

文章编号 1004-924X(2025)15-2402-12

散斑条纹自适应寻线滤波

赵琪涵^{1,2}, 罗凯祺¹, 蒲嘉祺¹, 姚彦峰², 王永红^{2*}

(1. 台州学院 智能制造学院, 浙江 台州 318000;
2. 合肥工业大学 仪器科学与光电工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要: 数字散斑干涉技术测量得到的原始相位图通常受到散斑噪声的干扰, 进而影响解包裹结果的准确性与可靠性。为了提升滤波效果, 并增强该技术在复杂应用场景中的实用性, 提出了一种散斑条纹自适应寻线滤波方法。使用 YOLOv8 自动识别与定位散斑条纹区域, 减少无效区域计算; 结合波峰特征分析动态规划最优取样路径, 提升对复杂条纹结构的表征能力; 通过 B 样条拟合建立局部方差熵评价模型, 在量化滤波平滑程度的同时有效保留关键相位跳变信息。实验结果表明, 该方法在多种场景下均表现出良好的滤波性能与自动化能力, 为数字散斑干涉技术的工程化应用提供了可靠支撑。

关键词: 数字散斑干涉; 滤波评价; 自动滤波; 自适应寻线

中图分类号: TP391.4 **文献标识码:** A

doi: 10. 37188/OPE. 20253315. 2402

CSTR: 32169. 14. OPE. 20253315. 2402

Speckle fringes adaptive path-seeking filtering method

ZHAO Qihan^{1,2}, LUO Kaiqi¹, PU Jiaqi¹, YAO Yanfeng², WANG Yonghong^{2*}

(1. School of Intelligent Manufacturing, Taizhou University, Taizhou 318000, China;
2. School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Hefei University of Technology,
Hefei 230009, China)

* Corresponding author, E-mail: yhwang@hfut. edu. cn

Abstract: Digital speckle pattern interferometry (DSPI) is a real-time, whole-field, and non-contact optical measurement method that has been widely applied in the field of non-destructive testing. However, the original phase maps obtained from DSPI measurements are often corrupted by speckle noise, which can compromise the accuracy and reliability of the subsequent phase unwrapping process. Therefore, there is a pressing need for an adaptive filtering method that can improve filtering performance and enhance the applicability of DSPI in complex application scenarios. In this paper, we propose an adaptive path-seeking filtering method for speckle fringes. The method first employs YOLOv8 to automatically identify and locate speckle fringe regions, reducing the calculation of invalid areas. Then, combined with the peak feature analysis, the optimal sampling path is dynamically planned to enhance the characterization of complex fringe structures. Finally, a local variance entropy (LVE) evaluation model is established based on B-spline fitting, enabling quantitative assessment of filtering smoothness while effectively preserving critical

收稿日期: 2025-06-16; 修订日期: 2025-07-16.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 52375536); 江西省重点研发计划资助项目 (No. 20223BBE51010)

phase jump information. Experimental results show that the proposed method exhibits excellent filtering performance and automation capabilities across various scenarios, providing reliable support for the engineering applications of DSPI.

Key words: digital speckle pattern interferometry; filtering evaluation; automatic filtering judgment; adaptive path-seeking

1 引言

数字散斑干涉技术是一种实时、全场、非接触的光学测量方法,广泛应用于汽车和航空航天领域中变形或缺陷的测量^[1-4]。该技术测量得到的原始相位图为包含散斑噪声的包裹相位图,需要进行解包裹处理以获得平滑连续的相位分布^[5-7]。其中,散斑噪声会影响甚至造成解包裹的失败,因此,在解包裹之前需要对相位图进行滤波处理。然而,滤波效果的好坏往往依赖于人眼的主观判断,难以准确把握滤波终止时机,从而制约了散斑图像处理的自动化进程,限制了该技术在实际应用中的推广。因此,研究一种有效的滤波定量评价方法,不仅有助于实现图像处理流程的自动化,还能为滤波算法的优化设计与参数选择提供客观依据,提升数字散斑干涉技术的实用性和适用性。

在滤波算法的比较实验中,常用的滤波评价指标包括散斑指数(Speckle Index, SI)、峰值信噪比(Peak Signal to Noise Ratio, PSNR)和结构相似性(Structural Similarity, SSIM)等^[8-11]。但是这些评价指标仅能反映滤波效果的单一特征,即噪声水平或失真程度,无法对滤波效果进行综合评价。此外,这些指标通常需要参考数据和测量数据进行计算,不适用于缺少参考数据的相位图持续滤波过程。因此,本团队提出了一种基于平滑样条拟合的散斑相位图滤波评价方法,通过对相位分布进行平滑样条拟合并计算其均方根误差来表征散斑相位图的滤波效果,利用数据收敛特性确定滤波终止条件^[12]。XIAO等提出了一种基于噪声的正余弦滤波方法,该方法根据正交小波包能量估算相位图中的噪声能量,并以此作为滤波评价参数确定滤波循环次数^[13]。LIU等提出了一种基于相位图质量评价的自适应滤波方法,该方法以平均一阶及二阶相位梯度矢量模比作为滤波评价参数,估计相位图噪声水平实现

相位图自动滤波^[14]。

在上述研究的基础上,为了提升滤波方法在非均匀噪声、复杂条纹分布及多类型缺陷等实际应用场景中的适用性,同时进一步减少数据计算量并提高自动化程度,本文提出了一种散斑条纹自适应寻线滤波方法。该方法通过YOLOv8自动识别散斑条纹区域,结合自适应最优取样路径规划与B样条拟合的方差熵参数对相位图局部平滑程度进行量化评估,从而实现散斑相位图的自动滤波处理。

2 原理

2.1 YOLOv8自动识别散斑条纹区域

随着相机分辨率的不断提升,散斑相位图的尺寸也日益增大。一幅散斑相位图通常包含几百万个像素,直接对整幅二维图像的灰度数据进行计算分析,工作量巨大。尤其在处理非均匀噪声、复杂条纹分布及多类型缺陷时,有效信息往往集中在图像的局部区域,而非均匀分布在整幅图像中。因此,在进行滤波效果判断之前,识别并提取包含有效信息的散斑条纹区域显得尤为关键。

YOLOv8具备双向多尺度特征融合能力与高精度单阶段检测架构,在精细条纹的细节捕捉及模糊边缘的识别精度上表现出色,因此适用于散斑条纹区域的自动检测^[15]。YOLOv8的整体架构如图1所示,它主要由骨干网络(Backbone)、特征融合(Neck)和检测头(Head)组成^[16-18]。首先,输入端Input对原始相位图进行自适应尺寸调整和直方图均衡化预处理,以增强图像对比度和细节表现;然后,骨干网络通过CSPDarknet53网络从预处理图像中提取多尺度特征,确保模型捕捉不同尺度的目标信息;这些特征经过特征融合的特征金字塔网络(Feature Pyramid Network, FPN)和路径聚合网络(Path Aggregation

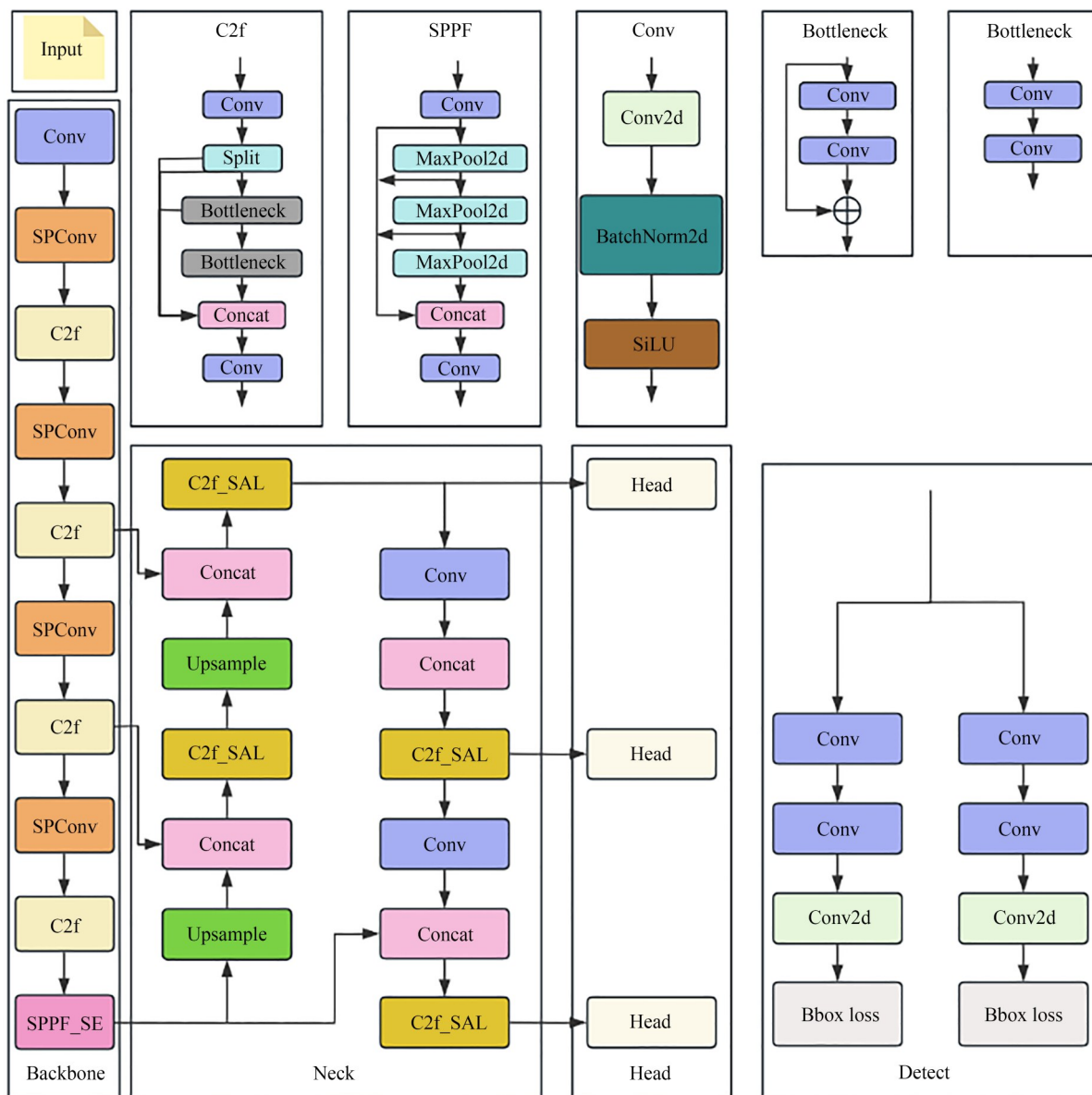


图1 YOLOv8整体架构

Fig. 1 Overall architecture of YOLOv8

Network, PAN)进行跨尺度融合;最终,检测头生成包含散斑条纹位置信息及其置信度的检测结果。

经过测试, YOLOv8 通过少量训练样本(40~50张)即可实现快速批量检测(10FPS),其轻量级架构(50张样本20分钟收敛)适配工程应用场景,并对不同形态、不同质量条纹展现出良好的泛化能力,源代码已开源^[19]。选取一张散斑干涉测量实验中对内置多个缺陷的圆盘试件进行动态无损检测所获得的原始相位图,如图2(a)所示。使用 YOLOv8 对该原始相位图进行处理

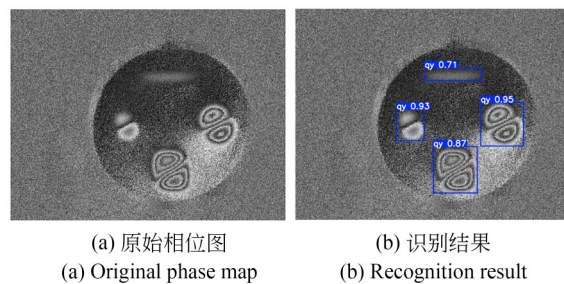


图2 YOLOv8 自动识别散斑条纹区域

Fig. 2 YOLOv8 automatically recognizes speckle pattern regions

后,得到的检测结果如图 2(b)所示。可以看到, YOLOv8 成功识别并定位了多个散斑条纹区域, 包括一个方形缺陷,两个不同深度的圆形缺陷和一个条形缺陷。

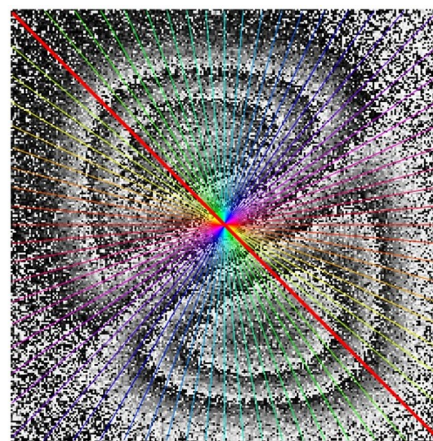
2.2 基于波峰分析的自适应寻线取样

在数据分析前,需要将二维图像数据转换为更容易处理的一维线性数据,通常选择相位图对角线截面上的灰度分布^[13]。然而,在面对具有明显方向性的剪切条纹或其他非均匀条纹结构时,仅依赖对角线路径进行取样可能无法准确捕捉关键特征,甚至导致信息遗漏或误判。对同一幅剪切散斑干涉相位图在不同路径上的取样结果对比也表明,当对角线路径与条纹剪切方向正交时,对角线路径的灰度分布会丢失更多的条纹灰度跳变细节。此时,固定路径难以全面反映图像的整体结构特性,已不能满足复杂条纹结构的高效表征。

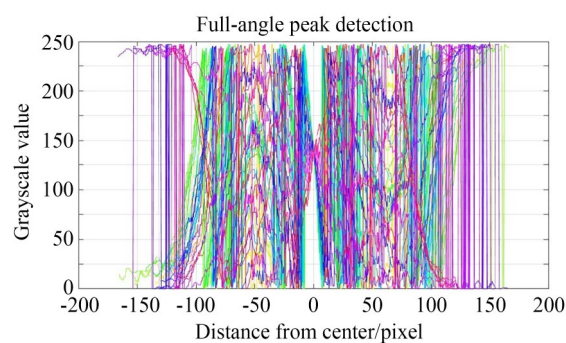
为了确保取样路径能够基本涵盖所有级数的条纹及其边缘跳变位置,从而较好地反映相位分布情况,基于灰度跳变次数即波峰数量选择最优取样路径。具体而言,如果取样路径上的波峰数量较多,则认为该路径经过的条纹级数较多,包含信息较多;相反,如果波峰数量较少,则认为该路径经过的条纹级数较少,包含信息量较少。因此,通过统计各路径上的波峰数量来评估其信息含量。具体步骤如下:采用系统化的极坐标转换方法,以图像中心为原点建立极坐标系,将二维灰度分布 $I(x, y)$ 转换为沿径向角度 θ 的一维函数 $I(r, \theta)$,从而更全面地分析图像特征;接着以 5° 为间隔划分路径线扫描灰度曲线,对比实验表明,该设置下路径角度的小幅偏差不会显著影响信息表征能力,同时能够兼顾搜索精度和计算效率;当检测到同时满足波峰最小高度 $\Delta I \geq 0.5(I_{\max} - I_{\min})$ 和波峰最小间距 $\Delta s \geq 100$ 像素条件的局部极值点时,判定为有效波峰;统计各路径的有效波峰数量 N_{peak} ,选择波峰数量最多的路径作为最优取样路径。

预处理后的散斑相位图及其全角度波峰数量的检测结果分别如图 3(a)和 3(b)所示。通过算法对各径向角度上的波峰分布情况进行分析,自动识别有效波峰数量最多的路径角度,并确定

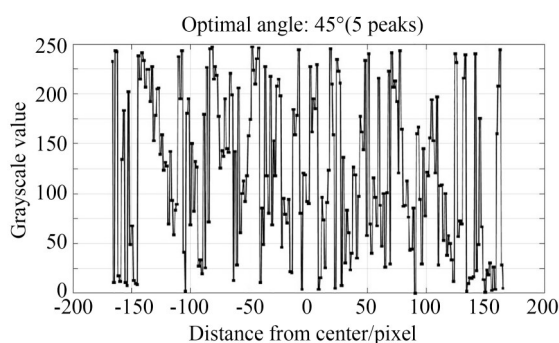
为最优取样路径,其灰度分布和波峰情况如图 3(c)所示。



(a) 预处理相位图
(a) Preprocessed phase map



(b) 全角度波峰数量的检测结果
(b) Full-angle peak detection result



(c) 最优取样路径的灰度分布和波峰情况
(c) Grayscale distribution and peak situation of the optimal sampling path

图 3 基于波峰分析的自适应寻线取样

Fig. 3 Adaptive path-seeking sampling based on wave analysis

2.3 B 样条拟合滤波评价

根据散斑噪声特征,相位图滤波效果的判断依据主要有两条:一是整体的散斑噪声抑制情况,二是跳变处的相位信息保留情况。为了将一维线性数据进一步转换为可定量分析的参数值,根据散斑相位图滤波效果的判断依据选择 B 样条拟合结果指标作为滤波评价参数。B 样条拟合通过其局部支撑性和可控平滑度的特性,既能精准捕捉条纹灰度分布的局部突变特征(如灰度跳变区域),又能通过调节节点数量灵活控制拟合曲线的平滑程度,从而为滤波终止提供量化依据。B 样条是一种基于控制点和基函数的分段参数化曲线,其数学本质是通过基函数的线性组合构造平滑曲线。给定控制点序列 $\{P_i\}_{i=0}^n$ 和阶数 p ,其函数表达式为:

$$C(u) = \sum_{i=0}^m P_i N_{i,p}(u), \quad (1)$$

其中: m 为控制点个数, P_i 为第 i 个控制点, $N_{i,p}(u)$ 为 p 阶 B 样条基函数,由节点向量 $U = \{u_0, u_1, \dots, u_m\}$ 递归定义。

B 样条的核心优势在于其局部支撑性和可控平滑度。每个基函数 $N_{i,p}(u)$ 仅在有限区间内非零,这意味着修改单个控制点仅影响局部曲线形状,而不会引起全局畸变。这一特性特别适合处理散斑条纹图像中的局部相位跳变区域,例如在条纹边缘或断裂处,可通过局部增加节点密度实现精准拟合。

为了进一步提升拟合曲线在特征保留与平滑程度之间的平衡能力,引入粗糙度作为惩罚项,和拟合误差共同构成目标函数,其表达式为:

$$\min_f \left\{ \sum_{i=1}^n w_i |y_i - f(x_i)|^2 + \rho \int |f''(x)|^2 dx \right\}, \quad (2)$$

其中: f 为拟合函数,表现为 B 样条基函数形式; ρ 为平滑参数,用于调节拟合误差项与粗糙度惩罚项之间的权重分配,根据广义交叉验证选择 $\rho \approx 0.111$ 。

以图 3 中的散斑相位图为例,分别对滤波前后相位图取样路径上的灰度值数据进行 B 样条拟合,结果如图 4 所示。可以看到,原始相位图的灰度值分布范围较广,呈现出杂乱无序的状态,并伴有大量突变,表明图像中存在大量的散斑噪

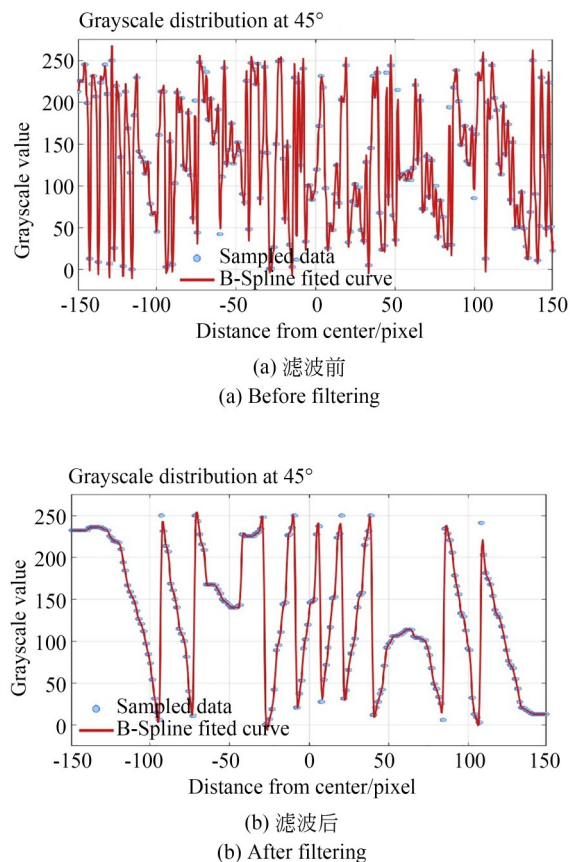


图 4 滤波前后相位图灰度分布的拟合结果

Fig. 4 Fitting results of phase map grayscale distributions before and after filtering

声,不同区域在复杂度上存在差异。而滤波相位图在灰度值分布上发生了显著变化,相邻像素的灰度值趋于一致,使得原本分散的灰度数据呈现出团状或线型的聚集特征。原先存在的多个峰值消失,最终形成区域内的单一主峰分布。这种由多峰向单峰的转变,在统计意义上证明了滤波处理有效提升了图像灰度分布的整体一致性,因此,将此类参数作为评估图像质量或滤波效果的评价指标。其中,方差用于量化像素灰度值与平均值之间的偏离程度,反映图像数据的波动性;而熵则用于衡量系统中随机变量的不确定性或混乱程度,能够有效描述图像结构的复杂性。其计算公式分别为:

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2, \quad (3)$$

$$H = - \sum_{i=1}^n p_i \log_2(p_i), \quad (4)$$

其中: n 为参与计算的像素点个数, x_i 为第 i 个像素点的灰度值, μ 为所有像素点灰度值的平均值, p_i 为第 i 个灰度值出现的概率。然而,单独使用方差或熵在评估滤波效果时存在局限,一方面噪声和跳变都表现为高方差,无法准确判断滤波是否完成;另一方面跳变区域并非仅由极端灰度值组成,过渡值会显著提升熵值。为此,提出局部方差熵模型(Local Variance Entropy, LVE),通过衡量方差分布的混乱程度来量化表征滤波效果。具体而言,随着滤波过程进行,方差分布将由分散状态逐渐向高方差(跳变区域)和低方差(非跳变区域)两端集中,反映出结构趋于清晰、噪声得到抑制的趋势。该模型在有效量化滤波平滑程度的同时,能够较好地保留关键的相位跳变信息,从而在抑制噪声与保持细节之间取得平衡,具备较强的综合评价能力。其计算公式为:

$$E_{LV} = - \sum_{i=1}^N \sigma_i \log_2(\sigma_i + \epsilon), \quad (5)$$

其中: N 为窗口总数,窗口尺寸为20, σ_i 为对应窗口的归一化方差值,引入极小值 ϵ 避免对数计算在 $\sigma_i = 0$ 时出错。由此,将散斑相位图的灰度分布特征转化为可定量分析的拟合参数,实现对滤波效果的量化表征。

由于相位条纹宽度较窄(15~20像素),为保留跳变特征并有效抑制噪声,使用 3×3 窗口的正余弦滤波算法对示例的原始相位图进行滤波处理^[20]。每次滤波后,计算LVE数值并作折线图,

如图5所示。可以看到,LVE在持续滤波过程中表现出明显的规律性变化,随着滤波次数的增加逐渐降低,最终趋于稳定。在前几次滤波中,局部方差熵的数值下降显著,表明此时滤波算法能有效抑制散斑噪声,大幅降低图像的局部统计复杂度。而在后续滤波中,局部方差熵的变化幅度明显减小,说明此时滤波处理对噪声的进一步抑制效果有限。基于提升滤波效率的考虑,设定当局部方差熵进入稳定平台阶段时,即可判定相位图的滤波处理完成。

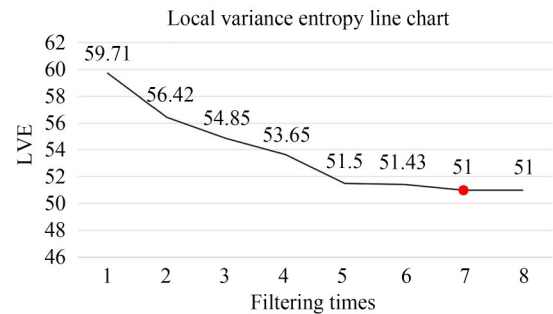


图5 局部方差熵折线图

Fig. 5 Local variance entropy line chart

散斑条纹自适应寻线滤波方法步骤如图6所示。第一步,使用YOLOv8对原始相位图进行处理,通过多尺度特征提取和网格化预测实现散斑条纹区域的自动识别与精确定位;第二步,以图像中心为基准,每隔 5° 设置一条径向取

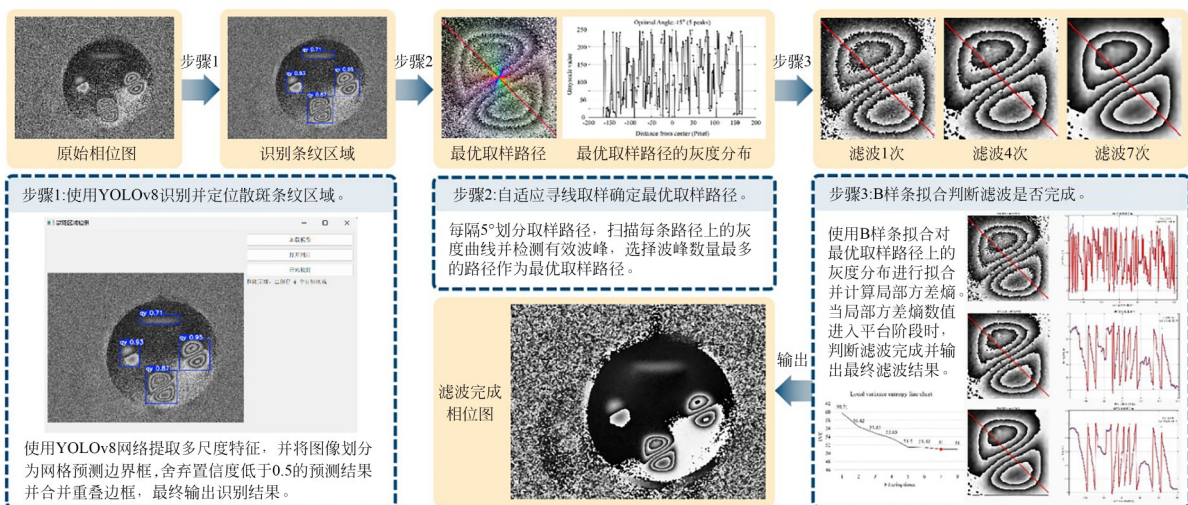


图6 散斑条纹自适应寻线滤波方法步骤

Fig. 6 Steps of speckle fringes adaptive path-seeking filtering method

样路径,通过分析各路径上的波峰分布特征,选取波峰数量最多的路径为最优取样路径;第三步,对最优取样路径的灰度分布进行B样条拟合,并引入局部熵和方差评价机制量化表征散斑相位图的滤波效果,最后输出滤波后的相位图。

3 实验结果

3.1 验证实验

为了验证散斑条纹自适应寻线滤波方法的性能,选取8张具有代表性的原始相位图进行实验,如图7所示。所有原始相位图均通过散斑干涉测量实验获得。首先,使用YOLOv8对图7中的8张原始相位图进行处理,识别并定位图像中的散斑条纹区域,结果如图8所示。可以看到,

YOLOv8在每张原始相位图中均成功提取了散斑条纹区域,不仅能够准确定位相位图中的主要散斑图案,还能够有效区分细微条纹变化和模糊边缘轮廓,框选区域完整准确。

对散斑条纹区域进行自适应寻线取样,得到最优取样路径上的灰度分布,如图9所示。对于剪切散斑图案,最优取样路径通常与剪切方向大致对应,但并不完全一致,实际选择仍需依赖波峰数量确定最优路径。对于散斑干涉图案,尽管各路径上的峰值数量波动相对较小,但根据自适应寻线取样的所选路径仍能保留较多的峰值跳变信息。具体来说,通过量化各径向角度上的有效波峰数量,算法能够识别并选择出包含最多关键特征的路径,即使在峰值波动较小的情况下,所选路径上的灰度分布依然保留了丰富的跳变信息。

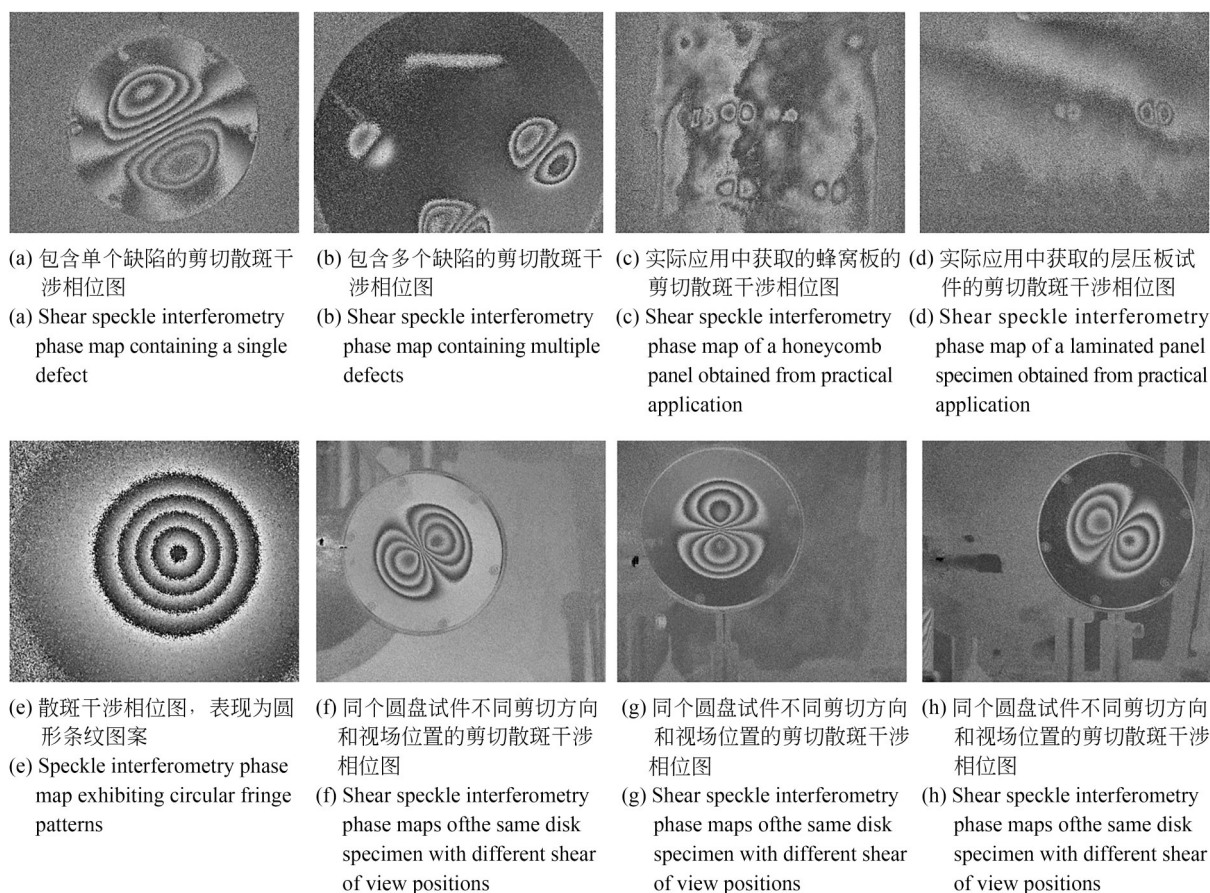


图7 原始相位图

Fig. 7 Original phase maps

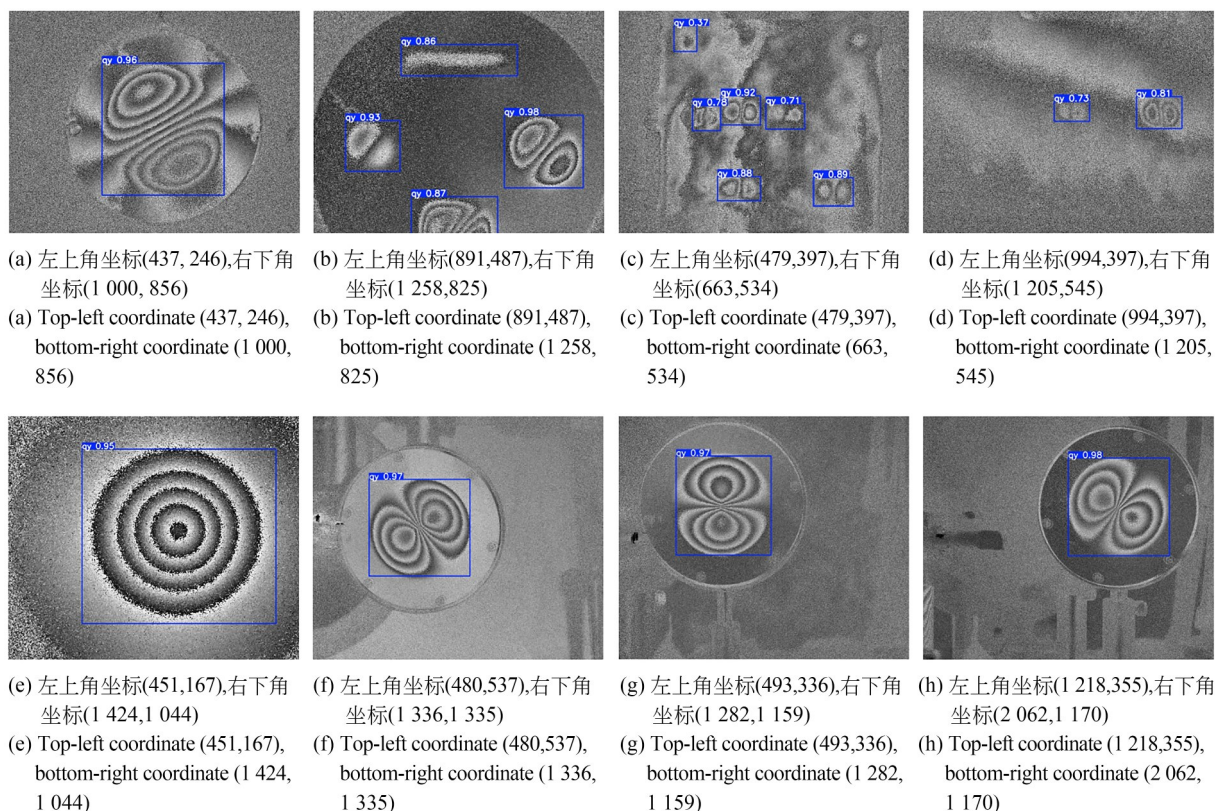


图8 YOLOv8识别散斑条纹区域

Fig. 8 YOLOv8 recognizes speckle pattern regions

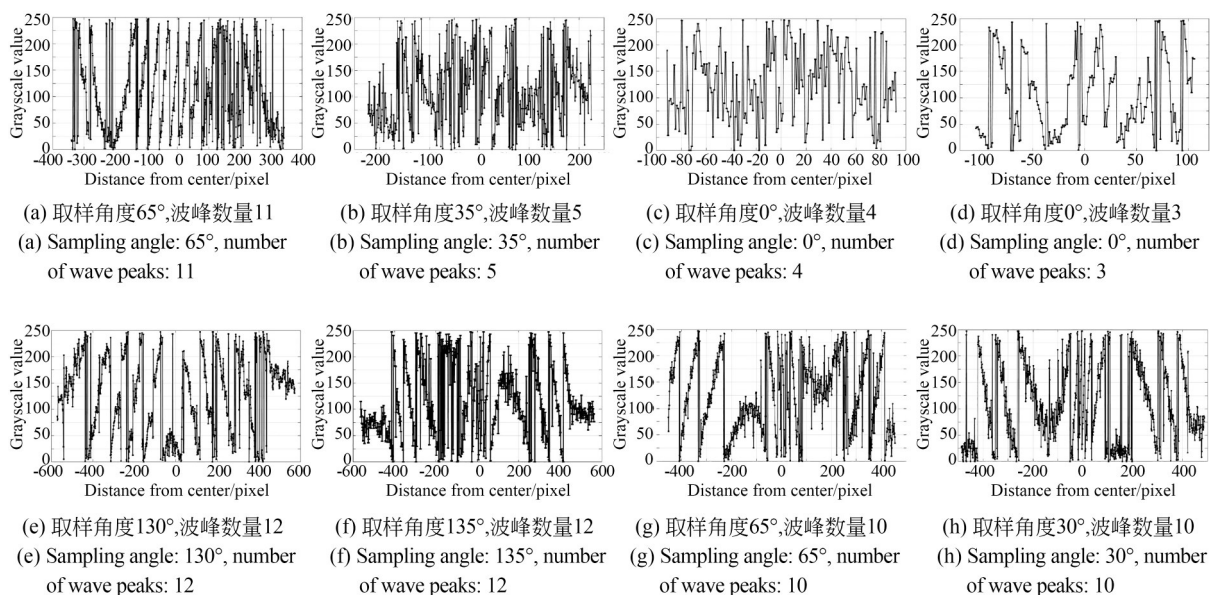


图9 最优取样路径灰度分布

Fig. 9 Grayscale distributions of optimal sampling paths

使用 3×3 窗口的正余弦滤波算法对散斑条纹区域进行多次迭代滤波处理。每次滤波

后,计算该区域的局部方差熵,并绘制 LVE 随滤波次数变化的折线图,如图 10 所示。可以看

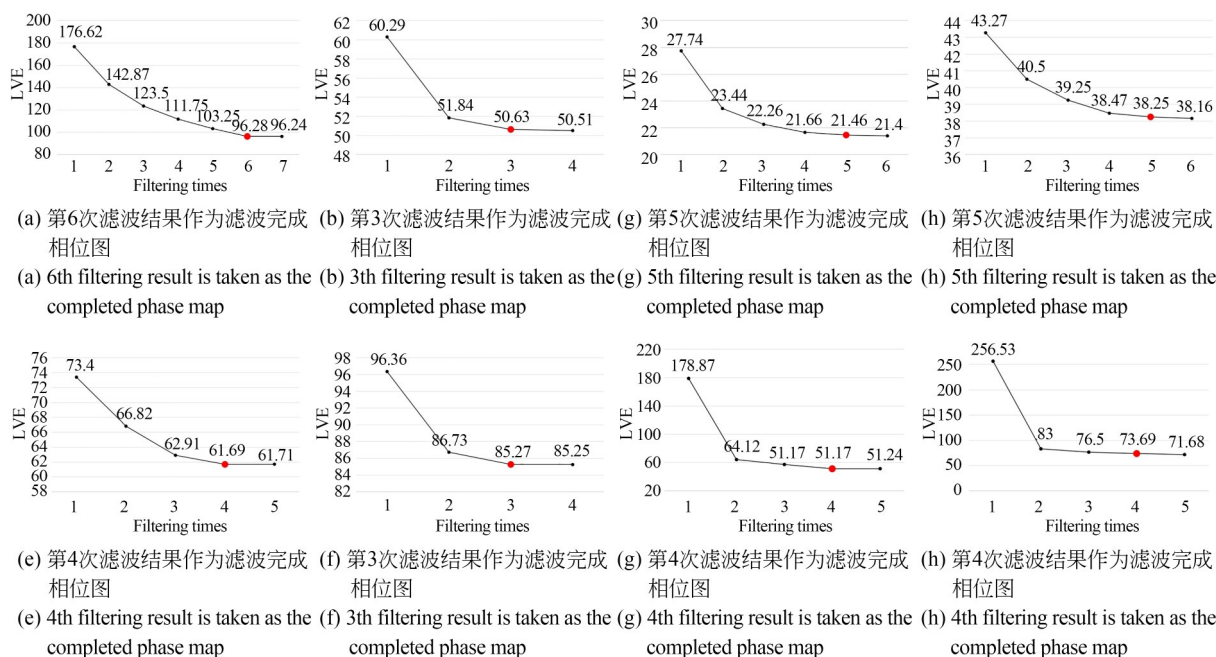


图 10 局部方差熵折线图

Fig. 10 Local variance entropy line charts

到,局部方差熵在持续滤波过程中,其数据走向呈现出明显的规律性变化,随着滤波次数的增加,局部方差熵值逐渐减小并趋于稳定,与理论一致。

在获得每次迭代滤波后相位图的局部方差熵后,并结合其变化趋势动态判断滤波终止时机。具体而言,通过计算连续两次迭代间 LVE 的相对变化率,当该变化率连续低于预设的动态

调整阈值(5%)时,判断系统进入稳定状态从而终止滤波过程。输出该次的滤波相位图作为滤波完成相位图,如图 11 所示。

为了进一步验证该滤波方法在评估散斑相位图滤波效果方面的准确性,采用质量图引导的解包裹算法对滤波完成相位图进行展开,结果如图 12 所示。可以看到,解包裹相位图表现出良好的连续性,没有出现计算错误区域。值得注意的

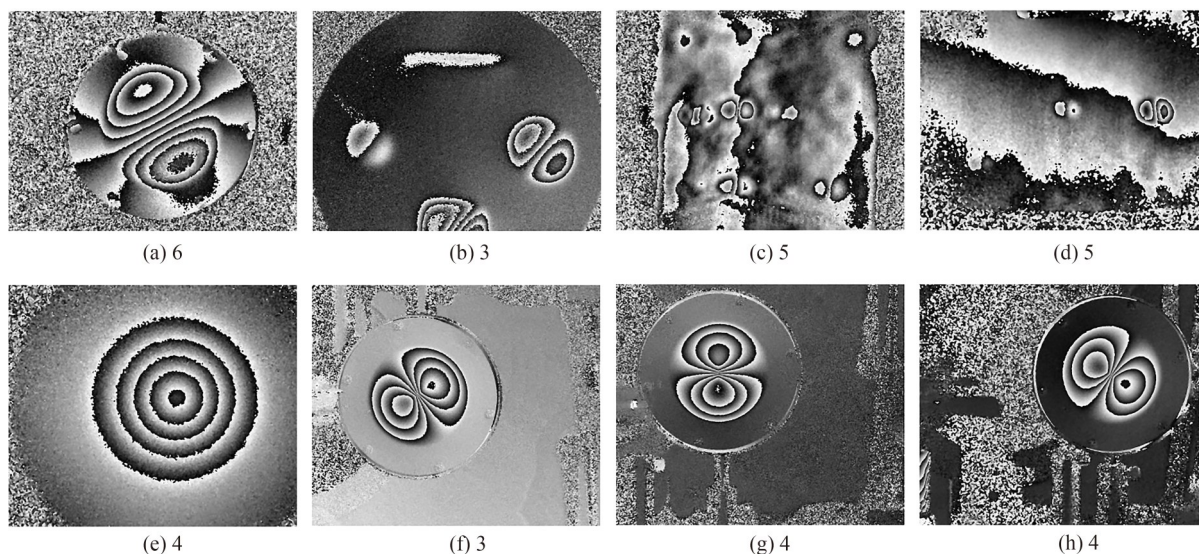


图 11 不同次数滤波后的相位图

Fig. 11 Phase maps filtered for different times

是,尽管图 11(a)中仍然存在较多的散斑噪声,但依然能够获得过渡平滑、细节清晰的解包裹相位图,这表明当前的滤波程度已经足够。由此表明,采用散斑条纹自适应寻线滤波方法处理的相

位图滤波效果良好,并展示了在不同背景、试件及视场条件下的强大适应能力。该方法能够确保后续相位信息的准确提取,从而验证了其有效性和适用性。

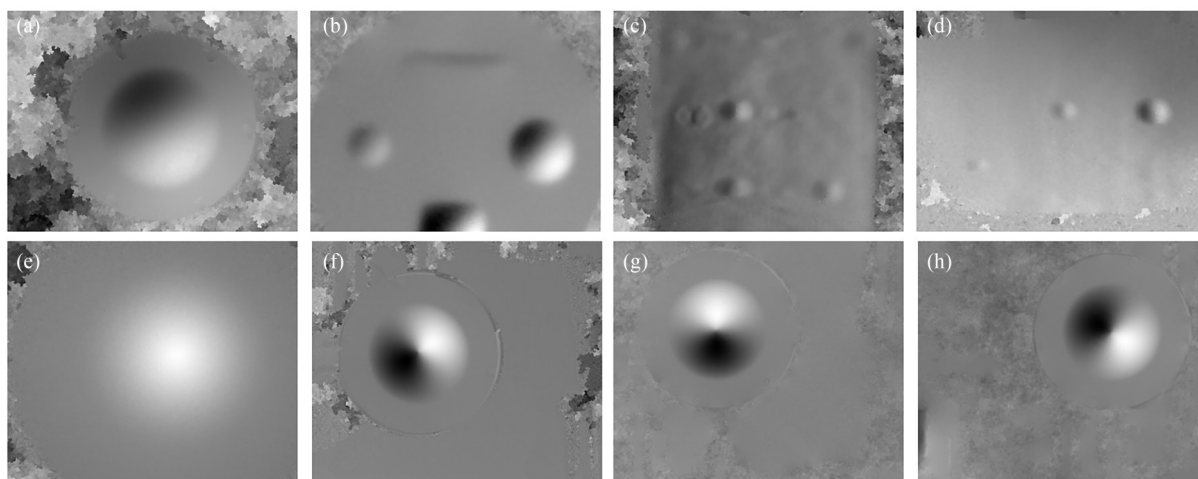


图 12 解包裹相位图

Fig. 12 Unwrapped phase maps

3.2 对比实验

为了验证散斑条纹自适应寻线滤波方法的优势,进行了对比实验。首先,对图 7(b)相位图的条纹区域提取与未提取情况进行对比(图 13),结果显示未提取条纹的数据丢失了相位跳变特征。其次,对图 7(f)相位图采用自适应和固定路径取样进行对比(图 14),自适应路径能够更好地捕捉各级条纹灰度跳变细节,信息量显著优于固定路径。最后,对相同路径下的 LVE 和均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)变化进行分析(图 15),发现 RMSE 在滤波初期快速下降,而 LVE 在整个滤波过程中持续单调递减(降幅

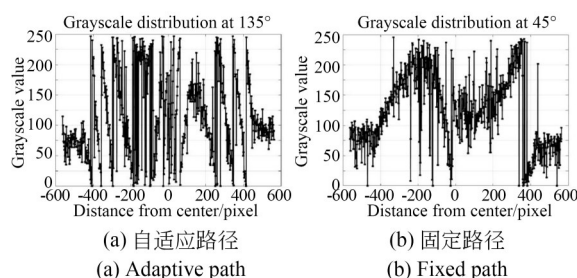


图 14 自适应和固定路径取样对比

Fig. 14 Comparison of adaptive and fixed path sampling

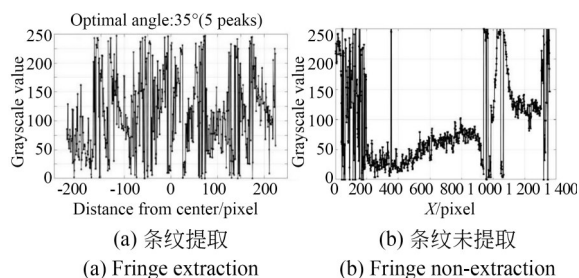


图 13 条纹提取与未提取对比

Fig. 13 Comparison of fringe extraction and non-extraction

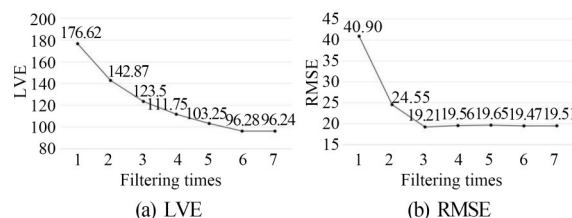


图 15 LVE 与 RMSE 对比

Fig. 15 Comparison of LVE and RMSE

45.5%),且收敛形态明确(第6次滤波结束)。本文方法不仅有效保留了关键的相位跳变特征,还提供了更丰富的条纹细节信息,从而确保相位图滤波判断的准确性。

4 结 论

本文提出了散斑条纹自适应寻线滤波方法,使用 YOLOv8 自动识别散斑条纹区域,结合波峰特征分析动态规划最优取样路径;并通过 B 样条拟合评估灰度分布的平滑程度作为滤波效果的量化指标。实验结果表明,该方法适用于包含多种缺陷或不同视场位置的散斑相位图自动滤波处理,能够精准提取条纹区域,确定最优取样路径;通过局部方差熵确定滤波终止条件,滤波完

成相位图经过解包裹处理后,过渡自然、细节清晰,展示了该方法在多种应用场景下的适用性和稳定性。

作者贡献声明:

赵琪涵:论文构思、方案设计与论文撰写;
罗凯祺:方案实验研究与论文材料整理;
蒲嘉祺:实验程序编程及数据整理分析;
姚彦峰:光路搭建与实验图像提供;
王永红:实验方案指导与设备支持。

参考文献:

- [1] ZHAO Q H, DAN X Z, SUN F Y, *et al.* Digital shearography for NDT: phase measurement technique and recent developments[J]. *Applied Sciences*, 2018, 8(12): 2662.
- [2] ZHAO Q H, YAO Y F, WANG Y H, *et al.* Simultaneous trishearing digital shearography for non-destructive testing[J]. *Optical Engineering*, 2022, 61(7): 14.
- [3] LI J R, YAO Y F, ZHAO Q H, *et al.* Simultaneous measurement of six displacement gradients using Digital Shearography [J]. *Measurement*, 2025, 240: 115520.
- [4] YAO Y F, WANG Y H, WANG Z Y, *et al.* Three-directional digital shearography based on SLM using a honeycomb-like pattern [J]. *Optics Letters*, 2024, 49(17): 4907-4910.
- [5] 王永红, 陈维杰, 钟诗民, 等. 相位解包裹技术及应用研究进展[J]. *测控技术*, 2018, 37(12): 1-7, 16.
WANG Y H, CHEN W J, ZHONG SH M, *et al.* Research progress in phase unwrapping technology and its applications [J]. *Measurement & Control Technology*, 2018, 37(12): 1-7, 16. (in Chinese)
- [6] ZHONG H P, TANG J S, TIAN Z, *et al.* Hierarchical quality-guided phase unwrapping algorithm [J]. *Applied Optics*, 2019, 58(19): 5273-5280.
- [7] 李梦霞, 曹博, 卢佳玮, 等. 数学形态学区域分割的快速相位解包裹算法[J]. *光学精密工程*, 2021, 29(11): 2724-2733.
LI M X, CAO B, LU J W, *et al.* Fast phase unwrapping algorithm based on region segmenting with mathematical morphology [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2021, 29(11): 2724-2733. (in Chinese)
- [8] 潘云, 潘卫清, 晁明举. 数字全息技术中散斑噪声滤波算法比较[J]. *应用光学*, 2011, 32(5): 883.
PAN Y, PAN W Q, CHAO M J. Comparison of algorithms for filtering speckle noise in digital holography [J]. *Journal of Applied Optics*, 2011, 32(5): 883. (in Chinese)
- [9] 吴一全, 叶志龙, 万红. 双树复小波和各向异性扩散再现像散斑噪声抑制[J]. *中国激光*, 2013, 40(4): 409002.
WU Y Q, YE ZH L, WAN H. Speckle noise suppression of reconstructed image based on dual-tree complex wavelet and anisotropic diffusion [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(4): 409002. (in Chinese)
- [10] GU G Q, WANG K F, XU X. Denoising in digital speckle pattern interferometry using fast discrete curvelet transform [J]. *The Imaging Science Journal*, 2014, 62(2): 106-110.
- [11] TOUNSI Y, KUMAR M, NASSIM A, *et al.* Speckle noise reduction in digital speckle pattern interferometric fringes by nonlocal means and its related adaptive kernel-based methods [J]. *Applied Optics*, 2018, 57(27): 7681-7690.
- [12] 赵琪涵, 王永红, 高新亚, 等. 基于平滑样条拟合的相位图像滤波评价方法[J]. *光学学报*, 2018, 38(8): 204-210.
ZHAO Q H, WANG Y H, GAO X Y, *et al.* Filtering evaluation method of phase images based on smooth spline fitting [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(8): 204-210. (in Chinese)
- [13] 肖启阳, 李健, 吴思进, 等. 基于能量的 DSPI 相位图正余弦降噪[J]. *光学精密工程*, 2018, 26(4): 936-943.

- XIAO Q Y, LI J, WU S J, *et al.* Denoising of DSPI phase map using sine-cosine filtering and signal energy[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(4): 936-943. (in Chinese)
- [14] 刘持越. 散斑干涉形变测量图像处理技术研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2020.
- LIU CH Y. *Research on Image Processing Technology of Digital Speckle Pattern Interferometry Based Deformation Measurement* [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2020. (in Chinese)
- [15] 王永红, 郑子华, 刘向玮, 等. 加载策略对剪切散斑干涉无损检测影响研究[J]. 光子学报, 2025, 54(6): 53-63.
- WANG Y H, ZHENG Z H, LIU X W, *et al.* Study on the influence of loading strategies on non-destructive testing based on shearography[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2025, 54(6): 53-63. (in Chinese)
- [16] HUSSAIN M. YOLO-v1 to YOLO-v8, the rise of YOLO and its complementary nature toward digital manufacturing and industrial defect detection[J]. *Machines*, 2023, 11(7): 677.
- [17] SAFALDIN M, ZAGHDEN N, MEJDOUB M. An improved YOLOv8 to detect moving objects[J]. *IEEE Access*, 2024, 12: 59782-59806.
- [18] 范博淦, 王淑青, 陈开元. 基于改进 YOLOv8 的印刷电路板缺陷检测模型[J]. 现代电子技术, 2025, 48(11): 144-150.
- FAN B G, WANG SH Q, CHEN K Y. Printed circuit board defect detection model based on improved YOLOv8[J]. *Modern Electronics Technique*, 2025, 48(11): 144-150. (in Chinese)
- [19] YOLOv8-of-the-speckle-fringes-adaptive-line-seeking-filtering-method [Z/OL]. <https://github.com/Derpu6/YOLOv8-of-the-speckle-fringes-adaptive-line-seeking-filtering-method>.
- [20] 吴荣, 陆阳, 欧阳爱国. 正余弦变换和双调滤波相结合的剪切散斑干涉图像去噪方法[J]. 中国光学(中英文), 2024, 17(2): 435-443.
- WU R, LU Y, OUYANG A G. A denoising method combining bitonic filtering and sine-cosine transform for shearography fringe pattern[J]. *Chinese Optics*, 2024, 17(2): 435-443. (in Chinese)

作者简介:



赵琪涵(1995—),女,浙江台州人,博士,讲师,2016年、2021年于合肥工业大学分别获得学士和博士学位,主要从事散斑干涉测量、无损检测等方面的研究。E-mail: zhaoqihan@tzc.edu.cn

通讯作者:



王永红(1972—),男,博士,教授,博士生导师,2004年于合肥工业大学获得博士学位,2007至2008年在美国Oakland University做博士后工作,主要研究方向包括光学精密测试技术、激光散斑干涉测量、机器视觉与图像处理、材料变形应变机械性能测量、复合材料无损检测。E-mail: yhwang@hfut.edu.cn