

文章编号 1004-924X(2010)09-2116-07

线阵相机场曲复原及在异纤检测中的应用

王 季^{1,2}, 陆文凯¹

(1. 清华大学自动化系智能技术与系统国家重点实验室, 北京 100084;

2. 煤炭科学研究总院西安研究院, 陕西 西安 710054)

摘要: 为了消除相机的场曲给成像带来的空变模糊, 提高图像分辨率和检测精度, 针对在工业检测中广泛使用的线阵相机, 提出了一种消除场曲影响的一维图像复原方法。在分析了空变模糊矩阵结构的基础上, 通过估算部分区域的点扩散函数, 再由偏移和插值得到全像场范围内的模糊矩阵。由模糊矩阵利用约束最小二乘法得到与观测信号无关的复原矩阵。检测过程中, 将采集到的图像信号与复原矩阵相乘, 获得复原后的图像。采用检测棉流内异性纤维的异纤检测系统, 用含有较细异纤的实际数据对方法进行验证。结果表明, 本方法在提高图像边缘处分辨率的同时增强了异常点与背景的差异, 异常比增加了10%以上, 为进一步提高检测精度创造了条件。

关键词: 线阵相机; 场曲; 约束最小二乘; 空变模糊; 图像复原

中图分类号: TP391.4; O438 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20101809.2116

Restoration of field curved image from line camera and its applications in foreign fiber detecting

WANG Ji^{1,2}, LU Wen-kai¹

(1. *State Key Laboratory of Intelligence Technology and System, Department of Automatics, Tsinghua University, Beijing 100084, China;*

2. *Xian Research Institute, China Coal Research Institute, Xian 710054, China*)

Abstract: To eliminate the spatially variant blurs caused by a field curvature from a camera and to improve the resolutions and the measuring precisions of images, a 1D image restoration method was proposed to overcome the influence of field curvature on an image from the camera used in industrial inspections. On analysis of the spatially variant blur matrix, the Point Spread Functions (PSFs) of a partial region were estimated and then the blur matrix of whole image field was computed by shifting and interpolation. On the basis of the blur matrix, the restored matrix which was unrelated to the observed signal was obtained by the constrained least square algorithm. In inspection, the restored image could be obtained by multiplying the acquired signals with restored matrix. This method has been applied in foreign fiber detecting systems and verified by real images containing fine fibers. Obtained results show that this method can improve the image resolution and enhance the difference between

background and irregular points by 10%. Therefore, it improves the detecting accuracies for images.

Key words: linear camera; field curvature; constrained least square; space variant blur; image restoration

1 引言

线阵相机已广泛应用于纺织、印染、印刷、造纸、包装等多个行业的工业检测中,通过线阵 CCD 可将光信息转变为一维视频信号输出,从而对连续运动的物体成像。与面阵相机相同,线阵相机采集得到的一维图像会不可避免地受到镜头场曲的影响,使得图形的中心处和边缘处模糊程度不一致。这样,当调节焦距使得像场中心清晰时,像边缘就会模糊;反正亦然。另外,在实际的工程应用中,由于安装误差很难保证光轴与预定的物面垂直,也会加重像边缘处的模糊程度。工业检测对图像分辨率具有较高要求,因此,消除场曲造成的成像模糊现象,在工业检测领域中具有重要的意义。

存在场曲现象的光学系统是典型的空变系统,系统的点扩散函数(Point Spread Function, PSF)受到像面坐标和物面坐标的同时作用,像中心和像边缘处的 PSF 不一样。如果采用常用的图像复原方法,用中心处的 PSF 对整幅图像进行复原,那么边缘处就不能达到满意的复原效果。解决这个问题的一种常用方法是坐标变化法^[1-2],即通过坐标变换将空变 PSF 变换成为空不变 PSF,从而利用空不变方法实现图像复原。这种方法由于需要知道 PSF 的显示形式,并要求其可变换,因此在应用上有一定的局限性。另一种常用方法是对图像分区域处理,在每个子区域内假定 PSF 是空不变的^[3],然而这种方法会在各个子区域边缘产生较大的寄生纹波^[4-5]。另外,也可从硬件上进行改进,以克服场曲现象^[6]。

与分区域进行空不变复原不同,本文提出的方法首先通过测试获得部分区域的 PSF,再由这些 PSF 合成退化矩阵。在获得退化矩阵后,通过约束最小二乘方法对采集到的一维图像进行复原。

2 空变退化矩阵

一维的观测信号 $g(x)$,原信号 $f(t)$,点扩散函数 $h(x,t)$,以及观测噪声 $n(x)$ 的关系可以用下

式表示:

$$g(x) = \int_{\Omega} h(x,t)f(t)dt = n(x), \quad (1)$$

其中: x 和 t 分别为像场和物场坐标,将上式写成矩阵形式,即

$$\mathbf{g} = \mathbf{H}\mathbf{f} + \mathbf{n}, \quad (2)$$

其中: \mathbf{g} , \mathbf{f} 和 \mathbf{n} 是长度为 N 的矢量, \mathbf{H} 是大小为 $N \times N$ 的退化矩阵。对于空不变系统,点扩散函数 $h(x)$ 是空不变的,则退化矩阵 \mathbf{H} 是一个 Toeplitz 矩阵。观测信号 $g(x)$ 可以看作是 $h(x)$ 与原信号 $f(t)$ 的卷积,并添加了噪声 $n(x)$ 的结果,即:

$$g(x) = h(x) * f(t) + n(x), \quad (3)$$

其中: $t \in [1, M]$, $x \in [1, N]$ 。式(3)的求解过程可利用快速傅里叶变换完成,具有较高的执行速度。

然而当 h 是空变 PSF 时,图像的退化过程不能用类似式(3)的卷积模型表示, \mathbf{H} 也不再是一个 Toeplitz 矩阵。如果将 \mathbf{H} 划分为 P 个子块,每个子块的大小为 L ,并认为每个子块内的点扩散函数 h 是不变的,则 \mathbf{H} 为

$$\mathbf{H} = \sum_{i=1}^P \mathbf{D}_i \mathbf{H}_i, \quad (4)$$

其中: \mathbf{H}_i 是由第 i 个子块内的函数 h_i 构成的轮换矩阵。 \mathbf{D}_i 是从第 $(i-1)L+1$ 行到第 iL 行的对角线元素为1,其余都为0的特殊矩阵^[7-8]。 \mathbf{H}_i 和

\mathbf{D}_i 的大小均为 $N \times N$, $\sum_{i=1}^P \mathbf{D}_i = \mathbf{I}$ 。注意到当 $L=1$ 时, \mathbf{D}_i 为一个大小为 N 的行矢量,其元素中只有 $d_i=1$,其余都为0。而 \mathbf{H}_i 则是由相场坐标 i

对应的点扩散函数 h_i 所构成的轮换矩阵。因此, \mathbf{H} 可以看作是由像场中每一个点的点扩散函数所组合成的矩阵,其中任意一行所构成的行矢量 \mathbf{p}_i 都是由 h_i 扩展而来,即

$$\mathbf{p}_i = [0, \dots, 0, \underbrace{h_i(-k_i)}_{i-k}, \dots, \underbrace{h_i(0)}_{2k+1}, \dots, \underbrace{h_i(k_i)}_{N-i-k_i}, 0, \dots, 0]$$

$$\mathbf{H} = [\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2, \dots, \mathbf{p}_N]^T, \quad (5)$$

通过后补零使每个 h_i 的支撑域为奇数,并使其等于 $2k_i+1$ 。由于 PSF 函数的性质, h_i 的最大值一般位于中间位置 $h_i(0)$ 处,因此将 $h_i(0)$ 作为 \mathbf{p}_i 的第 i 个元素,这样构造出来的矩阵 \mathbf{H} 对角线上元

素较大, \mathbf{H} 的非奇异性较好。

像场中各点对应 h_i 的支撑域大小和取值可通过测量和估计得到。当只知道部分 h_i 时, 需要通过插值产生其他点的 h_i 。简单的方法是采用线性插值, 并且每个未知点的 h_i 只由与该点最邻近的两个已知点的 h_i 产生。设已知 $x=u$ 和 $x=v$ 处的点扩散函数为 h_u 和 h_v , 首先通过补 0 使 k_u 和 k_v 相等, 则 $x=i$ 处的 h_i 为

$$h_i(j) = (i-u)h_u(j) + (v-i)h_v(j), \quad (6)$$

$$1 \leq j \leq k_i, k_i = \max(k_u, k_v)$$

这样通过测量和插值得到各点的 h_i , 由式(5)组合出线阵相机场曲现象对应的空变模糊矩阵 \mathbf{H} 。

3 基于约束最小二乘的图像复原

在获得退化矩阵 \mathbf{H} 后, 如果直接利用最小二乘法对采集到的图像做图像复原, 由于 \mathbf{H} 矩阵由偏移和插值产生, 病态性较高, 因此复原的结果噪声干扰十分敏感。为解决这一问题, 本文采用约束最小二乘的方法, 在要求误差平方和最小的同时, 要求恢复出的图像应尽量平滑, 即

$$\operatorname{argmin}_f \|\mathbf{g} - \mathbf{H}\hat{\mathbf{f}}\|^2, \quad (7)$$

$$s. t. \min \|\mathbf{C}\hat{\mathbf{f}}\|^2$$

其中: $\hat{\mathbf{f}}$ 是复原后的图像, \mathbf{C} 是由 Laplace 算子扩展而成的 $N \times N$ 的矩阵。对于一维图像信号, 采用的是将矢量 $[-1, 2, -1]$ 按照与式(5)类似的方法构成轮换矩阵。用 Lagrange 乘子法求解式(7), 得到

$$\hat{\mathbf{f}} = \mathbf{B}\mathbf{g} = (\mathbf{H}^T\mathbf{H} + \lambda\mathbf{C}^T\mathbf{C})^{-1}\mathbf{H}^T\mathbf{g}, \quad (8)$$

其中 λ 是正则项的系数。可通过 Brent 等迭代的方法查找 $\lambda^{[9]}$, 使得

$$\|\mathbf{g} - \mathbf{H}\hat{\mathbf{f}}\|^2 = \|\mathbf{n}\|^2. \quad (9)$$

在将此方法用于实际工业检测的过程中, 空变退化矩阵 \mathbf{H} 在检测开始之前通过测量和估计产生, 同时可测量出噪声的总功率 $\|\mathbf{n}\|^2$, 并由此计算出 λ 的取值, 从而得到式(8)中的复原矩阵 \mathbf{B} 。这样在后来的检测中, 每次复原只需要对采集到的待测图像 \mathbf{g} 乘以复原矩阵 \mathbf{B} 即可得到复原后的图像。由于 \mathbf{B} 在检测中固定不变, 因此不占用检测的计算时间。另一方面, 由于是对一维信号处理, \mathbf{B} 的大小为 $N \times N$, 不像处理二维图像

的复原矩阵那样巨大, 并且是稀疏矩阵, 因此直接进行矩阵相乘仍然具有较高的执行效率。另外, \mathbf{g} 可以是一维图像所构成的矢量, 也可以是多个连续的一维图像所拼接成的二维矩阵, 通过与 \mathbf{B} 相乘就可对多线数据同时处理。在很多数据处理系统中, 矩阵相乘的计算过程可由硬件并行完成, 如基于 GPU 的方法^[10]等, 具有很高的执行效率。

4 在异纤检测系统中的应用

异性纤维检测系统是机器视觉技术在棉纺行业的重要应用之一, 其目的是将混杂在原棉中的毛发、丙纶丝、碎布等异性纤维识别并分拣出来, 从而提高棉纺产品的质量。目前, 对于如毛发等较细纤维的检测一直作为技术难点没有突破。

异纤检测系统多采用线阵相机对棉流进行拍摄。由于受空间所限, 一般选用广角镜头以尽量减少相机距棉流的距离。本文设计的异纤检测系统采用 Basler L401kc 线阵相机以及 Nikon Nikkor 20 mm 广角镜头。由于广角镜头的场曲问题比较严重, 所采集到图像的分辨率从通道中央到两边逐渐降低, 这将对毛发等极细纤维的检测结果产生较大的影响。如果采用常用的分段 Wiener 滤波的方法, 虽然算法具有较高的计算效率, 但是在检测毛发等较细的线状结构时, 分段产生的寄生纹波可能会被检测算法误判, 从而增加系统的误检率。

采用本文方法首先需要对部分区域的 PSF 进行测量, 得到的测试图是等间距的细线。将测试图放入异纤检测仪的棉道内, 通过成像系统采集测试图的成像结果。为了减少噪声的影响, 可以将一段时间内连续采集的多线图像叠加, 从而获得一个具有较高信噪比的成像结果。图 1 是对测试图连续采集 1 200 line 后叠加并求平均的曲线, 纵坐标为平均后的灰度值, 取值区间为 $[0, 255]$; 横坐标为空间分辨率, 共 4 080 pixel。图中的各个尖峰为不同位置处细线所成的像。在获得成像结果后, 对其进行校正和归一化从而消除由于光照差异而带来的中心处与边缘处的能量差异, 此时中心处和边缘处的细线所成的像由于受到不同 PSF 影响, 宽度和灰度不相同, 图 2 中分别是 510 处和 1 930 处的归一化后的曲线, 从中可看出像场中心附近模糊的作用弱, 其 PSF 支撑

域小,而靠近边缘附近模糊的作用强,PSF 支撑域大,如图 2(a)中支持域为 10 pixel,而图 2(b)中支持域为 4 pixel。首先查找每个峰值点的位置,并比较峰值点附近灰度值是否大于一定阈值,从而确定该点对应 PSF 的支持域,然后将支持域内的各个灰度值作为式(5)中 h_i 的各离散值。在获得部分位置处 h_i 的估计之后,通过(6)式得到模糊矩阵 \mathbf{H} 。

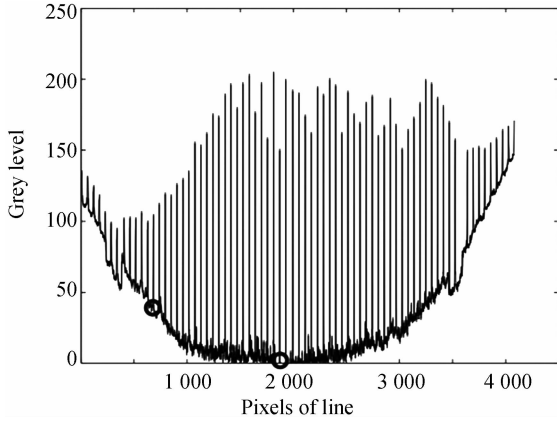
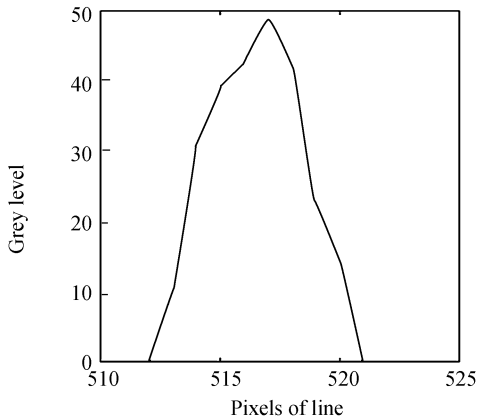


图 1 测试图成像结果的曲线

Fig. 1 Image curve of test picture

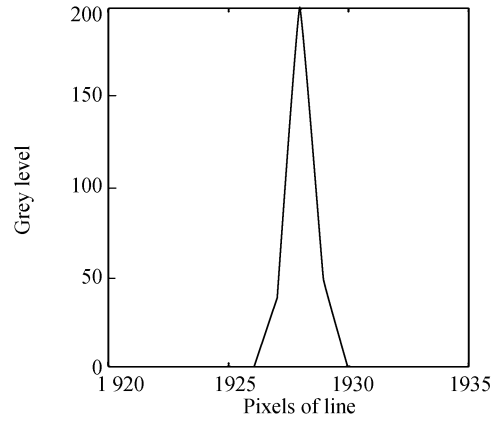
另外,根据图中无细线的区域,可以估测出噪声的总功率 $\|n\|^2$,并由此找出 λ 的取值。根据式(8),得到复原矩阵 \mathbf{B} 。

在异纤检测的过程中,将采集到的待测图像 \mathbf{g} 与复原矩阵 \mathbf{B} 相乘,即可得到复原的图像。由式(8)复原时, λ 的取值为 0.1。图 3(a)是对棉流进行检测时,一次采集到的部分一维图像数据。图中 3 520 处的尖峰是包含在棉花中的一根头发造成的,尖峰附近大于均值的宽度为 5 个点。图



(a)边缘处

(a)Edge of field

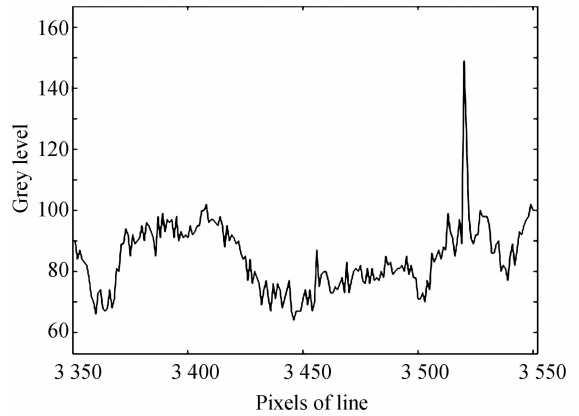


(b)中心处

(b)Center of field

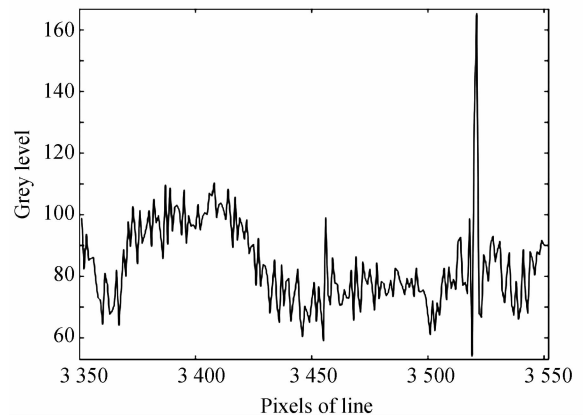
图 2 图 1 中两个位置处归一化后的曲线

Fig. 2 Normalized curves around two marked positions in Fig. 1



(a)恢复前的曲线

(a)Curve before restoration



(b)复原后的曲线

(b)Curve after restoration

图 3 棉流成像结果的部分曲线

Fig. 3 Partial curves of the image of cotton flow

3(b)是用本文方法产生的复原后图像中与图 3(a)相同的部分,尖峰附近大于均值的宽度为 3 个点。可见,通过复原使棉花对应的有效峰值提高,并减少了所占像素的数量,使棉花所对应的图像更为尖锐。提高了待检目标在图像中的分辨率。

图 4 是含棉花的一维图像数据的振幅谱。从中可以看出,经过复原之后,图像的高频部分得到了提高,从而提高了图像的分辨率。

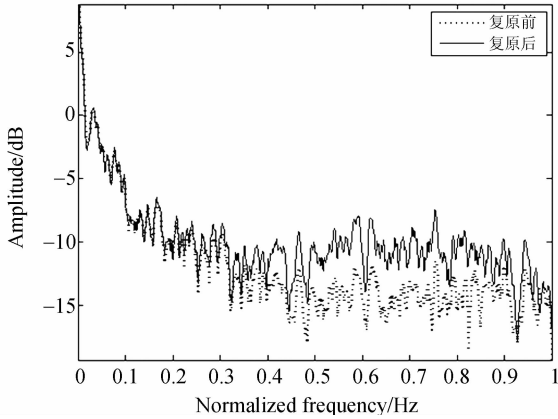


图 4 复原前后成像结果的振幅谱

Fig. 4 Spectra of images before and after restorations

表 1 列出了复原前后这段数据的均值、奇异点灰度以及二者的比。从中可以看出,异常比提高了 14.4%,因此可认为复原方法在提高了图像分辨率的同时,增强了异常点与背景的灰度差异。

表 1 复原前后的均值、异常值及异常比

Tab.1 Mean of data, values of different points, and the ratio of this two values before and after restorations

	复原前	复原后
均值	84.36	83.67
异常值	149	169
异常比	1.77	2.02

图 5 是采样速度为 5 kline/s 时,采集 320 line 所组成的棉花图像,其中白色框标出的区域含有头发。

图 6(a)是这一区域的放大图,图 6(b)是复原后图像的对应区域。由图 6 可以看出,场曲降低了头发与周围棉花背景的灰度差异程度,通过图像复原,在提高分辨率的同时增大了灰度差异,这样就为识别出头发等异纤提供了良好的基础。对图 6(a)和图 6(b)中含异纤的各列求均值和异

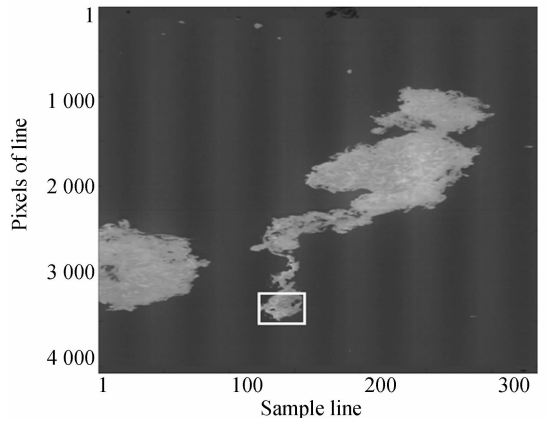
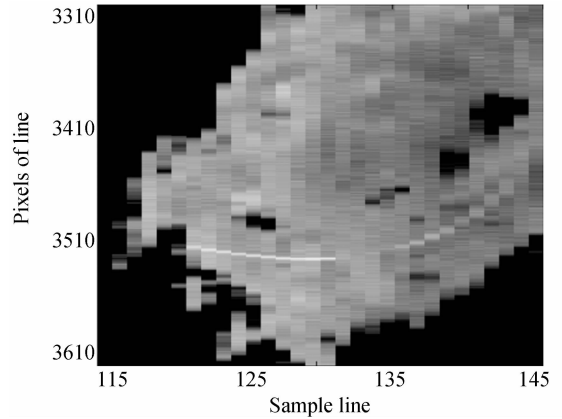


图 5 采集多线后组成的棉花图像

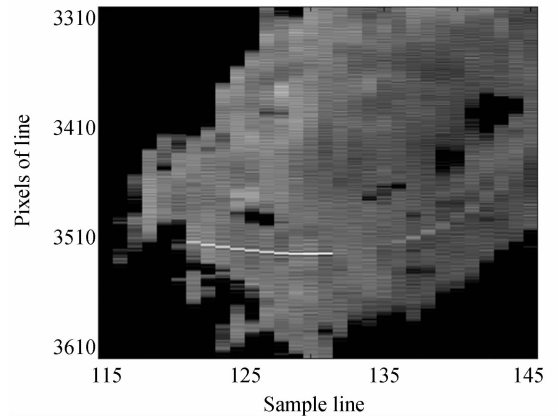
Fig. 5 Image of cotton assembled by multiple lines acquisition

常值,即可得到平均的异常比,分别是 1.86 和 2.07,提高了 11.3%。



(a)复原前图像

(a)Image before restoration



(b)复原后图像

(b)Image after restoration

图 6 图 5 中标记区域的放大图

Fig. 6 Partial images of Fig. 5

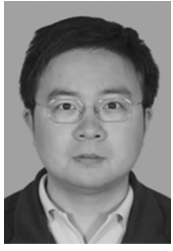
5 结 论

本文讨论了在工业检测中,线阵相机场曲问题对检测精确的影响,提出了一种针对一维图像信号消除空变模糊的图像复原方法,并结合异纤检测的实际应用,对方法的有效性进行了检验。试验结果证明本方法能够有效提高待测图像在邻近边缘处的分辨率,同时能增强异常点与背景之间的差异,使异常比提高10%以上,从而为高精度的检测算法提供基础。另外,此方法中复原矩阵的构造过程与待检图像的复原过程独立,可在检测之前完成复原矩阵的构造,节约了检测的用时。

参考文献:

- [1] SAWCHUK A A. Space-variant image restoration by coordinate transformations[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1974, 64(2):138-144.
- [2] 邹谋炎. 反卷积和信号复原[M]. 北京:国防工业出版社, 2004:184-286.
ZOU M Y. *Deconvolution and Signal Recovery* [M]. Beijing: Defense Industry Press, 2004: 184-286. (in Chinese)
- [3] TRUSSELL H J, HUNT B R. Image restoration of space-variant blurs by sectional methods[J]. *IEEE Trans. on Acoustics, Speech, & Signal Processing*:1978,26:608-609.
- [4] 朱俊,文玉梅,李平. 一种像场弯曲的图像复原方法[J]. *光学精密工程*, 2003,11(6):621-626.
ZHU J, WEN Y M, LI P. Restoration of field-curved images[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2003,11(6):621-626. (in Chinese)
- [5] 张玉叶,周晓东,王春歆. 应用像素运动模糊特征分割的空间移变降质复原[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(5):1119-1126.
ZHANG Y Y, ZHOU X D, WANG CH X. Space-variant blurred image restoration based on pixel motion-blur character segmentation[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009,17(5):1119-1126. (in Chinese)
- [6] THELEN B J, PAXMAN R G, CARRARA D A, et al.. Overcoming turbulence-induced space-variant blur by using phase-diverse speckle[J]. *Journal of Optics Society of America*, 2009, 26(1): 206-218.
- [7] NAGY J G, O'LEARY D P. Restoring images degraded by spatially-variant blur[J]. *SIAM Journal on Scientific Computing*, 1998,19:1063-1082.
- [8] BARDSLEY J, JEFFERIES S, NAGY J G, et al.. A computational method for the restoration of images with an unknown, spatially-varying blur[J]. *Optics Express*, 2006,14(5):1767-1782.
- [9] VAN KEMPEN G M P, VAN VLIET L J. The influence of the regularization parameter and the first estimate on the performance of Tikhonov regularized non-linear image restoration algorithms[J]. *Journal of Microscopy*, 2000,198:63-75.
- [10] 苏畅,付忠良,谭雨辰. 一种在GPU上高精度大型矩阵快速运算的实现[J]. *计算机应用*, 2009(4): 1177-1192.
SU CH, FU ZH L, TAN Y CH. Fast operation of large-scale high-precision matrix based on GPU [J]. *Journal of Computer Applications*, 2009, (4):1177-1192.

作者简介:



王 季(1977—),男,陕西西安人,博士,助理研究员,1999年于西安理工大学获学士学位,2003年、2007年于西北工业大学分别获得硕士、博士学位,主要从事数字图像处理、工业视频检测等方面的研究。E-mail: wangji@mail.tsinghua.edu.cn



陆文凯(1969—),男,湖南邵阳人,博士,教授,博士生导师,1991年于清华大学获学士学位,1996年于中国石油大学获博士学位,主要从事信号处理理论及在工业视频检测、石油勘探开发、生物学医学图像等方面的研究。E-mail: lwkmf@mail.tsinghua.edu.cn

(本栏目编辑:白雨虹)

● 下期预告

电纺直写纳米纤维在图案化基底的定位沉积

李文望^{1,2}, 郑高峰¹, 王 翔¹, 孙道恒¹

(1. 厦门大学 机电工程系, 福建 厦门 361005; 2. 厦门理工学院 机械工程系, 福建 厦门 361005)

为进一步提高单根电纺丝纳米纤维的定位沉积和形貌控制水平,加快电纺直写技术的工业化应用,基于近场静电纺丝技术,研究了单根直写纳米纤维在无图案硅基底的沉积行为;仿真分析了图案化硅基底上方的空间电场分布;采用图案化硅基底作为收集板,通过实验考察了微图案形状、收集运动速度等因素对单根纳米纤维定位沉积的影响规律。电纺直写纳米纤维直径 100~800 nm,可精确定位于直径仅为 1.6 μm 的圆形微图案阵列上表面;收集板运动速度较小时,受电场力影响纳米纤维沉积轨迹将朝微图案偏移 7 μm ;当收集板运动速度进一步减小时,纳米纤维在基底微图案附近或上表面产生聚集;长条形微图案对纳米纤维沉积过程具有良好的引导与约束作用。研究表明,基于近场静电纺丝的直写技术可较好地实现单根纳米纤维在图案化硅基底的精确定位沉积。