

文章编号 1004-924X(2025)18-2857-11

基于散斑去模糊的数字图像相关深度量程拓展

黄海昇, 倪梓浩, 白玉磊, 董 博*
(广东工业大学 自动化学院, 广东 广州 510006)

摘要:在二维数字图像相关技术(2D-DIC)的振动测量中,有限的深度量程会在散斑离面位移过大时引发散斑图像模糊问题。为了实现深度量程的拓展,本文提出一种融合维纳滤波和自适应局部平滑的离焦散斑去模糊方法。该方法首先分析了散斑图像中离焦模糊的产生机制,并利用维纳滤波对原始模糊图像进行复原。随后,通过引入自适应局部平滑策略对维纳滤波反卷积产生的振铃效应进行抑制。最后,为了验证本文所提方法的有效性,分别进行了离焦散斑去模糊实验、离面位移测量实验和振动测量实验。在离焦去模糊效果实验中,散斑图像获得了更高的平均强度梯度和更小的最优子集尺寸,表明新方法可以有效提升散斑对比度并获得高质量复原图像;在离面位移重构实验中,最大动态测量范围提升了9%,离面位移测量值相对于真实值的离散程度降低了8.8%,有效拓展了2D-DIC的深度量程;在实际振动测量中,该方法将周期振动信噪比提升了5.5%,同时将均值误差降低了2.4%,有效提高了2D-DIC的测量精度。本文所提出方法显著拓展了传统2D-DIC在深度方向的测量能力,为复杂动态场景下的全场振动监测提供了可靠技术支持。

关键词:散斑去模糊;深度量程拓展;数字图像相关技术;离面位移;维纳滤波

中图分类号:TP394.1;TH691.9 **文献标识码:**A

doi:10.37188/OPE.20253318.2857 **CSTR:**32169.14.OPE.20253318.2857

Depth range extension in digital image correlation through speckle deblurring

HUANG Haisheng, NI Zihao, BAI Yulei, DONG Bo*

(School of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

* Corresponding author, E-mail: b. dong@gdut.edu.cn

Abstract: In the vibration measurement of two-dimensional digital image correlation technology (2D-DIC), the limited depth range will cause speckle image blurring when the out-of-plane displacement of the speckle is too large. In order to realize the expansion of the depth range, this paper proposed a deblurring method for defocusing speckles that combined Wiener filtering and adaptive local smoothing. The method first analyzed the mechanism of defocus blur in speckle images and used Wiener filtering to restore the original blurred images. Subsequently, an adaptive local smoothing strategy was introduced to suppress the ringing effect caused by Wiener filter deconvolution. Finally, to verify the effectiveness of the proposed method, experiments were conducted on defocused speckle deblurring, out-of-plane displacement measurement, and vibration measurement. In the experiment of defocused deblurring effect, the speckle image obtained a higher average intensity gradients and a smaller optimal subset sizes, indicating that the new

收稿日期:2025-04-14;修订日期:2025-06-18.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 62171140)

method could effectively improve the speckle contrast and produced high-quality restored images. In the out-of-plane displacement reconstruction experiment, the maximum dynamic measurement range was increased by 9%, and the dispersion degree of the measured value of the out-of-plane displacement was reduced by 8.8% compared with the real value, which effectively extended the depth range of 2D-DIC. In the actual vibration measurement, the method improved the signal-to-noise ratio of periodic vibration by 5.5%, and reduced the mean error by 2.4%, which effectively increased the measurement accuracy of 2D-DIC. The proposed method in this paper significantly expands the measurement capability of traditional 2D-DIC in the depth direction, and provides reliable technical support for full-field vibration monitoring in complex dynamic scenarios.

Key words: speckle deblurring; depth range extension; digital image correlation; out-of-plane displacement; wiener filtering

1 引言

振动是机械系统运行状态的一个关键指标,它不仅反映了设备的健康状况和性能变化,而且对于预测性维护、故障诊断及优化设计等方面有着至关重要的意义。以压电式加速度传感器为代表的传统接触式振动测量方法虽然被广泛应用^[1-3],但它们对被测对象存在质量加载效应,并且难以实现全场测量;非接触式的激光多普勒测振仪^[4-6]虽然提供了高精度的点测量,但其高昂的成本和有限的测量范围限制了其在复杂结构或大范围监测中的应用。

二维数字图像相关(Two-Dimensional Digital Image Correlation, 2D-DIC)作为一种先进的非接触光学测量技术逐渐崭露头角。通过分析物体表面散斑图案的变化,2D-DIC可以追踪微小位移并计算应变场分布,从而克服传统接触式传感器的质量加载问题,同时提供全场变形信息,具有较高的空间分辨率和灵活性^[7]。该技术已经在材料科学^[8]、生物力学^[9]、土木工程^[10]等多个学科领域中得到了广泛应用,特别是在研究复杂几何形状物体或柔软材料时表现出色。

近年来,2D-DIC技术通过计算物体的面内虚拟应变来获取离面位移(即深度振动方向的位移),并因其能够实现全场测量的优势,已被广泛应用于振动检测领域^[11-12]。然而,2D-DIC在振动检测中面临一个重要瓶颈:当被测物体的离面位移超出相机景深范围时,会导致所采集的散斑图

像呈现离焦模糊,从而降低图像信噪比和增加特征匹配误差,对实际振动测量精度造成影响。这种由离面位移引发的散斑离焦模糊问题,已成为制约2D-DIC技术在振动测量中进一步发展的关键障碍。为了解决这一挑战并提高2D-DIC技术在深度方向上的测量能力,开发有效地克服因景深不足导致的离焦散斑图像去模糊方法显得尤为重要。

维纳滤波作为一种经典的图像复原算法,具有最小化复原图像与原始图像的均方误差和考虑噪声统计特性的特点,已被广泛应用于信号降噪^[13-15],图像复原领域^[16-18]。由于维纳滤波在频域中采用理想低通滤波器,其陡峭的截止频率导致高频成分未能得到平滑过渡,在图像复原过程中易产生振铃效应,即高对比度区域附近出现波纹状的虚假纹理,这会导致图像边缘细节丢失或噪声放大。

因此,本文提出一种融合维纳滤波和自适应局部平滑的离焦散斑去模糊方法。首先利用维纳滤波在恢复模糊信息方面的理论优势,对散斑图像进行初步复原;其次针对维纳滤波在复原过程中易产生的振铃效应问题(即图像边缘或高对比度区域出现波纹状伪影),进一步引入一种自适应局部平滑策略。最后,通过离焦散斑去模糊实验、离面位移测量实验和振动测量实验,系统评估物体离面位移过大对2D-DIC测量精度的负面影响,并进一步验证本文提出的方法在抑制散斑离焦模糊后对离面位移测量精度的改善效果。

2 理 论

2.1 基于 2D-DIC 的离面位移测量技术

2D-DIC 是基于两个或多个图像之间匹配特征点,从而来追踪物体表面形变,在得到物体变形的变形场后,根据位移与应变的关系就可以计算出物体的应变场分布。2D-DIC 的基本原理如图 1 所示,在开始采集图像之前,使用喷漆法在待测物体的表面制作散斑图像。在相机采集完多张散斑图像后,为了确定物体表面每个点的变形情况,需要在参考图像中选取感兴趣区域(ROI),并对其进行虚拟网格划分得到参考子区,接着在变形图像中搜索与其相关性最高的目标子区。设参考图像和变形图像的灰度函数分别为 $f(x, y)$ 和 $g(x', y')$,子集中心点为 P 。在物体发生形变后,为了在变形图像中搜索与点 P 最相似的点 P' ,需先确定相关函数,如式(1)所示的归一化最小二乘互相关匹配函数^[19]。其中, $f(x, y)$ 和 $g(x', y')$ 分别表示在像素坐标 (x, y) 和 (x', y') 的灰度值。在确定了 P' 点后, P' 可以计算点 P 与 P' 点像素坐标的差值 u, v ,从而得到中心点的位移信息。

$$C_{LS} = \sum_{(i,j) \in S} \left[\frac{\frac{f(x_r, y_r) - f_m}{\sqrt{\sum_{(i,j) \in S} (f(x_r, y_r) - f_m)^2}}}{\frac{g(x_c, y_c) - g_m}{\sqrt{\sum_{(i,j) \in S} (g(x_c, y_c) - g_m)^2}}} \right]. \quad (1)$$

在确定子区中心点的位移信息后,子区中的任意一点 Q 的位移信息可由公式(2)计算得到,其中 $\Delta x, \Delta y$ 为点 P 与点 Q 两点之间的像素坐标差值。对于每个子区域都进行计算后,就可以得到物体在像素坐标 u 方向和 v 方向的全场位移。再对位移进行微分计算如公式(3)所示,就可以得到全场应变信息。

$$\begin{bmatrix} x'_i \\ y'_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{\partial u}{\partial y} \\ \frac{\partial v}{\partial x} & \frac{\partial v}{\partial y} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$\begin{cases} \epsilon_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x} \\ \epsilon_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y} \end{cases}. \quad (3)$$

为了得到离面位移,需要对 2D-DIC 的计算结果进行数据解调^[20]。在图 1 的 2D-DIC 测量中,计算得到的面内位移场,即 U 位移场和 V 位

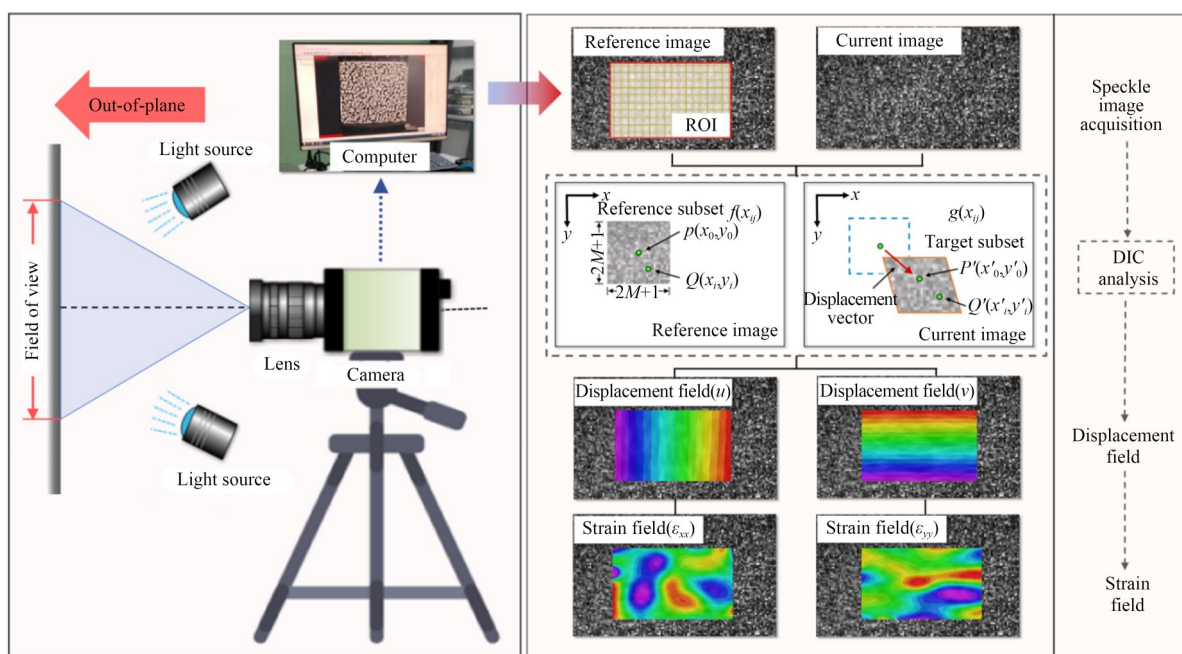


图 1 二维数字图像相关基本原理

Fig. 1 Basic principles of two-dimensional digital image correlation

移场,可以由公式(4)表示:

$$\begin{cases} U_m(x_s, y_s) = U_a(x_s, y_s) - \frac{x_s}{Z} \cdot W(x_s, y_s) \\ V_m(x_s, y_s) = V_a(x_s, y_s) - \frac{y_s}{Z} \cdot W(x_s, y_s) \end{cases}, \quad (4)$$

其中: U_m 和 V_m 表示实际测量得到的位移; U_a 和 V_a 表示实际位移; Z 是物体与镜头的距离; W 是离面位移,如图 2 所示; (x_s, y_s) 是传感器平面中的空间坐标。如果忽略物体的平面外旋转,则可以通过计算测量位移的梯度来估计相应的面内应变场,如公式(5)所示:

$$\begin{cases} \epsilon_{xxm}(x_s, y_s) = \epsilon_{xxa}(x_s, y_s) - \frac{1}{Z} \cdot W(x_s, y_s) \\ \epsilon_{yy m}(x_s, y_s) = \epsilon_{yya}(x_s, y_s) - \frac{1}{Z} \cdot W(x_s, y_s) \end{cases}, \quad (5)$$

其中: ϵ_{xxm} 和 $\epsilon_{yy m}$ 表示测量得到的面内应变; ϵ_{xxa} 和 ϵ_{yya} 表示物体的实际面内应变。如果物体表面没有发生较大形变,只有刚体平移的情况,物体的变形一般可以忽略不计,因此测量的应变可以由离面位移引起的虚拟应变来表示,如公式(6)所示:

$$\begin{cases} \epsilon_{xxm}(x_s, y_s) = -\frac{1}{Z} \cdot W(x_s, y_s) \\ \epsilon_{yy m}(x_s, y_s) = -\frac{1}{Z} \cdot W(x_s, y_s) \end{cases}. \quad (6)$$

因此,在物体的刚体平移运动中,可以通过图 1 的 2D-DIC 测量物体的面内应变,再通过公式(6)来估计离面位移 W 。

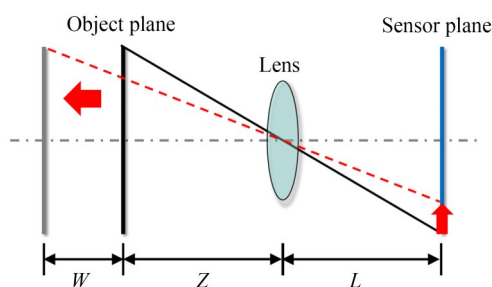


图 2 试样平面外运动引起的虚拟平面内位移示意图
Fig. 2 Schematic diagram of virtual in-plane displacement caused by out-of-plane motion of the specimen

在基于 2D-DIC 的测量中,散斑图案被用作表面特征来追踪物体的变形。然而,当物体经历显著的离面位移时,即沿相机光轴方向移动,会导致成像距离超出景深范围,从而引起图像模

糊,主要表现为离焦模糊。这种模糊效应会降低 DIC 算法匹配精度,限制了离面位移测量的有效量程。因此,需要一种散斑去模糊方法,来克服离面位移导致的图像模糊,进而增加离面方向即深度方向的量程。

2.2 基于维纳滤波的离焦散斑图像去模糊方法

离焦模糊是指在拍摄的过程中,由于相机的对焦系统没有正确地将被摄体调整到清晰的焦点上,导致拍出来的图像中某些部分或整个画面显得模糊不清的现象。这种模糊通常发生在景深较浅的情况下,比如使用大光圈镜头拍摄时,如果焦点没有准确落在目标物体上,那么不在焦点平面上的部分就会出现模糊现象^[21]。其模糊过程可以如公式(7)所示:

$$g(x, y) = f(x, y) * h(x, y) + n(x, y), \quad (7)$$

其中: $f(x, y)$ 为清晰图像, $*$ 表示卷积操作, $n(x, y)$ 为噪声, $h(x, y)$ 为点扩散函数,在离焦模糊中,点扩散函数可由均匀分布的圆盘函数表示如公式(8)所示, R 为半径。即清晰图像 $f(x, y)$ 与点扩散函数 $h(x, y)$ 进行卷积操作,再加上噪声 $n(x, y)$ 就能够得到模糊图像 $g(x, y)$ 。

$$h(x, y) = \begin{cases} 0, & \sqrt{x^2 + y^2} > R \\ \frac{1}{\pi R^2}, & \sqrt{x^2 + y^2} \leq R \end{cases}. \quad (8)$$

在获得模糊图像和点扩散函数后,通过去卷积的方式可以还原出清晰图像。

在去卷积方法中,维纳滤波是一种经典且有效的复原算法。其核心思想是通过最小化复原图像与原始图像的均方误差,综合退化图像的噪声统计特性来进行图像复原处理^[16]。在频域上,维纳滤波的复原公式如式(9)所示:

$$F(u, v) = \frac{H(u, v)^* \cdot G(u, v)}{|H(u, v)|^2 + \frac{S_n(u, v)}{S_f(u, v)}}, \quad (9)$$

其中: $H^*(u, v)$ 为 $H(u, v)$ 的复共轭, S_f 和 S_n 分别表示图像信号和噪声的功率谱, G 为模糊图像 g 的傅里叶变换, F 为清晰图像 f 的傅里叶变换, H 为点扩散函数 h 的傅里叶变换。在图像反卷积复原中,滤波器噪声、滤波器偏差以及边界截断效应等因素会放大高频信号,从而导致待复原图像中出现振铃现象,即图像边缘和高对比度区域附近出现波纹状虚假纹理,或类似于钟摆振荡的明

暗交替现象^[22-23]。对于噪声振铃,可以使用高斯滤波或低通滤波器来抑制噪声,但是这可能会过度平滑图像,导致细节丢失,且不能很好地处理高频成分的振铃效应;对于偏差振铃,通过迭代细化卷积核来准确估计卷积核能够在一定程度上改善振铃现象,但是其计算复杂度较高,且在某些情况下仍无法完全消除振铃现象;对于边界截断振铃,可以使用边界扩展技术,如镜像扩展、周期扩展等,但这些方法在处理边界区域时可能会引入新的伪影,且不能解决图像内部的振铃问题。

本文采用一种自适应局部平滑策略,通过结合空间邻近性和灰度相似性权重,对每个像素进行加权平均处理,能够在抑制振铃的同时保留图像的细节信息。相对于复杂的迭代算法,自适应局部平滑策略计算简单,易于实现,且对不同的图像类型和模糊核具有较好的鲁棒性,适用于多种应用场景。具体步骤如下:

(1)空间邻近性权重:通过计算每个像素与其邻域内像素的空间距离,来确定空间邻近性权重。像素越接近中心像素,其权重越大。空间邻近性权重 $w_s(q, p)$ 如公式(10)所示:

$$w_s(q, p) = e^{-\frac{\|p - q\|^2}{2\sigma_d^2}}, \quad (10)$$

其中: p 表示中心像素, q 表示领域内的像素, σ_d 是空间邻近性权重的标准差。

(2)灰度相似性权重:通过计算每个像素与其邻域内像素的灰度值相似度,来确定灰度相似性权重。像素与中心像素的灰度值越接近,其权重越大。灰度相似性权重 $w_r(q, p)$ 如公式(11)

所示:

$$w_r(q, p) = e^{-\frac{(I(p) - I(q))^2}{2\sigma_r^2}}, \quad (11)$$

其中: $I(p)$ 和 $I(q)$ 分别是中心像素和邻域内像素的灰度值, σ_r 是灰度相似权重的标准差。

(3)加权平均:对于每个像素,使用上述空间邻近性和灰度相似性权重计算邻域内所有像素的加权平均值,以此作为该像素的最终值。振铃抑制处理后的像素值 $I'(p)$ 如公式(12)所示:

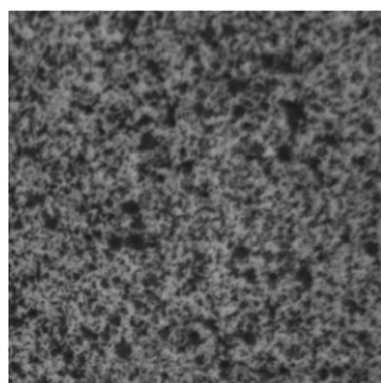
$$I'(q) = \frac{\sum_{q \in N(p)} w_s(q, p) w_r(q, p) I(q)}{\sum_{q \in N(p)} w_s(q, p) w_r(q, p)}, \quad (12)$$

其中, $N(p)$ 表示像素 p 的邻域。在抑制振铃后,得到最终复原图像。

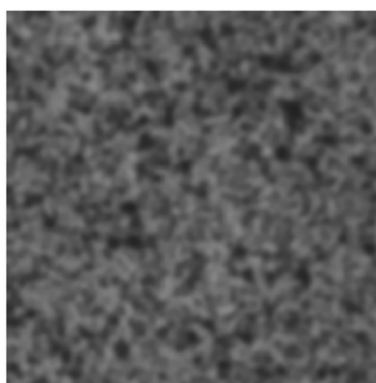
3 实验结果与分析

3.1 离焦散斑图像去模糊实验与对比

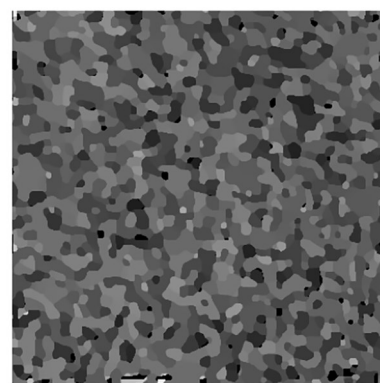
采用喷漆法在纸板表面制备散斑图案,利用灰点相机采集散斑图像,随后使用 15×15 像素的点扩散函数对 400×400 像素的散斑区域进行卷积处理以模拟离焦模糊。为了评价离焦散斑去模糊的效果,将本文的去模糊方法与梯度稀疏先验^[24]、文本图像稀疏先验^[25]、传统维纳滤波^[26]进行对比,如图3所示。图3(c)和3(d)可以看出,文本图像稀疏先验和梯度稀疏先验复原的散斑图像质量较差,不适合本文的散斑图像去模糊。从图3(e)可以看出,由于滤波器对高频成分的放大,传统维纳滤波在处理散斑图像时会产生明显的振铃现象。从图3(f)可以看出,引入自适



(a) 清晰图像
(a) Clear image



(b) 模糊图像
(b) Blurred image



(c) 文本图像稀疏先验
(c) Sparse prior of text image

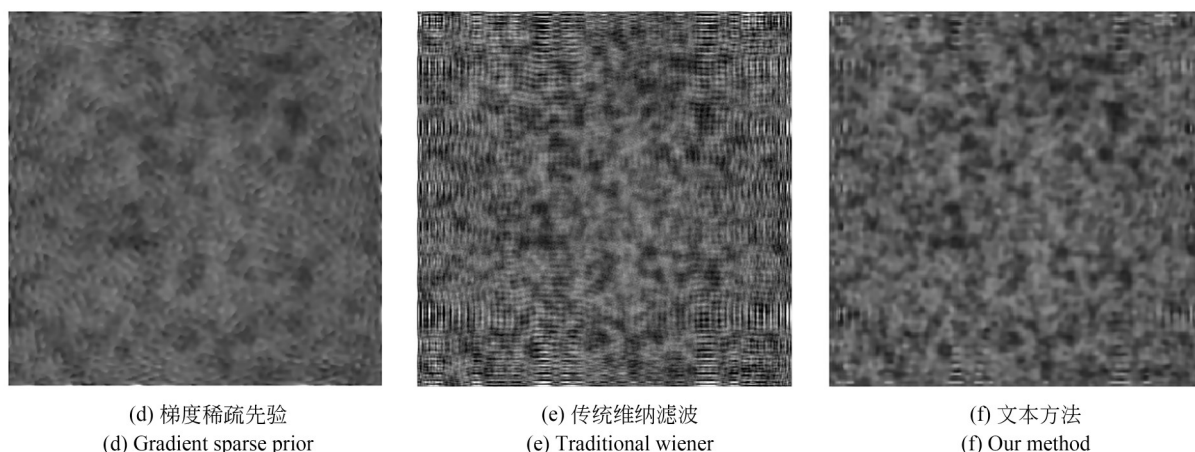


图 3 不同方法去模糊结果对比

Fig. 3 Comparison of the results of different methods of deblurring

应局部平滑策略,能够有效改善图像的振铃现象,提高复原图像的质量。

为了更精确的评价散斑去模糊的效果,采用图像复原评价指标:峰值信噪比(Peak Signal-to-Noise Ratio, PSNR)^[27],用于衡量信号的最大可能功率与失真噪声功率的比值,PSNR值越高,表示复原图像的质量越好;图像结构相似度(Structural Similarity Index Method, SSIM)^[28],用于衡量复原图像与原始图像在结构上的相似性,SSIM值越接近1,表示复原图像的质量越好。实验结果如图4所示,可以看出,本文方法在复原散斑图像方面,在PSNR和SSIM两个指标上均优于对比方法,体现出更优的复原性能。

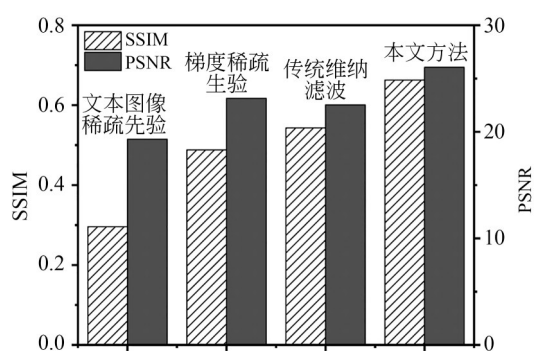


图 4 图像复原指标

Fig. 4 Image restoration metrics

大小^[30](Optimal Subset Size, OSS),散斑质量越好,MIG越大,OSS越小。结果如图5所示,模糊散斑图像由于高频信息的缺失,导致相邻像素间的强度变化显著减小,从而降低了整个图像的MIG。这种现象不仅影响了图像细节的清晰度,还降低了2D-DIC计算过程中特征点的可辨识度。为了确保可靠地匹配散斑图案,并捕捉到足够的局部变形信息,在处理质量较差的散斑图像时需要采用较大的OSS,但较大的OSS会导致分析的离面位移场细节丢失。而在通过本文方法对离焦散斑图像进行处理后,图像高频信息有所恢复,MIG有所提高,OSS有所降低,散斑图像质量得以改善。

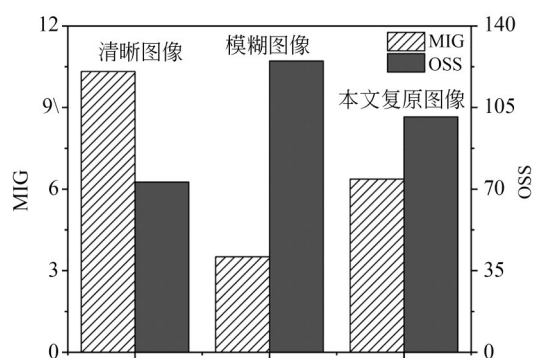


图 5 散斑图像质量指标

Fig. 5 Speckle image quality metrics

为了进一步评价本文方法处理后的散斑图像质量,采用散斑图像质量指标:平均强度梯度^[29](Mean Intensity Gradient, MIG)和最佳子集

3.2 离面位移测量与对比

为了验证当物体离面位移较大时,本文方法的可行性。本实验采用高精度二维线性位移平

台对表面附着散斑图案的纸板施加可控的离面位移(W),并同步采集不同位移量下的散斑图像。首先,固定位移平台的位置,调整相机焦距使相机能够采集到清晰的散斑图像,并将其作为参考图像。随后,通过控制位移平台使样品从初始位置(0.0 mm)开始沿预定方向移动至6.0 mm处,其间每移动0.5 mm采集一次散斑图像作为变形图像。采用灰点相机记录散斑图像,图像分辨率为 400×400 像素。

实验发现,在 W 超过4.5 mm时,由于成像系统景深的限制,所采集的散斑图像开始出现明显的模糊现象。这种模糊导致了图像细节的缺失,使得2D-DIC在特征点匹配时变得困难。如图6所示,对这些离焦散斑图像直接进行2D-DIC分析后得到的面内位移场条纹表现出扭曲和变形,这表明原始图像的质量直接影响了应变测量的准确性。在本文方法处理后,散斑图像的质量有所提高,2D-DIC复原的面内位移场条纹形状有所改善。

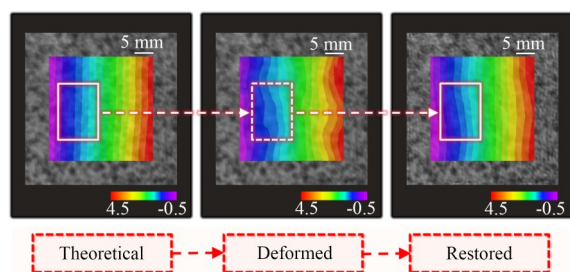


图6 面内位移场测量

Fig. 6 Measurement of the displacement field

对原始模糊散斑图像的离面位移场进行分析,结果如图7(a)所示,随着 W 的增加,散斑图像的模糊程度越来越大,特征点匹配效果越来越差。当 W 达到6.0 mm时,原始散斑图像的模糊程度较大,无法进行有效的特征点匹配,从而导致应变计算失败,如图7(a-4)所示。而在使用本文提到的方法对散斑图像去模糊之后,在原先散斑图像匹配失败的位置也能够匹配成功,如图7(b-4)所示。对比图7(a)和7(b)可以看出,复原后的散斑图像,计算得到的离面位移场更加均匀。为了更全面地反映去模糊处理的效果,分别使用去模糊前后的散斑图像计算离面位移,并进

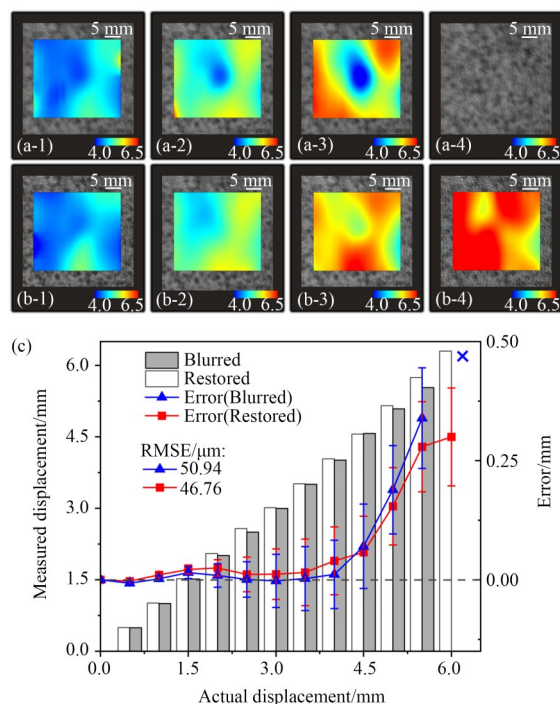


图7 模糊散斑图像复原前后的离面位移(W)测量(a)和(b)分别为在离面位移为4.5、5.0、5.5、6.0 mm时的离面位移场;(c)离面位移计算及误差结果

Fig. 7 Out-of-plane displacement measurements before and after restoration of blurred speckle images. (a) and (b) are the out-of-plane displacement fields when the out-of-plane displacement is 4.5, 5.0, 5.5, and 6.0 mm, respectively. (c) Calculation of off-surface displacement and error results

一步分析其平均误差和方差,结果如图7(c)所示,其中误差棒的中心表示平均误差的大小,两端为标准差大小,RMSE为均方根误差。可以看出,当散斑的 W 在4.5 mm内时,2D-DIC测量的 W 误差基本保持在较小的范围内,这表明此时 W 在成像系统的景深范围内,2D-DIC分析的结果精确度较高;当散斑的 W 在4.5~6.0 mm范围内时,2D-DIC测量得到的 W 的误差开始显著增大,并且随着 W 的增加,误差也相应增加,数据的离散程度也越来越大,这表明此时 W 已经超过了成像系统的景深范围,但仍然在可测量范围内;当散斑的 W 在6.0 mm处,未经处理的散斑图像会导致2D-DIC计算 W 失败,即 W 已经超出了当前2D-DIC系统的最大可测量范围。相比之下,经过本文方法处理后的散斑图像,在 W 为6.0 mm时,2D-DIC仍然能够测量到一个有效的 W 。同时, W 测量误差也有所降低,平均能够降低

0.6%, 最大能够降低 1.0% 的误差, RMSE 从 $50.94\text{ }\mu\text{m}$ 降到 $46.76\text{ }\mu\text{m}$ 。

实验结果表明, 本文提出的去模糊方法能够在较大离面位移条件下改善散斑图像质量, 该方法至少将 2D-DIC 最大可测量深度量程提升了 9%, 数据的离散程度降低了 8.8%。这为进一步探讨该方法在动态条件下的表现奠定了坚实的基础, 也为接下来的振动测量实验提供了有力的支持。

3.3 离面振动测量与对比

为了探究在振动测量中, 当振动幅度较大时, 本文方法的可行性。利用筋膜枪以 20 Hz 和 30 Hz 频率作为激发源, 将带有散斑信息的纸板作为测试样品固定在筋膜枪头部。将样品的位置调整至筋膜枪振动的极限距离, 调整相机焦距使相机能够采集到清晰的散斑图像, 并将其作为参考图像, 此时离面位移值为 0 mm。采用高速相机连续记录样品振动期间的散斑图像, 采样率为 1 000 fps, 测量时间为 0.25 s, 图像分辨率为 400×400 像素。通过 2D-DIC 计算振动期间的散斑的离面位移, 可以得到振动信号曲线, 如图 8(a) 和图 9(a) 所示。当振动幅度较大, 超过 4.5 mm 时, 散斑图像由于显著的离焦效应而出现明显的模糊现象, 导致 DIC 分析的离面位移结果较差, 在振动信号的波峰区域出现了明显的抖动现象。而经过本文方法处理后的散斑图像, 散斑图

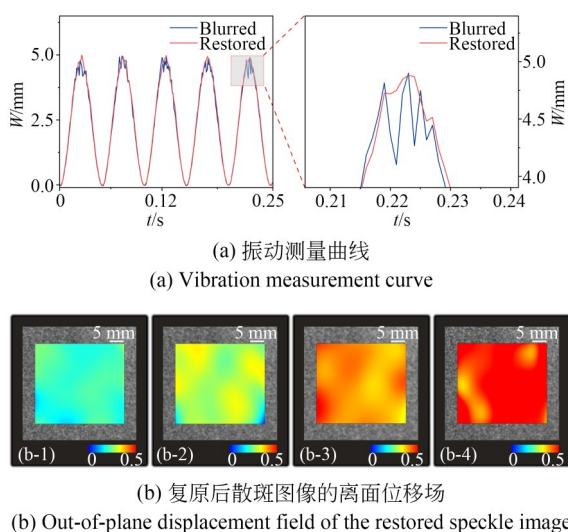


图 8 20 Hz 振动频率下的离面位移测量结果

Fig. 8 Out-of-plane displacement measurement results under 20 Hz vibration frequency

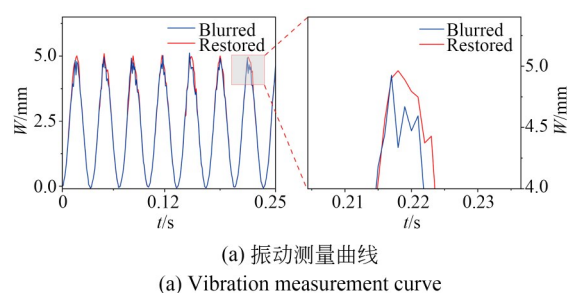


图 9 30 Hz 振动频率下的离面位移测量结果

Fig. 9 Out-of-plane displacement measurement results under 30 Hz vibration frequency

像的质量得到了改善, 相应的振动信号在波谷区域的抖动现象也明显减少。从图 8(b) 和图 9(b) 可以看出, 复原后的散斑图像, 计算得到的离面位移场均匀性较好。

计算散斑图像处理前后对应的振动信号的均值误差和信噪比, 结果显示, 采用本文方法处理后的散斑图像进行 DIC 分析, 均值误差降低了 2.4%, 同时信噪比提升了 5.5%。

4 结 论

本文针对 2D-DIC 技术在测量超出深度量程的振动时, 由于相关性特征失配所导致的散斑离焦模糊问题, 在维纳滤波基础上, 提出一种融合非盲去卷积和自适应局部平滑的离焦散斑图像去模糊方法。主要结论如下:

(1) 维纳滤波结合自适应局部平滑策略能够有效抑制散斑离焦模糊, 从而提升散斑图像的质量。该方法复原的散斑图像有更高的 MIG 和更低的 OSS, 提高了后续特征点匹配的可靠性;

(2) 在离面位移实验中, 使用本文方法处理后的散斑图像, 使得 2D-DIC 分析的最大可测量深度量程提升了 9.0%, 离面位移测量值相对于真实值的离散程度降低了 8.8%, 验证了本文方法在扩展 2D-DIC 深度量程的有效性;

(3) 通过振动实验表明, 在较大振动幅度下,

未经处理的散斑图像会导致较差质量的振动信号。而在经本文方法处理后,对应的振动信号信噪比提升了 5.5%,均值误差降低了 2.4%,这证明了该方法对于大振幅动态振动场景的有效性和适用性。

参考文献:

- [1] 郭勇,曾化蝶,解阳阳,等. 基于水平振动试验的压电式加速度传感器优化设计研究[J]. 环境技术, 2025, 43(1): 135-139.
GUO Y, ZENG H D, XIE Y Y, *et al.* Research on the optimized design of piezoelectric accelerometers based on horizontal vibration testing[J]. *Environmental Technology*, 2025, 43(1): 135-139. (in Chinese)
- [2] 邓文晶,蔡李娟,杜鑫,等. 压电式加速度传感器灵敏度对随机振动试验过程控制影响研究[J]. 环境技术, 2024, 42(2): 6-11.
DENG W J, CAI L J, DU X, *et al.* Research on the impact of the process control of random vibration testing by piezoelectric accelerometer sensitivity[J]. *Environmental Technology*, 2024, 42(2): 6-11. (in Chinese)
- [3] 王渊德,毛崎波,黄仕卓. 利用压电阵列设计直升机桨叶的模式传感器[J]. 传感器与微系统, 2023, 42(2): 24-27, 36.
WANG Y D, MAO Q B, HUANG S Z. Modal sensors design for helicopter blade by PZT array[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2023, 42(2): 24-27, 36. (in Chinese)
- [4] 杨国英. 基于激光测振仪的超声 Lamb 波相控阵损伤成像方法研究[D]. 江苏:江苏大学, 2025.
YANG G Y. *Research on Ultrasonic Lamb Wave Phased Array Damage Imaging Method based on Laser Vibrometer* [D]. Jiangsu: Jiangsu University, 2025. (in Chinese)
- [5] 邓宇翔,李正红. 基于激光多普勒振动谱的数控机床主轴故障在线诊断[J]. 机械设计与制造工程, 2024, 53(4): 61-66.
DENG Y X, LI Z H. Online fault diagnosis of CNC machine tool spindle based on Doppler laser vibration spectrum[J]. *Machine Design and Manufacturing Engineering*, 2024, 53(4): 61-66. (in Chinese)
- [6] 李洪涛,高山,赵科,等. 基于激光多普勒测振的气体绝缘输电线路机械缺陷非接触检测技术与应

作者贡献声明:

黄海昇:理论、实验、数据处理,论文撰写;
倪梓浩:实验,数据处理;
白玉磊:论文修改;
董博:方法,论文修改,项目。

- 用[J]. 激光与光电子学进展, 2024, 61(13): 271-280.
LI H T, GAO S, ZHAO K, *et al.* Application of non-contact vibration detection for gas insulated transmission line *via* laser Doppler vibrometer technique[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2024, 61(13): 271-280. (in Chinese)
- [7] PAN B, QIAN K M, XIE H M, *et al.* Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review[J]. *Measurement Science and Technology*, 2009, 20(6): 062001.
- [8] 陈凡秀,庄琦,王日龙. 基于数字图像相关方法的动载颗粒体系力链破坏机制初探[J]. 岩土力学, 2016, 37(2): 563-573.
CHEN F X, ZHUANG Q, WANG R L. A preliminary study of dynamic failure mechanism of force chain in a particle system based on digital image correlation[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(2): 563-573. (in Chinese)
- [9] TIOSSI R, DE TORRES E M, RODRIGUES R C S, *et al.* Comparison of the correlation of photoelasticity and digital imaging to characterize the load transfer of implant-supported restorations[J]. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, 2014, 112(2): 276-284.
- [10] GAO H B, SUN H N, WANG Z K, *et al.* Bending performance of alkali-activated concrete beams based on digital image correlation method[J]. *Materials*, 2025, 18(7): 1616.
- [11] 蔡鹏飞,蒋明. DIC 方法在 PVA 纤维混凝土振动材性实验中的应用[J]. 苏州科技大学学报(自然科学版), 2022, 39(3): 45-50.
CAI P F, JIANG M. Application of DIC method in vibration material experiment of PVA fiber concrete[J]. *Journal of Suzhou University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2022, 39(3): 45-50. (in Chinese)
- [12] 高权,吴玖荣,傅继阳. 基于 DIC 技术和贝叶斯 FFT 方法结合的结构位移监测和模态参数识别

- [J]. 广州大学学报(自然科学版), 2024, 23(2): 91-99.
- GAO Q, WU J R, FU J Y. Structural displacement monitoring and modal parameter identification based on the combining DIC technique and Bayesian FFT approach[J]. *Journal of Guangzhou University (Natural Science Edition)*, 2024, 23(2): 91-99. (in Chinese)
- [13] TU J X, QIN G J, LV H F. Frequency-domain distributed multichannel Wiener filtering speech enhancement algorithm[J]. *E3S Web of Conferences*, 2024, 522: 01027.
- [14] PRASAD P, NIMINET V, ANITHA J. A hybrid approach for CT-MR brain image denoising using PSO-optimised non-local means and Wiener filtering[J]. *BRAIN Broad Research in Artificial Intelligence and Neuroscience*, 2024, 15(4): 87.
- [15] YU M, SU J, WANG Y, HAN C. A noise reduction method for rolling bearing based on improved Wiener filtering. *Rev Sci Instrum*, 2025, 96(2): 024705.
- [16] 杨建华, 方园园, 赵轩. 基于改进维纳滤波算法的运动模糊二维码图像复原方法[J]. 激光杂志, 2024, 45(2): 91-94.
- YANG J H, FANG Y Y, ZHAO X. Image restoration method of motion blur two-dimensional code based on improved Wiener filter algorithm[J]. *Laser Journal*, 2024, 45(2): 91-94. (in Chinese)
- [17] GOILKAR S S, YADAV D M. Defocused image restoration using wiener and inverse filter in context of security application [C]. *AGRIVOLTA-ICS2021 Conference: Connecting Agrivoltaics Worldwide, Freiburg, Germany. AIP Publishing*, 2022.
- [18] RASAL T, VEERAKUMAR T, SUBUDHI B N, *et al.* Mixed Poisson Gaussian noise reduction in fluorescence microscopy images using modified structure of wavelet transform[J]. *IET Image Processing*, 2021, 15(7): 1383-1398.
- [19] PAN B. Full-field strain measurement using a two-dimensional Savitzky-Golay digital differentiator in digital image correlation[J]. *Optical Engineering*, 2007, 46(3): 033601.
- [20] 杜昊, 王荣桥, 赵炎, 等. 基于数字图像相关法的多尺度全场应变测量方法[J/OL]. 航空动力学报, 2025: 1-10. (2025-01-14). <http://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=HKDI20241227001&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>. (in Chinese)
- DU H, WANG R Q, ZHAO Y, *et al.* Multiscale full-field strain measurement method based on digital image correlation method[J/OL]. *China Industrial Economics*, 2025: 1-10. (2025-01-14). <http://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=HKDI20241227001&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>. (in Chinese)
- [21] SHEN C T, HWANG W L, PEI S C. Spatially-varying out-of-focus image deblurring with L1-2 optimization and a guided blur map[C]. *2012 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*. March 25-30, 2012, Kyoto, Japan. IEEE, 2012: 1069-1072.
- [22] LAGENDIJK R L, BIEMOND J, BOEKEE D E. Regularized iterative image restoration with ringing reduction[J]. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 1988, 36(12): 1874-1888.
- [23] TEKALP A M, SEZAN M I. Quantitative analysis of artifacts in linear space-invariant image restoration [J]. *Multidimensional Systems and Signal Processing*, 1990, 1(2): 143-177.
- [24] XU L, ZHENG S C, JIA J Y. Unnatural L0 sparse representation for natural image deblurring [C]. *2013 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. June 23-28, 2013, Portland, OR, USA. IEEE, 2013: 1107-1114.
- [25] PAN J S, HU Z, SU Z X, *et al.* L₀-regularized intensity and gradient prior for deblurring text images and beyond [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2017, 39(2): 342-355.
- [26] 刘丽萍. 基于维纳滤波的模糊图像恢复算法[J]. 信息系统工程, 2016(9): 78-79.
- LIU L P. Fuzzy image restoration algorithm based on Wiener filter[J]. *China CIO News*, 2016(9): 78-79. (in Chinese)
- [27] HUYNH-THU Q, GHANBARI M. Scope of validity of PSNR in image/video quality assessment [J]. *Electronics Letters*, 2008, 44(13): 800.
- [28] WANG Z, BOVIK A C, SHEIKH H R, *et al.* Image quality assessment: from error visibility to structural similarity[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2004, 13(4): 600-612.
- [29] PAN B, LU Z X, XIE H M. Mean intensity gradi-

ent: an effective global parameter for quality assessment of the speckle patterns used in digital image correlation[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2010, 48(4): 469-477.

[30] DONG B, LI C Z, PAN B. Fluorescent digital image correlation applied for macroscale deformation measurement [J]. *Applied Physics Letters*, 2020, 117(4): 044101.

作者简介:



黄海昇(2001—),男,广东汕头人,硕士研究生,2023年于五邑大学获得学士学位,现就读于广东工业大学自动化学院,攻读人工智能专业硕士学位,主要研究方向为二维数字图像相关的高精度离面位移全场测量分析。
E-mail:2112304392@mail2.gdut.edu.cn

通讯作者:



董 博(1989—),男,河南浚池人,博士,副教授,硕士生导师,2012年于广东工业大学获得学士学位,2017年于广东工业大学获得博士学位,主要从事层析干涉测量、光测力学、传感与成像等方面的研究。
E-mail:b.dong@gdut.edu.cn