灰度变化所示: 设  $L = 3$ , 则叠加区域宽为 2。目标区域的相邻像素灰度差  $d = (m_{i+1} - m_i) / 3$ , 叠加区域的  $L$  个相邻像素间隔灰度差  $d = (m_i - b) / 3$ 。

表 1  $M \geq L (L = 3)$  时,目标边缘的灰度值变化情况  
Tab. 1 Gray changes of target edges when  $M \geq L$

	背景区	左叠加区	目标区
目标像素灰度	0	$m_1/3$	$(m_1 + m_2)/3$
背景像素灰度	$b$	$2b/3$	$b/3$
叠加像素灰度	$b$	$\frac{m_1 + 2b}{3}$	$\frac{m_1 + m_2 + b}{3}$
相邻像素之差	$\frac{m_1 - b}{3}$	$\frac{m_2 - b}{3}$	$\frac{m_3 - b}{3}$

#### (b) $M < L$ 的情况

经过运动模糊的卷积作用,目标的宽度变为  $M + L - 1$ , 因为  $M < L$ , 模糊目标总与背景叠加。如表 2 列出的左叠加区的灰度变化所示, 设  $L = 4, M = 2$ , 则叠加区两侧  $M$  个相邻像素间隔上的

灰度差  $d = (m_i - b)/4$ , 其余间隔上灰度差为 0。

表 2  $M < L (L=4, M=2)$  时, 目标边缘的灰度值变化情况

Tab. 2 Gray changes of target edges when  $M < L$

	背景区	左叠加区		
目标像素 灰度	0	$m_1/4$	$\frac{m_1+m_2}{4}$	$\frac{m_1+m_2}{4}$
背景像素 灰度	$b$	$3b/4$	$2b/4$	$2b/4$
叠加像素 灰度	$b$	$\frac{m_1+3b}{4}$	$\frac{m_1+m_2+2b}{4}$	$\frac{m_1+m_2+2b}{4}$
相邻像素 之差	$(m_1-b)/4$	$(m_2-b)/4$		0

可以得到以下结论:

(1) 由于运动模糊作用, 叠加区与背景区交界处的灰度差是真实目标与背景交界处灰度差的  $1/L$ , 从而对比度降低;

(2) 在运动模糊方向上, 分  $M \geq L$  与  $M < L$  两种情况分析, 其差别在于  $M < L$  时没有纯目标区, 并且由于目标边缘像素  $m_i$  的灰度值一般差别不大, 所以叠加区相邻像素灰度差近似相同, 即灰度值呈规律性阶梯状变化;

(3) 在与运动方向垂直的方向上, 目标背景的对对比度不受影响。

### 3.2 模糊目标图像的分割

为了分割出完整的目标模糊图像, 需要将目标区连同叠加区(模糊边界)一起分割出来。由上节结论(1)可以判断, 利用经典的图像分割法<sup>[14-15]</sup>(如幅度分割法和梯度算子检测法)将难以进行目标图像的准确分割; 由于目标边缘与背景的平移叠加, 减小了两者边界处的对比度, 利用幅度分割法不容易设置合适的灰度门限从而确定出目标边界; 并且叠加区像素灰度值在  $L$  长度上的梯度变化都不大, 利用梯度算子也难以准确检测出模糊边界。

但是这类目标与背景空间移变的运动模糊图像有其独特的像素灰度变化特点, 可以基于该特点设计分割算法。由上节结论(2)可知, 叠加区的像素点灰度值呈规律性阶梯状变化, 可将此作为检测模糊边缘的依据。基于像素灰度值变化性质的分割, 能够标识出满足运动模糊方向上的模糊

边缘像素。为了得到模糊目标图像的整体轮廓, 还需要检测平行于运动方向的边缘, 由结论(3)可以利用常见的边缘算子检测该方向上的边缘, 从而分离出完整的目标图像。

该图像分割方法的步骤如下:

#### Step 1 预处理操作

对观测图像中确定为目标区域的部分, 利用 Laplacian 算子<sup>[16]</sup>鉴别目标的运动模糊方向。若可以获得实际中相机和目标的相对运动方向, 用来校正估计误差, 则能得到更准确的结果。利用旋转变换技术, 将图像调整为水平方向上的运动模糊, 旋转变换公式如下:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}. \quad (3)$$

#### Step 2 检测模糊目标边缘

对于坐标为  $(i, j)$  的像素点, 其灰度值表示为  $g(i, j)$ 。假设在水平方向的运动模糊长度为  $L$ , 图像尺寸为  $M \times N$ 。

(1) 根据目标与背景的灰度值  $m_i, b$  及运动模糊长度  $L$ , 设定一个平均的相邻像素灰度差  $\hat{d} = |m_i - b|/L$ , 并设定一个误差值  $r$ , 为满足灰度值变化的相似性,  $r$  取值不宜过大;

(2) 检测  $M \geq L$  时的模糊边缘  $A_1$ : 对图像上每个点  $(i, j)$ , 判断  $(i, j), (i, j+1), \dots, (i, j+L-1)$  这些以  $(i, j)$  为起点或者终点的  $L$  个相邻间隔的灰度差是否近似相等并且满足一个取值范围, 如果满足条件, 则该点属于目标与背景图像重叠区(目标模糊边缘  $A_1$ )。换句话说, 在第  $n$  个相邻像素间隔上, 其相邻像素灰度差表示为  $d[n] = |g(i, j+n) - g(i, j+n-1)| (n=1, 2, \dots, L)$ , 如果  $d[n] (L$  个值) 都满足  $(\hat{d} - r) < d < (\hat{d} + r)$  的条件, 则  $(i, j)$  点属于  $A_1$ ;

(3) 检测  $M < L$  时的模糊边缘  $A_2$ : 对除了标记为目标像素以外的点  $(i, j)$  进行判断, 如果以  $(i, j)$  为起点或者终点的  $M$  个相邻间隔的灰度差在  $\hat{d} - r$  和  $\hat{d} + r$  之间, 则  $(i, j)$  都属于目标模糊边缘  $A_2$ 。另外,  $M$  取值为 1 时, 则在  $M+L-1=L$  长度上的区域都是叠加区, 若该  $L$  个点的灰度都近似为  $[m + (L-1)/b]$  ( $m$  为目标的灰度均值), 则  $(i, j)$  也属于目标模糊边缘  $A_2$ ;

(4) 上两个步骤对于平行于运动方向的目标边缘不敏感, 所以可借助 Canny 边缘算子<sup>[13]</sup>检测

该部分边缘  $A_3$ 。Canny 算子检测到的边缘也包含其它方向的边缘,但是由于模糊边缘的像素模糊特性,使得这些边缘在叠加区内,而不是准确的外边缘,这样将  $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$  进行或运算就能得到包含目标区和叠加区的轮廓;

(5) 为了完整而精确地提取目标区及叠加区与背景区的边界,利用形态学操作来填补边缘缝隙。设定线形结构元,进行膨胀操作。膨胀后的灰度图精确显示了外围轮廓,但是为了从观测图像分割出完整的目标,需要填充轮廓内部的空隙,最后腐蚀操作对图像边缘进行平滑处理;

(6) 在观测图像上利用提取的边缘标出运动目标轮廓,分割完毕。

Step 3: 根据表 1 和表 2 的灰度变化去除模糊边缘(叠加区)的背景灰度信息。

上述步骤获可以得完整的目标,由于在模糊过程中,目标始终在视场内,所以目标与模糊函数是完全卷积的。完全卷积的定义如下:

设  $y = h \otimes x$  是完全卷积的,  $\otimes$  表示卷积运算,  $y, h, x$  分别表示辞书式排列的向量。如果  $x$  长度为  $n_1$ ,  $h$  长度为  $n_2$ , 则  $y$  长度为  $n_1 + n_2 - 1$ 。

由完全卷积定义,目标与背景叠加区在其运动方向的两侧,宽度都为  $L-1$ 。为了获得完整干净的目标图像,需要将两个叠加区的背景信息去除。根据表 1、表 2,将轮廓向目标一侧依次减去灰度值  $(b * i) / L (i=1, 2, \dots, L-1)$ 。

## 4 图像的复原及实验结果分析

给出一幅目标背景空间移变降质图像,如图 2(a)所示,背景运动模糊方向为 20,模糊长度为 10,目标的运动模糊为水平方向,模糊长度为 10。利用目标的模糊 PSF 复原得到结果图 2(b),利用背景的 PSF 复原得到的结果图 2(c)。由图像的恢复效果可以看出,图 2(b)中背景的不同卷积关系影响了目标图像的复原,产生大量的虚假波纹;同理,以背景图像的 PSF 对图像进行复原时,也得不到清晰的背景图像。

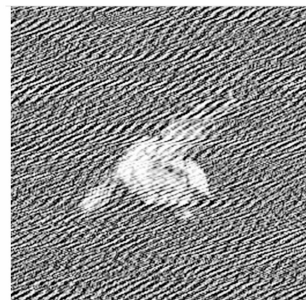
利用上节给出的分割方法进行处理,基于像素灰度值变化性质检测到的模糊边缘如图 2(d)所示,然后利用 Canny 算子检测水平方向的准确边缘如图 2(e)所示,将 2(d)、2(e)叠加并进行形态学操作得到标出边缘的分割结果如图 2(f)所

示。图 2(f)中轮廓内的运动模糊目标,其实是真实目标图像与运动模糊函数完全卷积的结果,利用基本的图像复原算法(如代数复原方法、频域复原方法)处理,即可得到目标的清晰图像。分割出的运动模糊目标,形状是不规则的,因为零灰度的背景不会干扰目标的复原,所以为了便于复原计算,对目标图像周围补零填充为矩形图像。从 2(f)标出的完整目标图像叠加区去除背景信息,并补零扩充得到图 2(g),利用 Wiener 滤波复原算法<sup>[17-18]</sup>得到目标复原图像 2(h)。由于本方法尽可能保存了目标的所有信息,从而能够避免或减轻由于信息丢失造成的目标边缘附近的振铃波纹,主观视觉评价其复原效果良好。



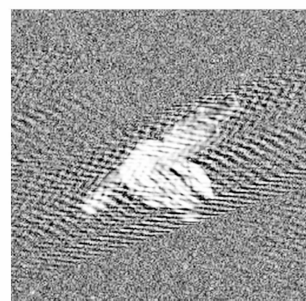
(a)空间移变降质图像

(a)Space-variant blurred image



(b)目标的模糊 PSF 复原

(b)Restored target image by PSF



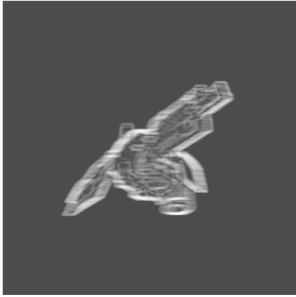
(c)背景的模糊 PSF 复原

(c)Restored background image by PSF



(d) 像素特征检测模糊边缘

(d) Edge detected by character of pixel



(e) Canny 算子检测水平边缘

(e) Edge detected by Canny operator



(f) 标出边缘的分割结果图

(f) Segmented image with ticked edge



(g) 完整的目标模糊图

(g) Whole blurred image



(h) 目标图像复原的结果图

(h) Restored image

图 2 试验结果

Fig. 2 Results of test

利用下式定义的改进信噪比 (ISNR) 作为图像质量改善的客观评价指标:

$$\text{ISNR} = 10 \log \left( \frac{\|f - g\|^2}{\|f - \hat{f}\|^2} \right). \quad (4)$$

为了计算目标图像的复原改进信噪比, 将图 2(b) 复原的目标也用 2(f) 中标出的轮廓线提取出来进行评价, 其 ISNR 值为  $-4.87$  dB, 即其复原结果比观测图像的信噪比还要低, 而本文方法的 ISNR 值为  $9.64$  dB, 大幅改善了目标图像的质量。虽然附加噪声会影响复原效果, 但是在同样的信噪比情况下, 本方法的效果远远优于其它整图复原方法。

## 5 结 论

本文对观测运动目标得到的空间移变降质图像进行讨论, 提出了基于像素运动模糊特征分割的图像复原方法。试验发现本方法得到的结果具有良好主观视觉效果, 其 ISNR 值为  $9.64$  dB, 远远优于整图复原方法的  $-4.87$  dB。该方法给出了一条解决空间移变运动模糊图像复原的有效途径, 虽然其有效性局限于背景灰度较均匀的运动目标图像, 但是由于该类图像在现实中的普遍性, 本文算法对于多数高速运动物体的观测识别具有实用价值, 而对于复杂背景情况的运动模糊目标图像复原将是进一步研究的方向。

## 参考文献:

- [1] ANDREWS H C, HUNT B R. *Digital Image Restoration* [M]. Englewood Cliffs, NJ, USA: Prentice-Hall Inc., 1977:126-186.
- [2] SAWCHUK A A. Space-variant system analysis of image motion[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1973, 63(9): 1052-1063.
- [3] 洪汉玉,张天序. 非零边界旋转运动模糊图像的恢复算法[J]. *中国图像图形学报*, 2004, 9(3): 265-274.  
HONG H Y, ZHANG T X. Restoration algorithm for rotational motion blurred images with non-zero boundary [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2004, 9(3): 265-274. (in Chinese)
- [4] 李勇,李平,文玉梅. 光学成像系统空间移变降质的最小二乘约束复原[J]. *中国图形图像学报*, 2006, 11(8), 1180-1187.  
LI Y, LI P, WEN Y M. Constrained least-square restoration of space-variant blurs resulting from optical imaging systems[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2006, 11(8): 1180-1187. (in Chinese)
- [5] 邹谋炎. 反卷积和信号复原[M]. 北京:国防工业出版社, 2004:189-190.  
ZOU M Y. *Deconvolution and Signal Recovery* [M]. Beijing: Defense Industry Press, 2004: 189-190. (in Chinese)
- [6] SAWCHUK A A. Space-variant image restoration by coordinate transformations [C]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1974, 42(2):138-144.
- [7] ROBBINS G M, HUANG T S. Inverse filtering for linear shift-variant imaging systems [J]. *Proc. IEEE.*, 1972, 60(7): 862-872.
- [8] ANGWIN D, KAUFMARR H. Image restoration using a reduced order model Kalman filter[J]. *Acoustics Speech and Signal Processing*, 1988, 2: 1000-1003.
- [9] TEKALP A M, PAVLOVIC G. Space-variant and color image restoration using Kalman filtering[C]. *Proc. Inc. Symp. CAS.*, 1989, 9-12.
- [10] TRUSSELL H J, HUNT B R. Image restoration of space-variant blurs by sectioned methods [J]. *IEEE Trans., Acoustics Speech, Signal Proc.*, 1987, 26:608-609.
- [11] JAMES G N, DIANNE P, LEARY O. Fast iterative image restoration with a spatially-varying PSF [R]. *University of Maryland at college Park*, 1997.
- [12] ELLIOTT D F. *Handbook of Digital Signal Processing* [M]. New York: Academic Press, 1987.
- [13] 贾平,张葆,孙辉. 航空成像像移模糊恢复技术[J]. *光学精密工程*, 2006, 14(4):697-703.  
JIA P, ZHANG B, SUN H. Restoration of motion-blurred aerial image [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(4): 697-703. (in Chinese)
- [14] CANNY J F. A computational approach to edge detection[C]. *IEEE Trans. PAMI*, 1986, 8(6): 679-698.
- [15] FRANCIS H Y. Adaptive thresholding by variational method[J]. *IEEE Trans. on Image Processing*, 1998, 7(3): 468-473.
- [16] 陈前荣,陆启生,陈礼智. 利用拉氏算子鉴别运动模糊方向[J]. *计算机应用*, 2004, 24(9): 4-6.  
CHEN Q R, LU Q SH, CHENG L ZH. Motion blur direction identification in motion blur image by Laplacian[J]. *Computer Applications*, 2004, 24(9): 4-6. (in Chinese)
- [17] 孙辉,张葆,刘晶红. 基于维纳滤波的运动模糊消除算法及其在航空成像系统中的应用[J]. *光学精密工程*, 2005, 13(6): 735-740.  
SUN H, ZHANG B, LIU J H. Restoration of motion-blurred image based on Wiener filter and its application in aerial imaging system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(6): 735-740. (in Chinese)
- [18] 李仕,孙辉,张葆. 运动模糊图像的实时恢复算法[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(5): 767-772.  
LI SH, SUN H, ZHANG B. Restoration of motion-blurred image [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(5): 767-772. (in Chinese)

## 作者简介:



张玉叶(1980—),女,山东日照人,博士研究生,主要从事图像处理、图像复原等方面的研究。E-mail: amigo\_yezi@sohu.com



王春歆(1979—),男,吉林人,博士研究生,主要从事图像处理和微小目标检测等方面的研究。E-mail: nsfcityhunter@sina.com

## 导师简介:



周晓东(1940—),男,辽宁沈阳人,教授,博士生导师,主要从事光电成像技术的研究。E-mail: xiaodong\_zhou@sina.com

## ● 下期预告

## Over-plating 工艺过程的变网格数值模拟分析

朱学林,王 翔,褚家如

(中国科学技术大学 光学精密机械与精密仪器系,安徽 合肥 230026)

考察了 over-plating 工艺中不同线距、线宽条件下的电沉积规律。利用数值模拟方法对图形结构轮廓和电沉积速度之间的相互影响进行了分析;同时采用变网格方法以适应电沉积过程中结构轮廓的不断变化。数值模拟结果表明:当线距/线宽之比较大( $>12$ )时,相邻图形的电沉积速度受到的影响很小,图形的横向和纵向的电沉积速度逐渐趋于一致;而当线距/线宽比较小时( $<6$ ),相邻电沉积图形之间相互影响显著,线距/线宽比越小,纵向电沉积速度和横向电沉积速度之比越大,因此相邻电沉积图形中间区域可能产生空洞,从而出现电镀缺陷的情形。对于上述工艺缺陷,可以通过增加辅助导电层进行消除,实验结果表明效果良好。