

光学显微镜图像恢复及在数字图像相关方法应变测量中的应用

韩伟, 吴丹*

宁波大学机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211

摘要 数字图像相关法作为一种直接有效的非接触、全场光学测量方法,已广泛地应用于各个领域材料和结构的二维/三维位移和应变测量。结合先进的散斑制备技术,在显微镜下进行原位加载实验,可实现微尺度数字图像相关位移和应变测量。微尺度下试样加载过程中将不可避免地出现离面位移,由于光学显微镜景深限制,微小的离面位移将导致散斑图像失焦模糊,从而为变形测量带来相应的误差。为减小这种失焦模糊带来的误差,采用盲去卷积方法对散斑图像去模糊,并针对噪声问题采用高斯滤波的方法对散斑图像进行去噪,定量分析了图像复原对数字图像相关测量精度的影响,并对 indium tin oxide (ITO) 薄膜进行了拉伸实验。实验结果表明,图像复原后测量的弹性模量误差减小了 13.91%,应变测量结果的精度与稳定性更高。

关键词 图像处理; 数字图像相关; 图像复原; 噪声去除; 微尺度; 变形测量

中图分类号 TP751 文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP221822

Optical Microscopy Image Restoration and Its Application in Strain Measurements Using the Digital Image Correlation Method

Han Wei, Wu Dan*

School of Mechanical Engineering and Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, Zhejiang, China

Abstract As a direct and effective non-contact full-field optical measurement method, the digital image correlation method has been widely used in 2D/3D displacement and strain measurements of materials and structures in various fields. Combined with advanced speckle preparation technology, in situ loading experiments are conducted under a microscope, which can realize the displacement and strain measurements of micro-scale digital image correlation. Out-of-plane displacement inevitably occurs in the loading process of specimens at the micro scale. Because of the limitations of the depth of field of optical microscopes, small out-of-plane displacement leads to defocus blurring of speckle images, which generates a corresponding error in deformation measurements. To reduce the error caused by out-of-focus blur, the blind deconvolution method is used to blur the speckle image, and the Gaussian filtering method is used to denoise the speckle image to address noise problems. The effects of image restoration on the digital image correlation measurement accuracy are analyzed quantitatively, and a stretching experiment of an indium tin oxide (ITO) film is conducted. Experimental results show that the error in elastic modulus measurement after image restoration is reduced by 13.91%, and the accuracy and stability of the strain measurement results are higher.

Key words image processing; digital image correlation; image restoration; noise removal; micro-scale; deformation measurement

1 引言

数字图像相关法(DIC)^[1]自 20 世纪 80 年代被提出以来,以其非接触、高精度、低成本等优势被广泛应用于宏观和微观尺度材料或物体的全场位移和变形测

量^[2-7],该方法从参考图像(或原图像)中围绕感兴趣像素点选择一个图像子区,并跟踪该图像子区在变形后图像(或目标图像)中的位置以获得图像子区中心点的位移矢量。按同样的方法对参考图像中感兴趣区域内的多个像素点进行同样的相关计算即可获得该计算区

收稿日期: 2022-06-13; 修回日期: 2022-07-15; 录用日期: 2022-08-20; 网络首发日期: 2022-08-29

通信作者: *wudan@nbu.edu.cn

域的位移场和应变场^[8]。借助于先进的显微设备和微纳米尺度散斑制备技术^[9-11],可实现微纳尺度的数字图像相关变形测量。例如,结合数字图像相关方法和扫描电镜技术,可实现扫描电镜下微尺度全场变形测量^[12-15],并且已有相当多的研究证明利用原子力显微镜和数字图像相关技术可实现纳观尺度变形测量^[16]。透射电镜数字图像相关方法^[17]、光学显微镜数字图像相关方法等^[18]均已被用来实现微观尺度变形测量表征。光学显微镜数字图像相关方法的特点是以光学显微镜采集的实时显微图像作为变形前后的散斑图进行相关运算,来定量计算全场位移和应变。光学显微镜数字图像相关方法的优点是既能满足微观尺度变形测量的需求,又不用专门对显微镜进行特殊改造,只需设计与显微镜匹配的加载装置^[19],便可实现光学显微镜下原位加载实验,因此光学显微镜数字图像相关方法在实际应用中占有很大优势^[20-22]。

在实际测量中,被测物平面与显微镜平面(像面)之间存在一定偏差,加载方向也会与像平面存在一定偏差。光学显微镜的景深较小,会导致视场出现非均匀的失焦模糊,此外被测材料的泊松效应以及颈缩现象等各种因素的存在,同样会导致加载过程中试样表面出现离面位移^[23]。由于光学显微镜景深的限制,微小的离面位移就会导致图像模糊,从而为数字图像相关方法的计算带来相应的位移和应变测量误差^[24]。

因此有必要通过对失焦模糊图像进行去模糊来减小这种误差。通常使用的失焦模糊图像复原方法有逆滤波复原法、维纳滤波复原法、约束最小二乘法、正则化方法等^[25]。图像逆滤波复原算法的另一个名称是反向复原方法,是最早使用的一种无约束复原方法^[26],该方法假设模糊图像是由其对应清晰图像卷积点扩散函数得到的,因此在已知点扩散函数的情况下,将图像从空间域转换到频率域中,进行逆卷积操作后再转换到空间域对图像进行还原。但该方法将噪声当作零均值高斯白噪声处理,导致图像噪声在逆卷积过程中被放大,在此基础上研究者们提出维纳滤波图像复原法^[27]。维纳滤波通过在复原的近似图像与原图像之间寻求最小均方误差的方法来解决噪声在逆卷积过程中被放大这一问题,但在实际应用时,点扩散函数和噪声函数都难以估计使得该方法本身存在局限性^[28]。为了克服以上的缺点,近几十年来,研究者们研究了图像盲去模糊算法,致力于寻求模糊核或者清晰图像的先验知识,然后将先验知识作为正则项对解空间进行约束从而引申出一系列方法,以正则化技术为基础的图像复原方法有许多,如 TV 正则化方法、全变差正则化方法、快速非凸非光滑最小化方法、LR 正则化方法等,但各种方法均有其优缺点^[29]。近几年神经网络技术在图像复原领域得到了一定的发展,通过选择适合的神经网络训练样本和参数来复原图像^[30],但需要的训练样本与实验数据工程量很大,相比之下正则化复原方法更具有

实际应用的价值,能够更好地解决复原过程中存在的病态问题,应用更加普遍。

针对光学显微镜在加载过程中产生的散斑图像失焦模糊对 DIC 测量带来的误差,本文采用盲去卷积方法复原失焦模糊的散斑图像。针对噪声问题,采用高斯去噪的方法对复原后的散斑图像进行降噪,通过对不同失焦程度的散斑图像进行复原,并通过图像亚像素平移的方法来验证失焦模糊的散斑图像复原的效果,通过数字图像相关方法定量分析盲去卷积复原方法对测量精度的影响。最后对 indium tin oxide (ITO) 薄膜进行光学显微镜原位拉伸实验,对比分析拉伸后失焦模糊的散斑图在复原前后对测量精度的影响。

2 理论分析

2.1 失焦模糊的散斑图像对 DIC 测量误差的理论分析

图 1 为清晰的散斑图像与失焦模糊的散斑图像和各自对应的灰度直方图,当清晰的图像由于失焦而变模糊时,这个过程可以用一个平滑滤波器(PSF)卷积一张清晰的图像来模拟,失焦模糊的滤波函数通常用高斯滤波器来代替^[31]。高斯滤波^[32]的基本原理是先对图像进行加权操作,然后平均化,使得图像中的每一个像素值都是由它自身像素值和临界区域的其他像素值加权平均获得的。对比图 1(a2)与图 1(b2)也可看出,失焦模糊引起的类似高斯图像平滑效果,使得失焦模糊的散斑图像相对于未失焦散斑图像的灰度分布整体更集中于右侧,灰度值从高到低分布跨度更平缓。

二维高斯分布可表示为

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right), \quad (1)$$

式中: σ 表示高斯滤波器宽度,且 σ 和平滑处理的程度有关, σ 值与平滑效果成正比。

图像是一个二维函数,设为 $f(x, y)$,其偏微分为

$$\frac{\partial f(x, y)}{\partial x} = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{f(x + \epsilon, y) - f(x, y)}{\epsilon}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial f(x, y)}{\partial y} = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{f(x, y + \epsilon) - f(x, y)}{\epsilon}. \quad (3)$$

因为图像是一个离散的二维函数, ϵ 不能无限小,图像是按照像素来离散的,最小的 ϵ 就是 1 pixel。因此,式(2)、(3)的图像微分变为如下形式($\epsilon=1$):

$$\frac{\partial f(x, y)}{\partial x} = f(x + 1, y) - f(x, y) = f_x(x, y), \quad (4)$$

$$\frac{\partial f(x, y)}{\partial y} = f(x, y + 1) - f(x, y) = f_y(x, y). \quad (5)$$

式(4)、(5)分别是图像在 (x, y) 点处 x 方向和 y 方向上的灰度梯度,可以看出,图像的梯度相当于两个相邻像素之间的差值。失焦模糊所引起的类似高斯图像

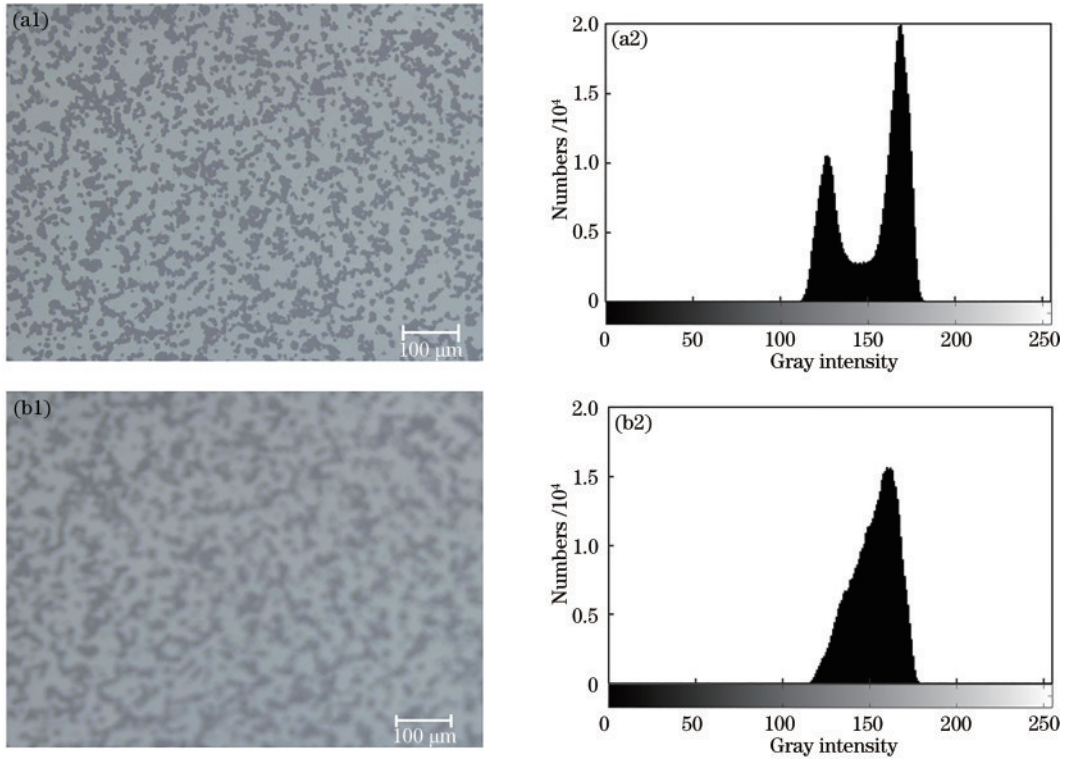


图 1 散斑图像及其对应的灰度直方图。(a1)(a2)清晰的;(b1)(b2)失焦模糊的

Fig. 1 Speckle images and its corresponding grayscale histograms. (a1) (a2) Clear; (b1) (b2) defocus blurred

平滑的过程必然会导致图像的灰度值变化程度的减少即两个相邻像素之间的差值减少,所以图像在 x 方向和 y 方向上的灰度梯度会下降。而 Pan 等^[33]和 Wang 等^[34]的研究结果都显示(以 x 方向平移的分析结果为

例),测量位移的均值误差 $E(u_e)$ 是灰度插值误差 $r(x, y)$ 、噪声标准差 σ^2 、亚像素位移 τ_x 以及图像子区灰度梯度平方和 $\sum_{x=1}^N \sum_{y=1}^N [f_x(x, y)]^2$ 的函数:

$$E(u_e) \cong \frac{\sum_{x=1}^N \sum_{y=1}^N [-r(x, y) \cdot f_x(x, y)] + (1 - 2\tau_x) \cdot N^2 \cdot \sigma^2}{\sum_{x=1}^N \sum_{y=1}^N [f_x(x, y)]^2} \quad (6)$$

测量位移的标准差 $\text{std}(u_e)$ 是 σ 和图像子区灰度梯度平方和的函数:

$$\text{std}(u_e) \cong \frac{\sqrt{2} \sigma}{\sqrt{\sum_{x=1}^N \sum_{y=1}^N [f_x(x, y)]^2}} \quad (7)$$

而失焦模糊可以近似模拟成高斯平滑滤波,会导致灰度梯度下降,灰度梯度平方和减小,且图像的模糊程度越大即高斯的平滑程度越高,图像噪声标准差 σ 值越大,式(7)位移的标准差即随机误差 $\text{std}(u_e)$ 增大,而式(6)中位移的均值误差 $E(u_e)$ 还与灰度插值误差 $r(x, y)$ 有关,在 Hu 等^[35]的研究中数字图像相关性计算误差包括随机误差和插值误差。随机误差与图像噪声和图像的灰度梯度有关,而高频分量是插值误差的主要来源,从而提出了一个称为零频谱比(R_{ZSR})的新概念来量化频谱分量:

$$R_{\text{ZSR}} = \frac{\max[\text{FFT}(g)]}{\text{sum}[\text{FFT}(g)]} \quad (8)$$

式中: $\text{FFT}(g)$ 表示散斑图像的傅里叶变换; $\max[\text{FFT}(g)]$ 和 $\text{sum}[\text{FFT}(g)]$ 分别是频谱的最大值和总和。 R_{ZSR} 代表零阶谱的比例,值越大,则插值误差越小。

而从式(7)可以看出,数字图像相关性计算的随机误差与图像灰度梯度有关,平均灰度梯度表达式为

$$\delta_f = \frac{\sum_{x=1}^W \sum_{y=1}^H |\Delta f(x, y)|}{W \times H} \quad (9)$$

式中: W 和 H (以 pixel 为单位) 是图像的宽度和高度; $|\Delta f(x, y)|$ 是每个像素点灰度梯度矢量的模。平均灰度梯度 δ_f 的值越大,随机误差越小,然而平均灰度梯度值越大,散斑图像的高频分量也越多,导致插值误差增大^[36-37],这两者本质上是互相矛盾的。因此,为了判断散斑图像从清晰到失焦模糊的过程,随机误差与插值误差对数字图像相关测量位移的均值误差 $E(u_e)$ 的影响程度,以图 4 作为基准,分别采集物镜镜头远离试样表面 $0 \sim 44 \mu\text{m}$ 相邻两幅散斑图间隔为 $4 \mu\text{m}$ 的不同程度的失焦模糊散斑图像,分别用式(8)与式(9)计算,结果如图 2 所示。

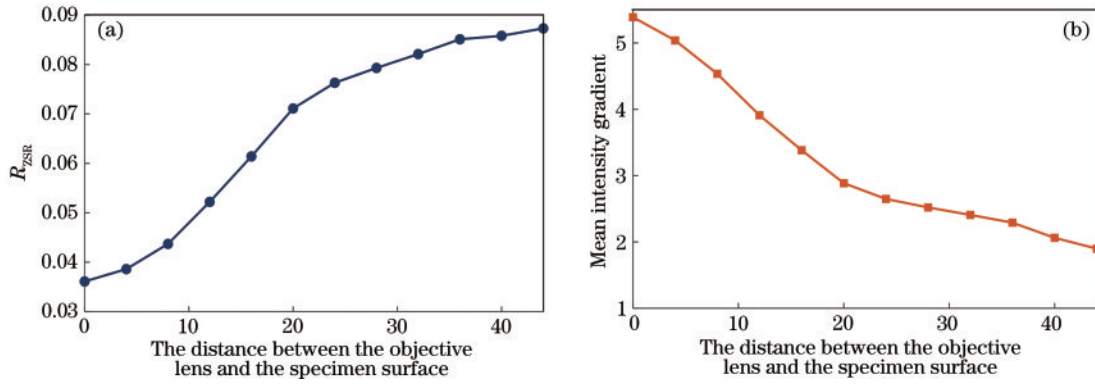


图 2 失焦模糊的散斑图 R_{ZSR} 值与对应的灰度梯度平方和值。(a) R_{ZSR} 值; (b) 对应的灰度梯度平方和值

Fig. 2 R_{ZSR} value of the speckle image and corresponding gray gradient sum value. (a) R_{ZSR} value; (b) corresponding gray gradient sum value

从图 2 可以看出,随着物镜镜头远离试样表面的距离增大,散斑图像的失焦模糊程度增大,其平均灰度值减小,随机误差增大,然而随着平均灰度梯度值越小,散斑图像的高频分量也越少, R_{ZSR} 值增大,插值误差减少,为了验证最终误差即测量位移的均值误差 $E(u_e)$ 的变化趋势,利用傅里叶变换中的相移定理对各幅散斑图进行精确控制的空域平移^[38],分别对采集物镜镜头远离试样表面 0~44 μm 相邻两幅散斑图间隔为 4 μm 的不同程度的失焦模糊散斑图像水平方向平移 0.2 pixel 作为变形后的数字图像序列,对图像平移后,使用 Ncorr 开源 DIC 程序对其进行计算,计算区域为 200 pixel \times 150 pixel,计算子区为 21 pixel \times 21 pixel,位移相对误差的表达式为

$$u_e = \frac{u_{\text{mean}} - u_{\text{imp}}}{u_{\text{imp}}}, \quad (10)$$

式中: u_{mean} 为 n 点位移计算结果的算术平均值; u_{imp} 为预加的真实亚像素位移,计算结果如图 3 所示。

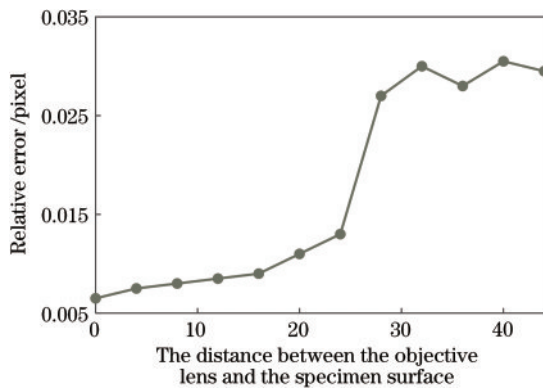


图 3 平移 0.2 pixel 后的位移相对误差

Fig. 3 Relative error of displacement after translation of 0.2 pixel

从图 3 可以看出,随着物镜镜头远离试样表面的距离增大,散斑图像的失焦模糊程度增大, DIC 计算的位移相对误差是增加的,所以在散斑图像模糊程度增大时,随机误差增大要大于插值误差减少对 DIC 计算的位移相对误差的影响,因此对散斑质量评价时以平

均灰度梯度值来判断。

2.2 图像复原理论

为了减小上述由于失焦模糊的散斑图所导致的 DIC 测量误差,采用盲去卷积复原的方法来复原失焦模糊的散斑图。通常认为图像的失焦模糊可由清晰图像卷积点扩散函数得到^[39]:

$$g(x, y) = f(x, y) * h(x, y) + n(x, y), \quad (11)$$

式中: $g(x, y)$ 为模糊图像; $f(x, y)$ 为模糊图像对应的清晰图像; $h(x, y)$ 为模糊点扩散函数; $n(x, y)$ 为加性噪声; * 代表卷积计算。

2.3 盲复原算法

传统的经典图像复原算法,如逆滤波、维纳滤波等图像复原算法都假设 PSF 即 $h(x, y)$ 是已知的,但 $h(x, y)$ 在多数情况下是未知的且难以准确估计。因此,采用盲去卷积的方法^[40-42]进行图像复原,该方法可以在先验知识未知的情况下复原图像,该方法以最大似然估计(MLE)为基础,即一种用被随机噪声所干扰的量进行估计的最优化策略。关于最大似然函数方法的一种解释就是将图像数据看成随机量,它与另外一组可能的随机量之间有着某种似然性,似然函数用 $g(x, y)$ 、 $f(x, y)$ 和 $h(x, y)$ 来表达,然后问题就变成了寻求最大似然函数。在盲去卷积中,最优化问题用规定的约束条件并假定收敛时通过迭代来求解,得到的 $f(x, y)$ 和 $h(x, y)$ 就是还原的图像和 PSF。

$$f^{n+1}(x, y) = \left[\frac{g(x, y)}{h^n(x, y) * f^n(x, y)} * h^n(-x, -y) \right] f^n(x, y), \quad (12)$$

$$h^{n+1}(x, y) = \left[\frac{g(x, y)}{h^n(x, y) * f^n(x, y)} * f^n(-x, -y) \right] h^n(x, y), \quad (13)$$

式中, n 表示迭代次数。采用盲去卷积进行图像复原的同时会带来另一个问题,即图像噪声也会被放大,为了减少噪声的干扰,通常要对所研究的图像进行平滑

处理,适度的图像平滑可以减少图像的噪声。采用式(1)高斯平滑滤波对最终复原后的散斑图像进行去噪,并用伽马变换对高斯滤波后的散斑图像的对比度进行校正,伽马变换可以修正灰度过高或者灰度过低的图像,增强对比度。

$$s = c \cdot r^\gamma, \quad (14)$$

式中: r 为输入图像归一化后的灰度值; s 为经过伽马变换后输出图像的灰度; c 为灰度缩放系数,通常取1; γ 为伽马因子,根据 γ 的不同取值选择性地增强低灰度区域的对比度或是高灰度区域的对比度。

3 实验

3.1 失焦的散斑图像的采集与复原过程

采用KEYENCE VHX-1000超景深光学显微镜,显微镜配置的步进电机可精确控制物镜镜头的上下移动,图5显示了不同失焦程度的显微镜散斑图像($\times 200$),以图4作为基准,图5(a)~(f)分别为物镜镜头远离试样表面22、26、30、34、38、42 μm 的散斑图像。实验所用微尺度散斑场通过对聚二甲基硅氧烷(PDMS)和碳粉颗粒(平均直径10 μm)混悬液进行离心甩胶制

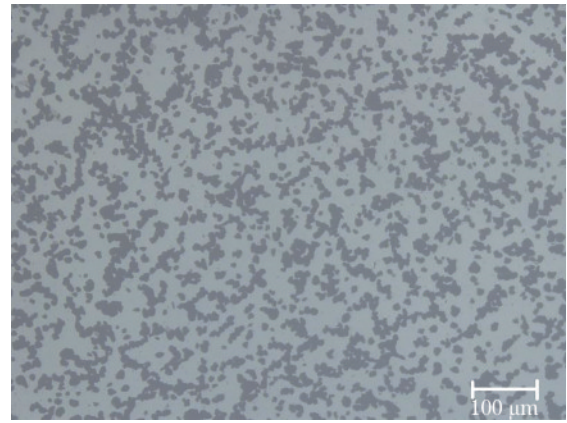


图4 未失焦散斑图(800 pixel \times 600 pixel)
Fig. 4 Clear speckle image (800 pixel \times 600 pixel)

备得到,PDMS与碳粉的质量比为10:1。

分别对图5(a)~(f)不同失焦程度的散斑图进行图像复原,根据式(12)、(13)使用盲目反卷积的方法复原,该方法只需选取 $h(x, y)$ 的大小作为初值,以图5(c)失焦模糊的散斑图复原过程为例,分别采用 3×3 、 7×7 、 11×11 、 13×13 、 15×15 、 17×17 大小的PSF初始估计值,迭代次数为10次。

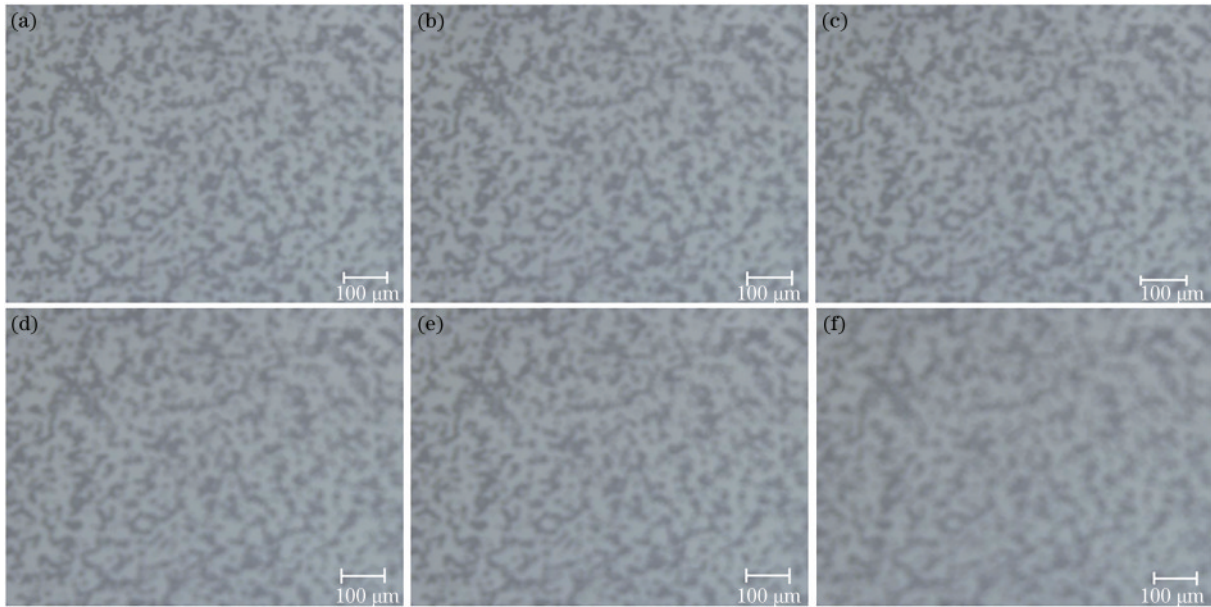


图5 不同失焦程度的散斑图(800 pixel \times 600 pixel)。(a)~(f)物镜镜头远离试样表面22、26、30、34、38、42 μm
Fig. 5 Speckle patterns with different defocusing degrees (800 pixel \times 600 pixel). (a)~(f) Objective lens 22, 26, 30, 34, 38, 42 μm away from sample surface

根据第2.1节的结论可知,失焦模糊的散斑图在盲去卷积图像复原方法前后的散斑场的质量与散斑图像平均灰度梯度呈正相关,即平均灰度梯度越大,散斑

图像质量越好。由式(9)计算的复原前后平均灰度梯度如表1所示。

表1 不同大小PSF复原前后的平均灰度梯度

Table 1 Mean intensity gradient before and after restoration in different sizes of PSF

Parameter	Pre-restored	3×3	7×7	11×11	13×13	15×15	17×17
Mean intensity gradient	2.4901	3.3249	4.3151	4.7481	5.2160	4.9207	4.3432

平均灰度梯度理论认为迭代计算后平均灰度梯度值最大的图像复原效果最佳,以图 5(c)失焦模糊的散斑图盲去卷积的复原结果为例,从表 1 可以看出,PSF 大小为 13×13 时迭代计算后其平均灰度梯度值最大,因此选取图 6(d)为最终的盲去卷积复原图像。但复原后的图像不可避免会放大噪声,为了减少噪声对数字图像相关计算结果的影响,采用高斯去噪的方法来

抑制噪声。对图 6(d)采用式(1)高斯滤波的方法进行去噪,选取的高斯模板大小为 $[5, 5]$,标准差为 1。并用式(14)伽马变换对去噪后的散斑图的对比度进行矫正, γ 值为 1.3。图 5(c)复原前失焦模糊的散斑图与图 6(d)最终复原后高斯去噪对比度校正后的散斑图对比如图 7 所示。

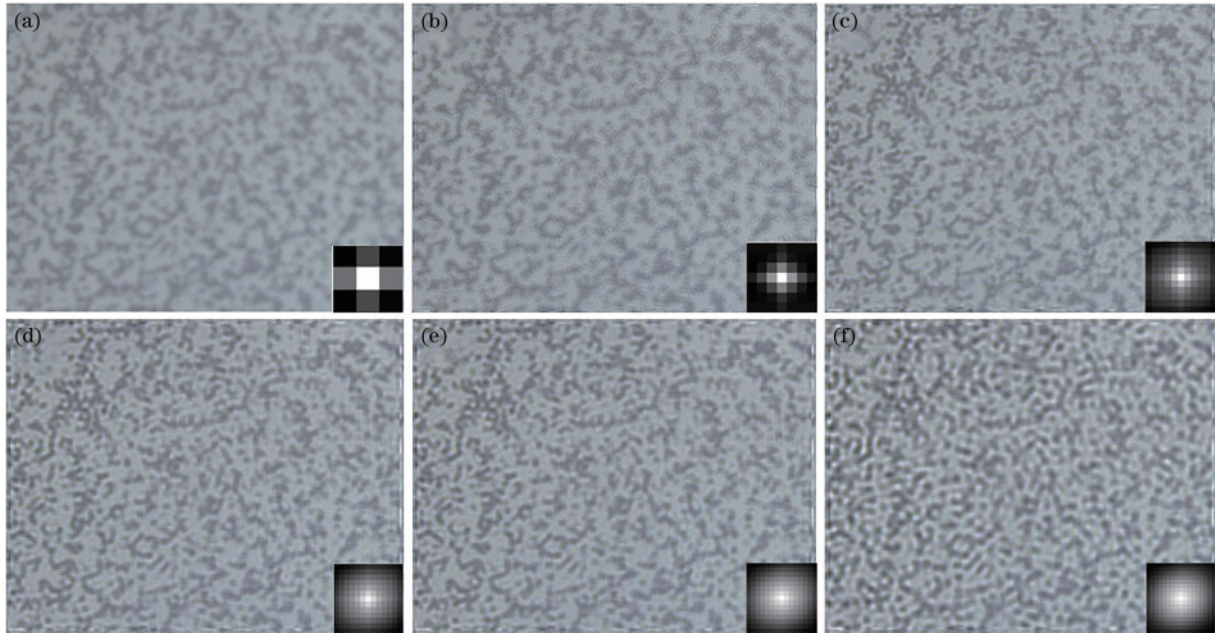


图 6 不同大小的 PSF 盲去卷积复原结果(800 pixel \times 600 pixel)。(a)~(f) $3 \times 3, 7 \times 7, 11 \times 11, 13 \times 13, 15 \times 15, 17 \times 17$

Fig. 6 Blind deconvolution restoration results for different sizes of PSF (800 pixel \times 600 pixel). (a)~(f) $3 \times 3, 7 \times 7, 11 \times 11, 13 \times 13, 15 \times 15, 17 \times 17$

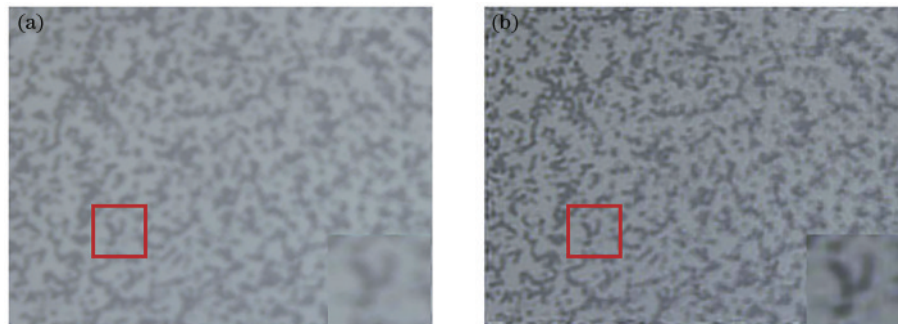


图 7 复原前后对比。(a)复原前失焦模糊的散斑图;(b)最终复原后高斯去噪对比度校正散斑图

Fig. 7 Comparison before and after recovery. (a) Defocus blurred speckle image pre-restored; (b) Gaussian denoise contrast-corrected speckle image after final restoration

3.2 数值模拟实验

首先用数值模拟实验来验证采用盲去卷积方法复原失焦模糊的散斑图像对提高数字图像相关计算精度的有效性。在数值模拟实验中,利用傅里叶变换中的相移定理对各幅散斑图进行可精确控制的空域平移^[38],分别将图 5(a)~(f)的 6 幅在光学显微镜下采集的失焦模糊的散斑图、对应的最终复原后和去噪对比度校正后的散斑图像在水平方向平移 0.2 pixel 作为变形后的数字图像序列,为了进一步验证盲去卷积复原

失焦的散斑图对数字图像相关计算精度的影响,分别选取图 5(a)、(c)、(f)等 3 幅失焦模糊的散斑图、对应的最终复原后和去噪对比度校正后的散斑图像在水平方向连续平移 10 次作为变形后的数字图像序列,每次相邻两幅图的平移量为 0.1 pixel,最大平移位移为 1 pixel。随后用数字图像相关方法计算上述平移后的散斑图像的位移,结果分析中采用位移的相对误差来定量评价失焦模糊的散斑图在复原前后数字图像相关方法的位移计算结果并与预加位移相比较。

4 结 果

以图 5(c)失焦模糊的散斑图盲去卷积的复原过

程为例,图 8 为失焦模糊的散斑图盲去卷积复原前后的散斑图、去噪对比度校正后的散斑图及其对应的灰度直方图。

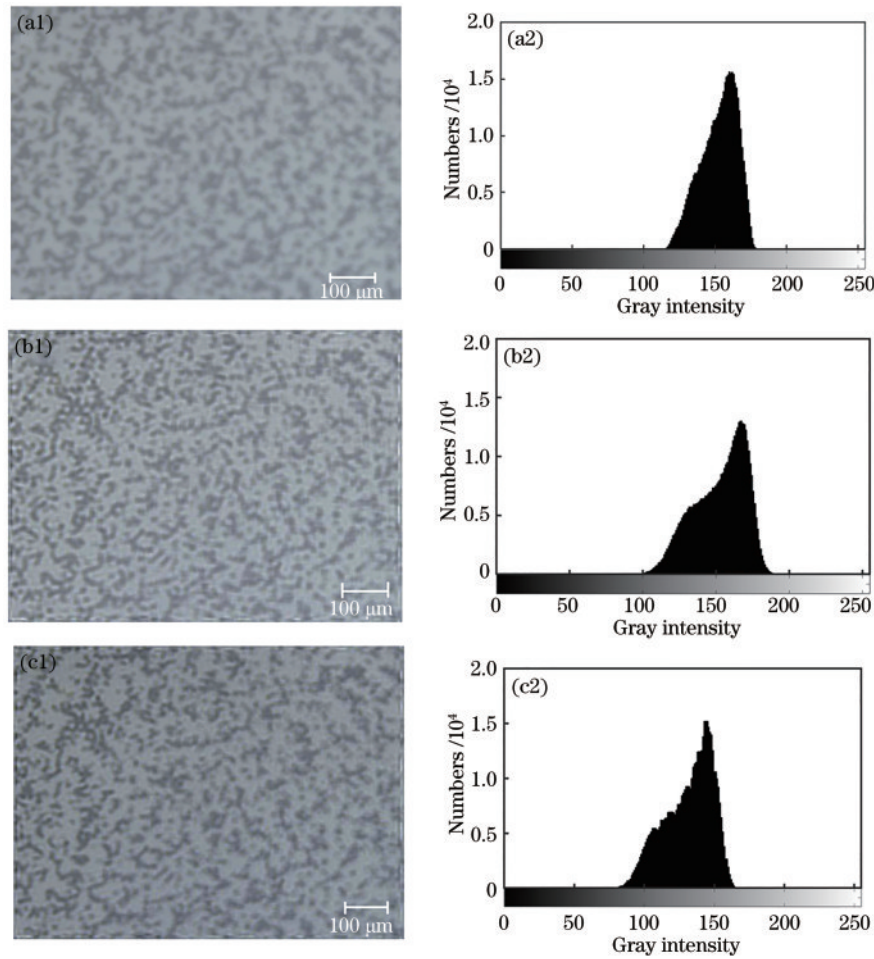


图 8 复原前失焦模糊的散斑图像、盲去卷积复原后散斑图及高斯去噪对比度校正后散斑图与其各自对应的灰度直方图。(a1)(a2)复原前失焦模糊的散斑图像与其对应的灰度直方图;(b1)(b2)盲去卷积复原后散斑图与其对应的灰度直方图;(c1)(c2)高斯去噪对比度校正后散斑图与其对应的灰度直方图

Fig.8 Defocused blurred speckle images before restoration, the blind deconvolution restored speckle images and the Gaussian denoising contrast corrected speckle images and their corresponding gray level histograms. (a1) (a2) Defocused blurred speckle image and its corresponding gray histogram before restoration; (b1) (b2) blind deconvolution restored speckle pattern and its corresponding gray histogram; (c1) (c2) Gaussian denoising contrast corrected speckle pattern and its corresponding gray histogram

图 9 显示的是对图 5(a)~(f)等 6 幅不同失焦程度的散斑图采用不同大小的模糊核(3×3~17×17)、迭代次数为 10 时复原结果的平均灰度梯度。从图 9 结果依次选取每幅图平均灰度梯度值最大时的复原图,作为盲去卷积最终的复原图像。

图 10 显示的分别是图 5(a)~(f)等 6 幅不同失焦程度的散斑图与对应的盲去卷积最终复原图像、高斯去噪对比度校正后并在水平方向位移 0.2 pixel 后的散斑图像由数字图像相关计算的位移相对误差,数字图像相关的计算区域为 200 pixel×150 pixel,计算子区为 21 pixel×21 pixel。从图 10 可以看出,用盲去卷积复原失焦模糊的散斑图像并用高斯滤波去噪以及伽马变换进行对比度校正后,数字图像相关计算的位移相

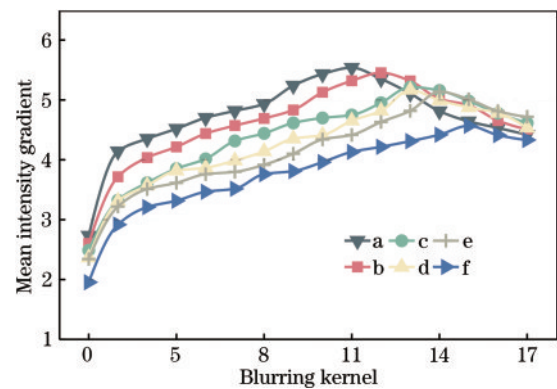


图 9 不同失焦模糊散斑图复原结果的平均灰度梯度
Fig.9 Average gray gradient of restoration results of different defocused blurred speckle patterns

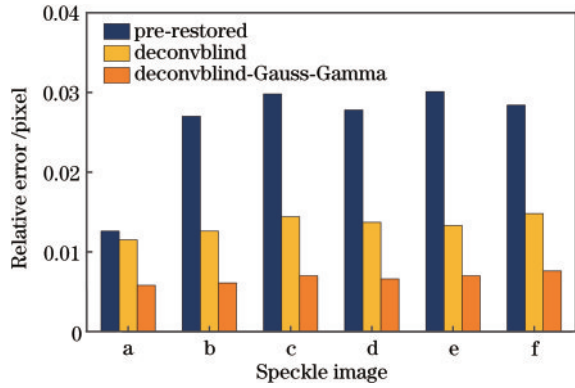


图 10 不同图像的位移相对误差

Fig. 10 Relative displacement error of different images

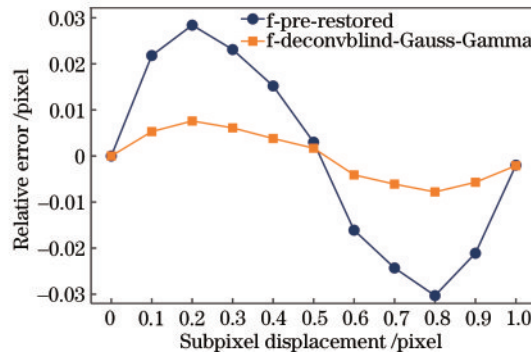
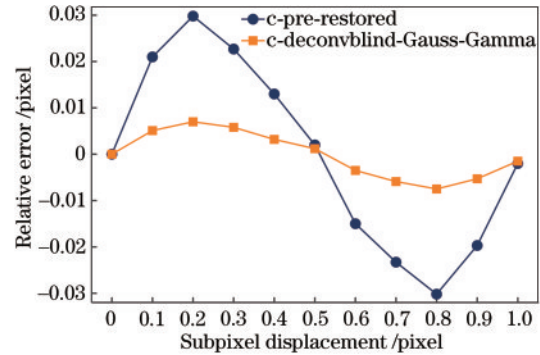
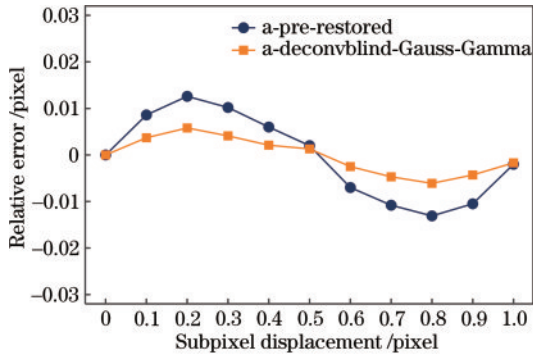


图 11 平移量为 0~1 pixel 时的位移相对误差

Fig. 11 Relative error of calculated displacement when translation amount is 0~1 pixel

5 应用

为验证失焦模糊的散斑图像在盲去卷积复原后对应变测量精度的影响,在光学显微镜($\times 500$)下进行 ITO 薄膜的拉伸实验,拉伸试样厚度为 0.125 mm,宽度为 4 mm。在 0~4.4 N 载荷下,每隔 0.4 N 采集一幅图像,图 12(a)~(f)分别为不同载荷下散斑图。

从 2.8 N 开始随着载荷的增大,离面位移增大,散斑图逐渐失焦,将 2.8~4.4 N 载荷下每隔 0.4 N 失焦模糊的散斑图像用盲去卷积复原后经过高斯去噪与伽马对比度校正。以 3.6 N、4.4 N 载荷下失焦模糊的散斑图复原为例,盲去卷积复原后经过高斯滤波和对比度校正结果如图 13 所示。

对误差更小,散斑质量与计算精度有明显提高。

图 11 显示的分别是图 5(a)、(c)、(f)的失焦模糊的散斑图像与盲去卷积进行复原后进行高斯去噪对比度校正后的散斑图像连续水平平移 10 次时的位移相对误差,相邻两幅图的平移量为 0.1 pixel,最大平移位移为 1 pixel。DIC 计算区域为 200 pixel \times 150 pixel,计算子区为 21 pixel \times 21 pixel。从图 11 可以看出,相对误差是亚像素位移的函数,且近似为周期为 1 pixel 的正弦分布。Scherier 等^[38]的研究显示这种周期分布的误差由亚像素插值算法引起,在 0.1~0.9 pixel 位移复原去噪后散斑图与复原前相比数字图像相关计算的位移相对误差明显更小。

对复原前后的散斑图进行数字图像相关计算,分别选取 4 个不同的计算区域,分别记为计算区域 1、2、3、4,计算区域的大小为 200 pixel \times 150 pixel,计算子区为 21 pixel \times 21 pixel,图 14(a)显示的是区域 1 的 0~4.4 N 载荷下计算的应力应变拟合曲线。复原前计算弹性模量为 1.5047 GPa,最终复原后计算弹性模量为 1.7612 GPa,将 ITO 通过拉伸机在 0~4.4 N 拉伸得到的应力应变曲线,拉伸计算弹性模量结果为 1.8434 GPa。复原前的弹性模量相对误差为 18.37%,最终复原后的弹性模量相对误差为 4.46%,复原后弹性模量相对误差提升了 13.91 个百分点。图 14(b)为 2.8~4.4 N 载荷下失焦模糊的散斑图最终复原前后的应变误差对比,不难发现,复原后的应变误

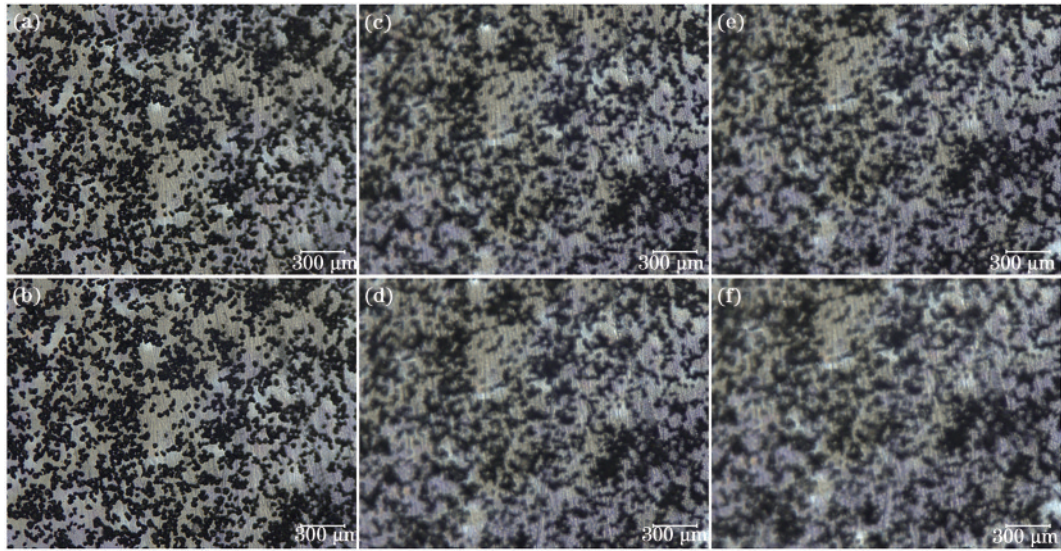


图 12 不同载荷下的散斑图。(a)~(f) 1 N、2 N、3.2 N、3.6 N、4.0 N、4.4 N

Fig. 12 Speckle images under different loads. (a)~(f) 1 N, 2 N, 3.2 N, 3.6 N, 4.0 N, 4.4 N

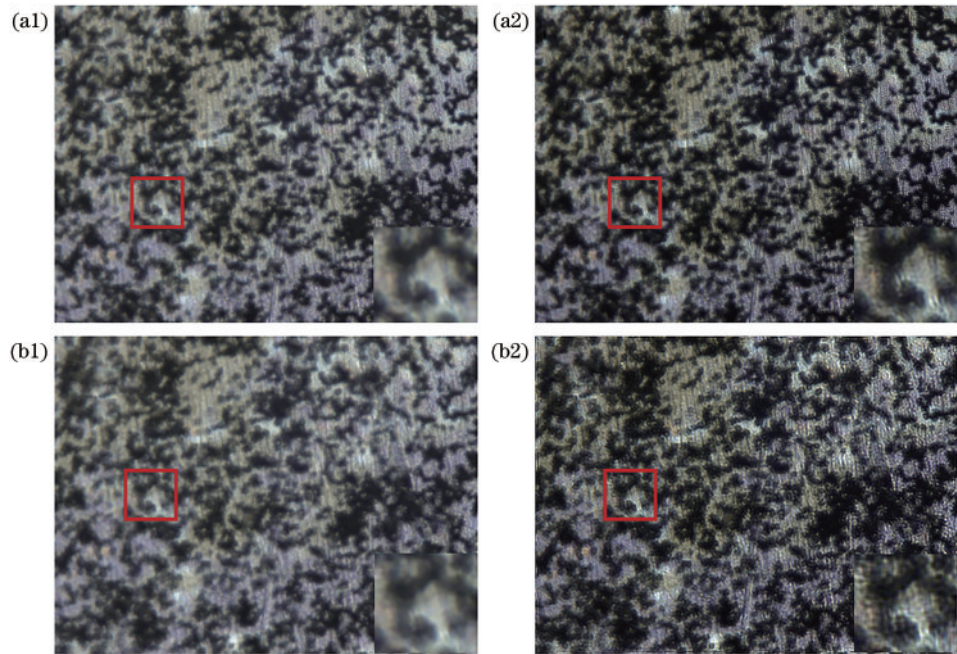


图 13 不同载荷下失焦模糊的散斑图与复原后的散斑图。(a1)(a2) 3.6 N; (b1)(b2) 4.4 N

Fig. 13 Speckle images with defocus blur and final restored speckle images under different loads. (a1) (a2) 3.6 N; (b1) (b2) 4.4 N

差更稳定且计算精度更高。表 2 为 2.8~4.4 N 载荷下失焦模糊的散斑图的 4 个不同计算区域在复原前后的应变误差统计值,可以看出,复原后的最大误差与均方

根误差(RMSE)均比复原前小,对比分析表明对散焦模糊的图像复原可以提高应变测量精度,且测量结果稳定性更高。

表 2 2.2~4.4 N 载荷下散斑图复原前后数字图像相关计算的应变误差统计值

Table 2 Statistical value of strain error calculated by digital image correlation before and after restoration of speckle image under 2.2~4.4 N load

ITO film stretching	Pre-restored		Deconvblind-Gauss-Gamma	
	Maximum error / ϵ	RMSE / ϵ	Maximum error / ϵ	RMSE / ϵ
Region 1	1.06×10^{-3}	0.27×10^{-3}	0.23×10^{-3}	0.05×10^{-3}
Region 2	0.92×10^{-3}	0.21×10^{-3}	0.20×10^{-3}	0.04×10^{-3}
Region 3	1.21×10^{-3}	0.34×10^{-3}	0.31×10^{-3}	0.11×10^{-3}
Region 4	1.16×10^{-3}	0.31×10^{-3}	0.27×10^{-3}	0.08×10^{-3}

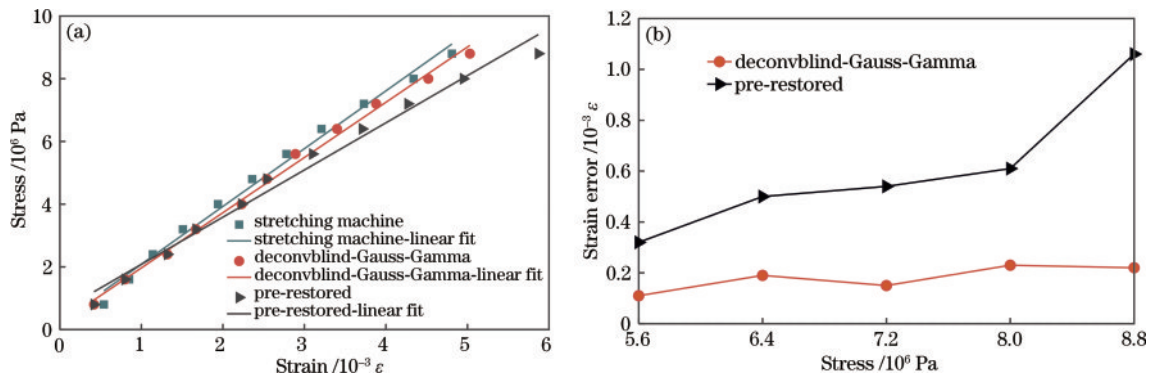


图 14 应力应变拟合曲线与误差对比。(a) 0~4.4 N 载荷下散斑图复原前后应力应变线性拟合;(b) 2.2~4.4 N 载荷下散斑图复原前后误差对比

Fig.14 Stress-strain fitting curve and error comparison. (a) Stress-strain linear fitting before and after restoration of speckle image under 0~4.4 N load; (b) error comparison before and after restoration of speckle image under 2.2~4.4 N load

6 结 论

由于光学显微镜景深的限制,离面位移的存在导致散斑图像失焦模糊。采用盲去卷积的方法来复原失焦模糊的散斑图像,数值分析实验结果表明,盲去卷积复原方法提高了数字图像相关的测量精度,同时,针对图像复原后的噪声问题,采用高斯滤波方法来抑制噪声并用伽马变换对图像对比度进行矫正,进一步提高了数字图像相关的测量精度。并开展了 ITO 薄膜试样的拉伸实验,并将失焦模糊的散斑图复原前后的数字图像测量结果与拉伸机法进行比较,实验结果表明,对失焦模糊的散斑图像复原可以提高数字图像相关的测量精度。

参 考 文 献

- [1] Sutton M, Wolters W, Peters W, et al. Determination of displacements using an improved digital correlation method [J]. *Image and Vision Computing*, 1983, 1(3): 133-139.
- [2] Tung S H, Sui C H. Application of digital-image-correlation techniques in analysing cracked cylindrical pipes[J]. *Sadhana*, 2010, 35(5): 557-567.
- [3] 唐正宗, 梁晋, 郭成. 基于摄影测量校正的斜光轴数字图像相关方法[J]. *光学学报*, 2011, 31(11): 1112007. Tang Z Z, Liang J, Guo C. Slant-axis digital image correlation method based on photogrammetric correction [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(11): 1112007.
- [4] 孙明勇, 蔡康, 杨德宇, 等. 数字散斑相关法和电子散斑干涉术相结合的三维变形测量方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(11): 111201. Sun M Y, Cai K, Yang D Y, et al. Three-dimensional deformation measurement with the combination of DSCM and ESPI[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(11): 111201.
- [5] 顾国庆, 王开福, 许星. 基于数字图像相关的刚体面内微小转动测量及转动中心定位[J]. *中国激光*, 2012, 39(1): 108004. Gu G Q, Wang K F, Xu X. Measurement of in-plane micro-rotations and rotation-center location of a rigid body by using digital image correlation[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(1): 108004.
- [6] 何能, 廖海黎, 马存明, 等. 基于数字图像相关法的风洞试验测量技术[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(5): 051201. He N, Liao H L, Ma C M, et al. Wind tunnel measurements based on digital image correlation method[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(5): 051201.
- [7] 潘兵, 俞立平, 吴大方. 使用双远心镜头的高精度二维数字图像相关测量系统[J]. *光学学报*, 2013, 33(4): 0412004. Pan B, Yu L P, Wu D F. High-accuracy two-dimensional digital image correlation measurement system using a bilateral telecentric lens[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(4): 0412004.
- [8] 潘兵, 吴大方, 夏勇. 数字图像相关方法中散斑图的质量评价研究[J]. *实验力学*, 2010, 25(2): 120-129. Pan B, Wu D F, Xia Y. Study of speckle pattern quality assessment used in digital image correlation[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2010, 25(2): 120-129.
- [9] Yang X B, Liu Z W, Xie H M. A real time deformation evaluation method for surface and interface of thermal barrier coatings during 1100 °C thermal shock[J]. *Measurement Science and Technology*, 2012, 23(10): 105604.
- [10] Li Y J, Xie H M, Luo Q, et al. Fabrication technique of micro/nano-scale speckle patterns with focused ion beam [J]. *Science China Physics, Mechanics and Astronomy*, 2012, 55(6): 1037-1044.
- [11] Scrivens W A, Luo Y, Sutton M A, et al. Development of patterns for digital image correlation measurements at reduced length scales[J]. *Experimental Mechanics*, 2007, 47(1): 63-77.
- [12] Jin H, Lu W Y, Korellis J. Micro-scale deformation measurement using the digital image correlation technique and scanning electron microscope imaging[J]. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 2008, 43(8): 719-728.
- [13] Kammers A D, Daly S. Self-assembled nanoparticle surface patterning for improved digital image correlation in a scanning electron microscope[J]. *Experimental Mechanics*, 2013, 53(8): 1333-1341.
- [14] Salmons B S, Katz D R, Trawick M L. Correction of

- distortion due to thermal drift in scanning probe microscopy[J]. *Ultramicroscopy*, 2010, 110(4): 339-349.
- [15] Sutton M A, Li N, Garcia D, et al. Scanning electron microscopy for quantitative small and large deformation measurements part II: experimental validation for magnifications from 200 to 10, 000[J]. *Experimental Mechanics*, 2007, 47(6): 789-804.
- [16] Xu Z H, Sutton M A, Li X D. Mapping nanoscale wear field by combined atomic force microscopy and digital image correlation techniques[J]. *Acta Materialia*, 2008, 56(20): 6304-6309.
- [17] Zhang Y, Feng L, Dillon S, et al. Full-field deformation measurements in the transmission electron microscope using digital image correlation and particle tracking[J]. *Materials Characterization*, 2022, 183: 111598.
- [18] Vieira R B, Sehitoglu H, Lambros J. Representative volume elements for plasticity and creep measured from high-resolution microscale strain fields[J]. *Acta Materialia*, 2021, 214: 117021.
- [19] Wu D, Qian L, Zhu P F. A novel micro-tensile system for full-field deformation measurement of thin films[J]. *The Review of Scientific Instruments*, 2021, 92(9): 093901.
- [20] Larsson L, Sjödal M, Thuvander F. Microscopic 3-D displacement field measurements using digital speckle photography[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2004, 41(5): 767-777.
- [21] Nicoletto G, Marin T, Anzelotti G, et al. Application of high magnification digital image correlation technique to micromechanical strain analysis[J]. *Strain*, 2011, 47: e66-e73.
- [22] Shi H J, Ji H W, He X Y. Optical 3D deformation measurement system and its application to investigation of mechanical behaviors of micro-structure[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(3): 0312007.
- [23] Sutton M A, Yan J H, Tiwari V, et al. The effect of out-of-plane motion on 2D and 3D digital image correlation measurements[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2008, 46(10): 746-757.
- [24] 潘兵, 俞立平, 吴大方. 使用双远镜头的高精度二维数字图像相关测量系统[J]. *光学学报*, 2013, 33(4): 0412004. Pan B, Yu L P, Wu D F. High-accuracy two-dimensional digital image correlation measurement system using a bilateral telecentric lens[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(4): 0412004.
- [25] 于春和, 祁奇. 离焦模糊图像复原技术综述[J]. *沈阳航空航天大学学报*, 2018, 35(5): 57-63. Yu C H, Qi Q. A survey of defocusing image restoration techniques[J]. *Journal of Shenyang Aerospace University*, 2018, 35(5): 57-63.
- [26] 胡学龙, 许开宇. 数字图像处理[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006. Hu X L, Xu K Y. *Digital image processing*[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006.
- [27] Chen H, Cen Z F, Wang C C, et al. Image restoration via improved Wiener filter applied to optical sparse aperture systems[J]. *Optik*, 2017, 147: 350-359.
- [28] 孙辉, 张葆, 刘晶红, 等. 离焦模糊图像的维纳滤波恢复[J]. *光学技术*, 2009, 35(2): 295-298. Sun H, Zhang B, Liu J H, et al. Analysis on out of focus error and restoration of blurred image with Wiener filter[J]. *Optical Technique*, 2009, 35(2): 295-298.
- [29] 陈新平. 共焦显微图像复原及其正则化方法研究[D]. 重庆: 重庆理工大学, 2011. Chen X P. *Confocal microscopy image restoration and regularization methods*[D]. Chongqing: Chongqing University of Technology, 2011.
- [30] Wang D H, Talevski A, Dillon T S. Edge-preserving nonlinear image restoration using adaptive components-based radial basis function neural networks[C]// *Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks*, July 20-24, 2003, Portland, OR, USA. New York: IEEE Press, 2003: 1243-1248.
- [31] Liu S J, Zhou F, Liao Q M. Defocus map estimation from a single image based on two-parameter defocus model[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2016, 25(12): 5943-5956.
- [32] Singh A, Singh J. Comparative analysis of Gaussian filter with wavelet denoising for various noises present in images[J]. *Indian Journal of Science and Technology*, 2016, 9(47): 112.
- [33] Pan B, Xie H M, Wang Z Y, et al. Study on subset size selection in digital image correlation for speckle patterns[J]. *Optics Express*, 2008, 16(10): 7037-7048.
- [34] Wang Y Q, Sutton M A, Bruck H A, et al. Quantitative error assessment in pattern matching: effects of intensity pattern noise, interpolation, strain and image contrast on motion measurements[J]. *Strain*, 2009, 45(2): 160-178.
- [35] Hu W X, Sheng Z P, Yan K Y, et al. A new pattern quality assessment criterion and defocusing degree determination of laser speckle correlation method[J]. *Sensors*, 2021, 21(14): 4728.
- [36] 俞海, 刘云鹏, 郭荣鑫, 等. 数字图像相关法散斑图质量评价方法[J]. *激光技术*, 2020, 44(2): 237-243. Yu H, Liu Y P, Guo R X, et al. Assessment method of speckle pattern quality in digital image correlation[J]. *Laser Technology*, 2020, 44(2): 237-243.
- [37] 初录, 刘斌, 许亮, 等. 基于灰度共生矩阵的散斑质量评价[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(4): 0410019. Chu L, Liu B, Xu L, et al. Speckle quality evaluation based on gray level co-occurrence matrix[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(4): 0410019.
- [38] Schreier H W, Sutton M A. Systematic errors in digital image correlation due to undermatched subset shape functions[J]. *Experimental Mechanics*, 2002, 42(3): 303-310.
- [39] Roels J, Aelterman J, Luong H Q, et al. An overview of state-of-the-art image restoration in electron microscopy[J]. *Journal of Microscopy*, 2018, 271(3): 239-254.
- [40] Richardson W H. Bayesian-based iterative method of image restoration[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1972, 62(1): 55-59.
- [41] Lucy L B. An iterative technique for the rectification of observed distributions[J]. *The Astronomical Journal*, 1974, 79: 745-754.
- [42] Holmes T J, Bhattacharyya S, Cooper J A, et al. Light microscopic images reconstructed by maximum likelihood deconvolution[M]//Pawley J B. *Handbook of biological confocal microscopy*. Boston: Springer, 1995: 389-402.