

基于平滑样条拟合的相位图像滤波评价方法

赵琪涵^{1**}, 王永红^{1*}, 高新亚¹, 孙方圆¹, 闫佩正¹, 杨连祥^{1,2}

¹合肥工业大学仪器科学与光电工程学院, 安徽 合肥 230009;

²美国奥克兰大学机械工程系, 密歇根 罗切斯特 48309

摘要 在散斑干涉测量中, 散斑相位图存在大量散斑噪声, 需要对其进行滤波处理。但是, 目前存在的滤波评价指标不适用于对单一图像持续滤波过程的判断, 难以实现滤波过程的自动化。提出一种基于平滑样条拟合的滤波评价方法, 通过对滤波过程中相位图的相位分布进行平滑样条拟合并计算其均方根误差, 实现对滤波效果的定量分析, 以及对持续滤波过程中的图像滤波完成情况的判断, 并采用散斑干涉测量中的实验图像对所提方法进行实验验证。实验结果表明, 该方法能有效判断散斑相位图是否滤波完成。最后通过对该方法判断的滤波完成图像进行解包裹处理, 进一步验证了该方法的有效性和普适性。

关键词 散斑干涉测量; 滤波评价; 平滑样条拟合; 滤波完成判断

中图分类号 TP391.4

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0815020

Filtering Evaluation Method of Phase Images Based on Smooth Spline Fitting

Zhao Qihan^{1**}, Wang Yonghong^{1*}, Gao Xinya¹, Sun Fangyuan¹, Yan Peizheng¹,
Yang Lianxiang^{1,2}

¹ School of Instrument Science and Opto-Electronics Engineering, Hefei University of Technology,
Hefei, Anhui 230009, China;

² Department of Mechanical Engineering, Oakland University, Rochester, Michigan 48309, USA

Abstract In speckle interferometry, there are a large number of speckle noises in the speckle phase map, which need to be filtered. However, the existing filtering evaluation indexes are not suitable to determine the continuous filtering process of single image, and the automation of the filtering process is difficult to be achieved. Therefore, a filtering evaluation method based on smoothing spline fitting is presented in this paper. Firstly the smoothing spline fitting method is used to process the distribution of the phase map. Secondly, the root-mean-square error is used to evaluate the result of continuous filtering process by the smoothing spline fitting. Finally, the experimental images of speckle interferometry are used to verify the proposed method. The results of the experiment show that the method can realize the quantitative analysis of the filtering effect and the judgment of the completion of the image filtering in continuous filtering process, and the effectiveness and universality of the method are also verified.

Key words speckle interferometry; filtering evaluation; smooth spline fitting; judgement of filtering completion

OCIS codes 120.6165; 120.2440

1 引 言

数字散斑干涉技术是利用激光散斑作为信息载体的一种实时全场光学测量技术, 因其具有非接触、全场、高精度等特点, 近年来在物体的振动、位移、形变等物理量的检测方面被广泛应用并发挥着积极的

作用^[1-3]。数字散斑干涉测量的基本原理是, 激光器生成的激光光束经过半透半反镜后分成物光与参考光两束, 其中物光在被测物表面发生漫反射, 与参考光重叠产生干涉现象, 由图像获取设备 (CCD 或 CMOS 相机) 采集被测物变形前后的散斑干涉图像, 然后从散斑图像中提取被测物的相位信息^[4-6]。

收稿日期: 2018-03-30; 修回日期: 2018-05-08; 录用日期: 2018-05-21

基金项目: 国家自然科学基金 (51375136)、国家重点研发计划 (2016YFF0101803)、中航工业产学研专项项目 (CXY2013HFGD22)

* E-mail: yhwang@hfut.edu.cn; ** E-mail: 943056558@qq.com

由于在相位提取的过程中,对散斑图像进行了相移运算,得到的相位图的相位信息被包裹在 $[-\pi, \pi]$ 之间,需要对包裹相位图进行解包裹处理,将包裹的相位信息恢复为连续的相位图。但原始散斑相位图通常含有大量的噪声,严重影响相位解包裹的结果,噪声过大的情况下甚至会造成相位解包裹的失败。因此,在相位解包裹处理前,需要对相位图进行滤波处理。如何有效地去除相位图中的散斑噪声是数字散斑干涉技术的关键。

近年来国内外学者做了大量的研究工作,提出了各种各样的滤波方法。由于散斑相位图具有噪声与相位信息混叠的特性,传统的滤波方法如均值滤波、中值滤波、高斯滤波等,在滤除散斑噪声的同时,也会滤除、模糊有用的相位信息^[7-8]。因此对相位图的滤波处理不同于传统的滤波方法,需要在滤除散斑噪声的同时,保留条纹边缘的跳变信息。针对传统滤波方法模糊条纹边界、丢失相位信息的问题,Aebischer等^[9-10]提出正余弦滤波方法,将相位图转换为正弦图与余弦图,分别对其进行滤波处理,然后反运算合成,可以有效保留相位图中的跳变信息。针对相位图灰度分布具有方向性的特性,Yu等^[11-13]提出等值线窗口滤波方法,沿条纹切线方向进行跟踪,在跟踪得到的等值线窗口内进行滤波,对含有高噪声的相位图有很强的噪声抑制能力。此外,基于灰度加权 and 距离加权的双边滤波,大幅度提高了去噪效果^[14];基于同态滤波的相位滤波方法,可以增强图像的对比度^[15];基于伽博(Gabor)滤波的散斑相位图平滑方法,能够有效保留相位图的条纹结构^[16]。

虽然这些相位滤波方法可以有效滤除相位图中的散斑噪声,但都存在一个问题,即无法对滤波效果进行定量分析,无法判断所需的滤波次数。因此出现各种对滤波效果进行评价的定量评价指标。例如反映噪声抑制能力的散斑指数^[17]、反映图像信息保持能力的保真度^[14]、峰值信噪比、结构相似性等。这些图像客观评价指标能够较好地评估滤波后图像的噪声水平和失真度,在滤波算法的比较实验中被广泛使用。但这些指标只反映相位与噪声分布的一个方面,或是需要对参考值和测量值进行计算和对比,对于缺少参考值,要求计算速度的单一图像持续滤波过程中的判断并不适用,难以实现滤波处理过程的自动化,造成散斑干涉软件系统实用性降低。

为了实现对单一图像持续滤波的定量分析,通过对散斑相位图相位分布的分析,本文提出了

一种基于平滑样条拟合的滤波评价方法,该方法对包裹相位图的相位分布进行平滑样条拟合(Smoothing Spline)^[18],并通过拟合结果的均方根误差(Root-Mean-Square Error, E_{RMS})来表征滤波处理结果的好坏,数据具有一定的规律性,可以用来判断持续滤波过程中图像的滤波处理是否完成,实现自动滤波。

2 基本原理

对散斑相位图的滤波相当于一种平滑技术,直观反映在图像上为相位图像在 $0 \sim 255$ 灰度值之间变化的平滑度,使其在灰度变化上消除孤立的噪声点,更接近于真实数据。被测物的相位信息及噪声均包含在图像的条纹部分,取散斑相位图中条纹部分的对角线,其经过所有条纹及其灰度值跳变处,可以直观地反映该幅图像的灰度分布情况。对同一张散斑相位图进行随机直线采样的结果比对也验证了对角线截面上的相位分布可以表征图像的灰度分布情况。图1(a)为数字散斑干涉测量实验中利用时间相移技术得到的原始包裹相位图,可以看出图中存在着大量的散斑噪声。图1(b)为图1(a)条纹部分对角线截面上的相位分布图,同样存在大量的噪声干扰。图1(c)为对图1(a)滤波后的结果。图1(d)为图1(c)条纹部分对角线截面上的相位分布图,可以直观地看出经过10次正余弦滤波后,在保留条纹间跳变信息的基础上,对散斑噪声有很好的抑制效果。因此本文的评价方法是以相位图条纹部分对角线截面上的相位分布为基础对图像的滤波情况进行评估。

具体步骤如下,首先对相位分布图进行拟合处理。进行拟合处理的目的是为了表征相位图的灰度数据分布情况,将相位分布情况转化为数据拟合结果的参数值。判断图像滤波效果的条件主要有两点:一是条纹间的跳变信息的保留情况,这决定了解包裹处理中对条纹级数的判断;二是各个条纹跳变点之间的散斑噪声抑制情况,这决定了解包裹处理的结果与精度。基于包裹相位图的特点,文中选择平滑样条拟合对相位分布图进行拟合。与其他拟合样条相比,该拟合样条能够满足对相位分布图中峰值信息和散斑噪声信息的准确拟合,其中拟合方程的确定系数 R^2 接近于1,表示该拟合方程对 y 方向上变量的解释能力很强,拟合样条所构筑的模型对数据有很好的拟合效果。平滑样条拟合的函数公式为

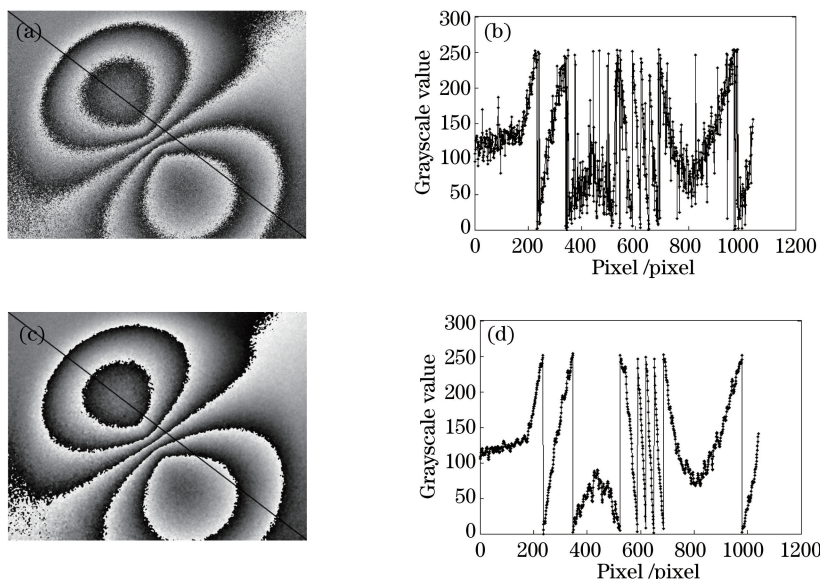


图 1 滤波前后相位图和相位分布。(a)原始包裹相位图;(b)原始包裹相位图对角线截面上的相位分布;
(c)滤波后的包裹相位图;(d)滤波后相位图对角线截面上的相位分布

Fig. 1 Phase map and phase distribution before and after filtering. (a) Original wrapped phase map;
(b) phase distribution on the diagonal section of the original wrapped phase map; (c) filtered wrapped phase map;
(d) phase distribution on the diagonal section of the filtered wrapped phase map

$$p \sum_i w_i [y_i - s(x_i)]^2 + (1 - p) \int \left(\frac{d^2 s}{dx^2} \right) dx, \quad (1)$$

式中: p 为平滑参数,定义在 $[0, 1]$ 之间,当 p 为 0 时,提供的是最小二乘直线拟合的数据;当 p 为 1 时,提供的是三次样条插值拟合的数据。 p 值的有趣范围(intresting range)接近于 $1/(1+h^3/6)$,认为 p 在该范围附近的取值更适用于数据点的拟合, h 为数据点的平均间距,以 $h=1$ 计算,得到有趣范围的值约为 0.857,因此本文所有计算设定 $p=0.9$ 。 w_i 为数据点的权重,默认为 1。 s 为平滑样条拟合的函数,选择 s 使(1)式的值为最小。

以图 1(a)的散斑相位图为例,分别对图 1(b)和

图 1(d)的相位分布图进行平滑样条拟合,得到灰度值数据分布和相应的拟合方程曲线,如图 2(a)和 2(b)所示。可以看出图 2(a)的相位分布中存在着大量的散斑噪声,拟合函数无法很好地对数据进行拟合,在拟合过程中,有很多的数据点被判断为误差点,预测值与原始的数据值之间的误差很大;而在图 2(b)中,预测值与原始值之间的误差很小,拟合函数的曲线走向可以涵盖原有的数据值。因此,以预测值与原始值之间的误差即均方根误差作为拟合结果的评价参数,进行平滑样条拟合后,对相位分布图的拟合结果计算均方根误差值。均方根误差的计算公式为

$$E_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - y)^2}。 \quad (2)$$

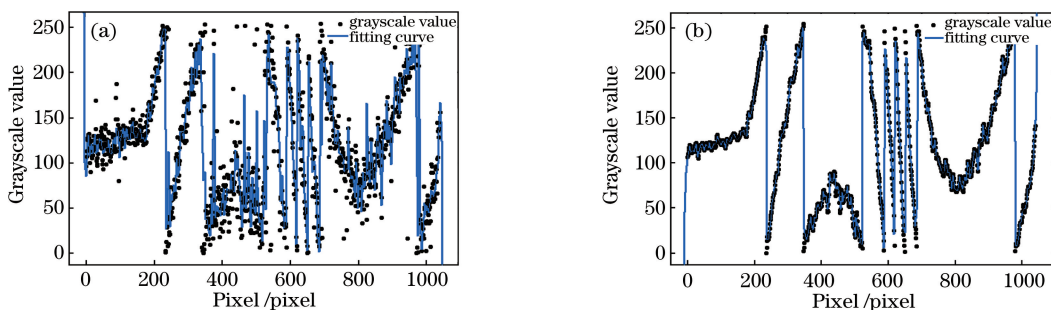


图 2 拟合结果。(a)原始包裹相位图相位分布的拟合结果;(b)滤波后相位图相位分布的拟合结果
Fig. 2 Fitting results. (a) Fitting result of phase distribution of the original wrapped phase map;
(b) fitting result of phase distribution of the filtered wrapped phase map

由于均方根误差表示图像的滤波效果,其数据在单一图像的持续滤波过程表现出一定的规律,可以用来判断图像的滤波处理是否完成。随着图像滤波次数的增加,每次滤波运算所滤除的噪点越来越少,所以认为均方根误差值逐渐减小且趋于平缓。对图 1(a)进行 10 次正余弦滤波,分别计算每次滤波后相位图的均方根误差,作折线图如图 3 所示,其中,横坐标的每个数据点表示滤波次数,纵坐标表示对应滤波次数的相位图计算得到的均方根误差。从图 3 中可以直观地看出随着滤波次数的增加,均方根误差逐渐减小,最后趋于固定数值。

根据均方根误差数据走向规律判断图像是否滤

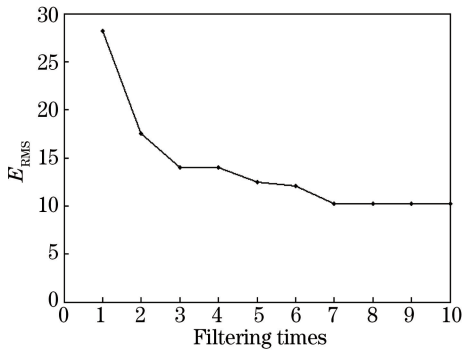


图 3 均方根误差折线图

Fig. 3 Line chart of RMSE

波完成。如图 3 所示,在折线的前半段,均方根误差数值下降明显,此时对图像的滤波处理没有完成,每次滤波还能滤除大量的噪声,需要对图像继续进行滤波。而在折线的后半段,均方根误差数值没有太大的变化,此时滤波处理对相位图中噪声的抑制效果不明显,对图像进行滤波的效率很低。因此,基于减少滤波次数、提高滤波效率的考虑,假定均方根误差处于平台阶段所对应的相位图滤波完成,对前后幅图像的 RMSE 数值进行相减判断,并用 d 表示为

$$d = E_{i+1} - E_i, \quad (3)$$

判断 d 是否小于数据处于平台阶段的波动幅度,得到该幅图像滤波完成的相位图,便可实现对该幅散斑相位图的自动滤波。

3 实验结果

为验证本文提出的基于平滑样条拟合的滤波评价方法的有效性和普适性,分别选取数字散斑干涉测量实验中获取的具有代表性的实验图像进行实验。如图 4 所示,实验图像包括全幅不同角度的蝴蝶斑条纹图 4(a)、4(b),全幅的圆条纹图 4(c),局部的散斑条纹图 4(d),大视场下的全幅圆条纹图 4(e)和多个缺陷试样测量的条纹图 4(f)。

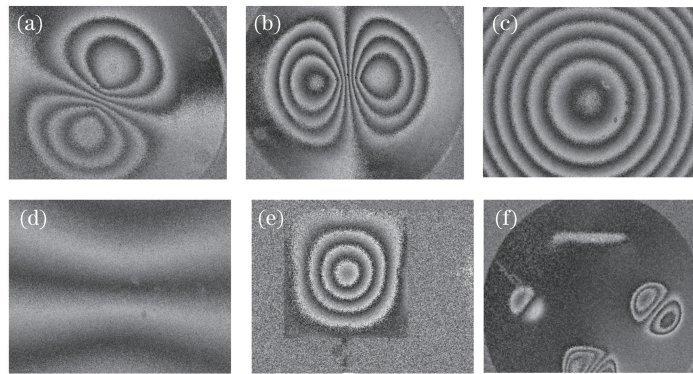


图 4 实验图像。(a)全幅的蝴蝶斑条纹图 1;(b)全幅的蝴蝶斑条纹图 2;(c)全幅的圆条纹图;(d)局部的散斑条纹图;(e)大视场下的全幅圆条纹图;(f)多个缺陷试样测量的条纹图

Fig. 4 Experimental images. (a) Full width butterfly fringe pattern 1; (b) full width butterfly fringe pattern 2; (c) full width circle fringe pattern; (d) local speckle fringe pattern; (e) full width circle fringe pattern under the wide field; (f) fringe pattern of sample with multiple defects

分别对图 4 各幅原始散斑相位图进行滤波处理,算法选用正余弦滤波算法,滤波窗口大小为 3×3 。该滤波算法对相位图中的离散噪声、灰度值连续变化处的噪声以及跳变处的噪声均有较好的滤波效果,在相位图的滤波处理中得到广泛应用。正余弦滤波的映射转换公式为

$$g_1(i, j) = \{\sin[g(i, j) \times 2\pi/255] + 1\} \times 255/2, \quad (4)$$

$$g_2(i, j) = \{\cos[g(i, j) \times 2\pi/255] + 1\} \times 255/2, \quad (5)$$

式中: $g(i, j)$ 为原始灰度值; $g_1(i, j)$ 为转换后的正弦灰度值; $g_2(i, j)$ 为转换后的余弦灰度值。

在每次滤波后,使用本文方法对滤波后相位图进行计算。首先对散斑相位图进行一次正余弦滤波,然后确定相位图中的条纹部分,该部分包含有用的相位信息,取该部分对角线上各像素点的灰度值作相位分布图。然后利用(1)式和(2)式对相位分布图进行拟合和计算均方根误差,得到该次滤波后图像的均方根误差值。重复以上过程,得到该幅图像

持续滤波过程中各滤波图像的均方根误差值作折线图如图 5 所示。图中横坐标均为滤波次数,纵坐标为均方根误差值。从图 5 可以看出,对于不同的实验图像,均方根误差的具体数值不同,但其数据走向具有明显的规律性,并且从图中可以看出,随着滤波次数的增加,数据曲线均趋于平缓,具有明显的平台阶段,与理论一致。

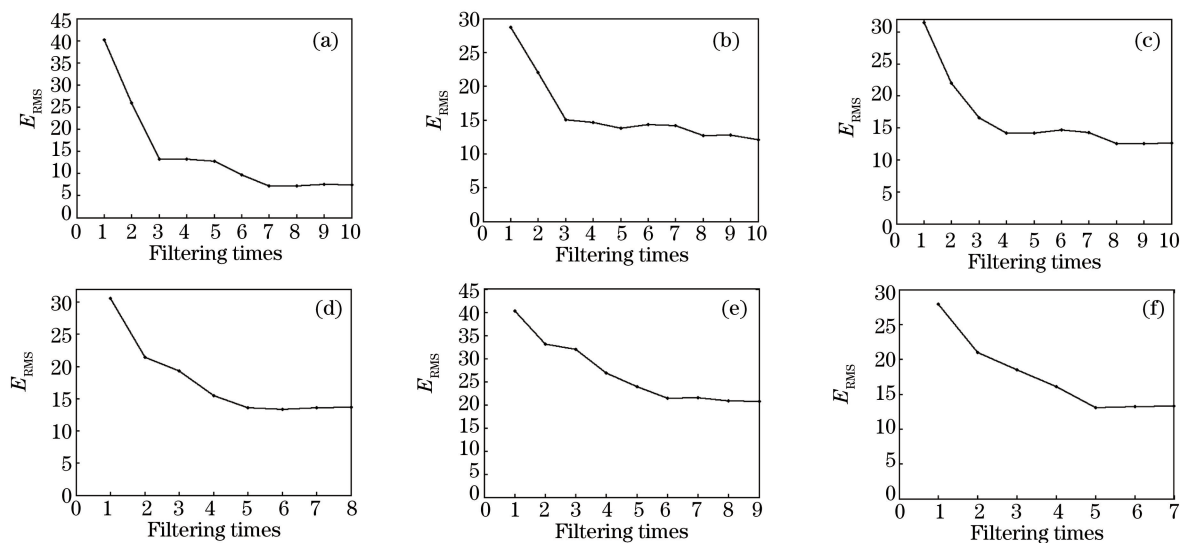


图 5 均方根误差折线图。(a)~(f)分别为对应图 4 实验图像的均方根误差折线图

Fig. 5 Line charts of E_{RMS} . (a)-(f) Line charts of E_{RMS} of the experimental images in Fig. 4

为得到均方根误差在平台阶段的波动幅度,取数字散斑干涉测量实验中各个状态下的散斑相位图共 30 张,用本文方法对其进行计算处理。分析 30 张图像的均方根误差折线,其进入平台阶段的差值数据分布如图 6 所示。

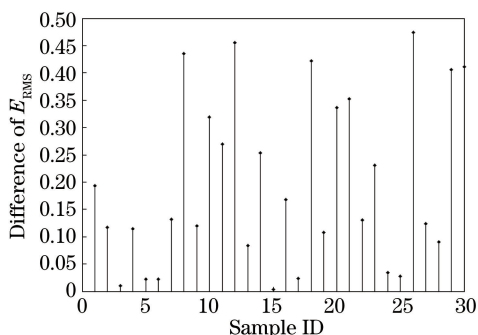


图 6 均方根误差差值数据分布

Fig. 6 Differential data distribution of E_{RMS}

取均方根误差值平台阶段的波动幅度为 0.5。每对图像进行一次滤波,计算前后两次滤波图像均方根误差数值的差值,判断其差值是否小于波动幅度,从而判断图 4 的各原始散斑相位图是否滤波完成,得到各幅图像滤波完成的包裹相位图如图 7 所

示。其中各相位图的滤波次数分别为 3 次、3 次、4 次、5 次、6 次、5 次。从图中可以看出各图像的滤波效果较好,与原始散斑相位图相比,噪声较少且斑点较小,灰度值跃变处的噪声减少,有利于解包裹的运算处理。其中,图 7(d)的条纹边缘处仍含有较多的散斑噪声,但判定其后续滤波的效率较差,即对图像继续进行滤波处理对得到的解包裹图像的影响不大,因此选择图 7(d)作为滤波完成图像。

为进一步验证本文方法对散斑相位图滤波处理情况判断的准确性,对图 7 中的图像进行解包裹处理,算法选用基于可靠度排序的非连续路径算法^[19],解包图像如图 8 所示。从图中可以看出,各图像的条纹部分的解包图像平滑,细节清晰,没有出现计算错误的区域。对滤波相位图的解包处理进一步说明了图 7 中的图像滤波效果较好,噪声较少,对于大部分情况下的散斑干涉实验图像,本文提出的方法能够表征单次滤波处理的效果,判断持续滤波中的滤波完成情况,充分说明了该滤波评价方法的有效性和普适性。所提出的评价参数可以为现有的大部分相位滤波方法的效果提供参考指标,当其对滤波效果的表征不尽理想时,还需研究其他的噪声来源及其表现形式。

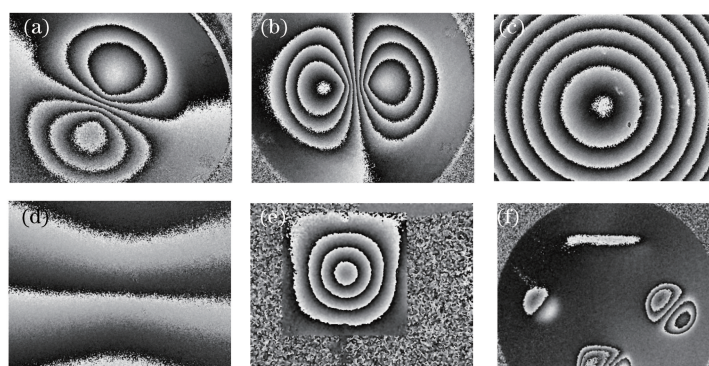


图 7 滤波完成图像。(a)~(f)分别为对应图 4 实验图像的滤波完成图像

Fig. 7 Filtering completed images. (a)-(f) Filtering completed images of the experimental images in Fig. 4

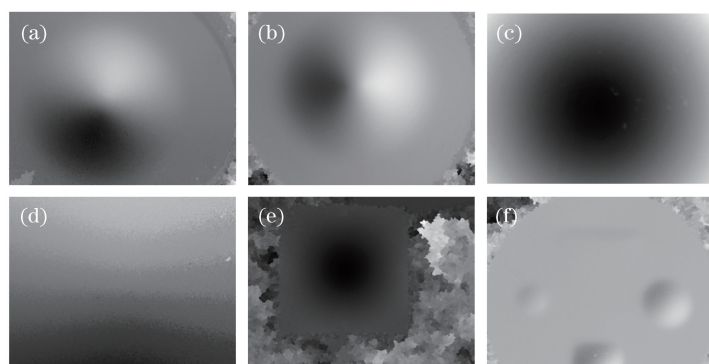


图 8 解包裹相位图。(a)~(f)分别为对应图 4 实验图像的解包裹相位图

Fig. 8 Unwrapping phase maps. (a)-(f) Unwrapping phase maps of the experimental images in Fig. 4

4 结 论

针对散斑相位图的处理,现有的干涉条纹滤波评价参数只适用于不同滤波方法之间的横向比较,不适用于单一图像持续滤波过程中的评价,本文提出了对滤波过程中相位图的相位分布进行平滑样条拟合并计算其均方根误差的滤波评价方法。该方法不仅能够表征滤波的效果,也能自动判断图像是否滤波完成,对于相位图的角度及视场大小没有很高的要求,不论是局部还是整体条纹的相位图都能得到较好的实验结果。该滤波评价方法可用于实现散斑图像处理过程中滤波环节的自动化,对于提高散斑干涉系统的实用化和软件的易用性具有一定的应用价值。

参 考 文 献

- [1] Leendertz J A. Interferometric displacement measurement on scattering surfaces utilizing speckle effect [J]. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, 1970, 3(3): 214-218.
- [2] Ratnam M M, Evans T W. Measurement of thermal expansion of a piston using holographic and electronic speckle pattern interferometry [J]. *Optical Engineering*, 1992, 29(1): 61-69.
- [3] Ganesan A R, Joenathan C, Sirohi R S. Real-time comparative digital speckle pattern interferometry [J]. *Optics Communications*, 1987, 64(6): 501-506.
- [4] Wang Y H, Liang H, Wang S, *et al.* Advance in digital speckle correlation method and its applications [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(4): 470-480.
王永红, 梁恒, 王硕, 等. 数字散斑相关方法及应用进展[J]. *中国光学*, 2013, 6(4): 470-480.
- [5] Lin H, Gao J, Mei Q, *et al.* Adaptive digital fringe projection technique for high dynamic range three-dimensional shape measurement[J]. *Optics Express*, 2016, 24(7): 7703-7718.
- [6] Zhu R G, Zhu R H, He Y. A fast phase extraction algorithm with one-step π phase-shifting [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(6): 0612003.
朱荣刚, 朱日宏, 何勇. 一种一步 π 移相相位快速提取算法[J]. *光学学报*, 2016, 36(6): 0612003.
- [7] Jin G C. *Computer-aided optical metrology*[M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2007: 58-69.
金观昌. *计算机辅助光学测量*[M]. 2版. 北京: 清华大学出版社, 2007: 58-69.

- [8] Fu S H, Yu Q F. Filtering methods of the digital speckle fringe pattern[J]. Journal of Applied Optics, 2005, 26(4): 5-8.
伏思华, 于起峰. 数字散斑条纹图的滤波方法[J]. 应用光学, 2005, 26(4): 5-8.
- [9] Aebischer H A, Waldner S. A simple and effective method for filtering speckle-interferometric phase fringe patterns [J]. Optics Communications, 1999, 162(4/5/6): 205-210.
- [10] Jiang H Y, Dai M L, Su Z L, *et al.* An adaptive Sine/Cosine filtering algorithm based on speckle phase fringe orientation [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(9): 0910001.
蒋汉阳, 戴美玲, 苏志龙, 等. 基于散斑相位条纹方向的自适应正弦/余弦滤波[J]. 光学学报, 2017, 37(9): 0910001.
- [11] Yu Q F, Liu X L, Andresen K. New spin filters for interferometric fringe patterns and grating patterns [J]. Applied Optics, 1994, 33(17): 3705-3711.
- [12] Yu Q F, Sun X Y, Liu X L, *et al.* Spin filtering with curve windows for interferometric fringe patterns[J]. Applied Optics, 2002, 41(14): 2650-2654.
- [13] Yu Q F, Yang X, Fu S H, *et al.* Two improved algorithms with which to obtain contoured windows for fringe patterns generated by electronic speckle-pattern interferometry[J]. Applied Optics, 2005, 44(33): 7050-7054.
- [14] Ruiz P D, Kaufmann G H. Evaluation of a scale-space filter for speckle noise reduction in electronic speckle pattern interferometry [J]. Optical Engineering, 1998, 37(8): 2395-2401.
- [15] Gu G Q, Wang K F, Yan X J. Electronic speckle interferometry image processing based on homomorphic filtering[J]. Laser Technology, 2010, 34(6): 750-752, 797.
顾国庆, 王开福, 燕新九. 基于同态滤波的电子散斑干涉图像处理[J]. 激光技术, 2010, 34(6): 750-752, 797.
- [16] Li K, Zhang Q C. Speckle fringe pattern smoothing method based on Gabor filtering [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(10): 2751-2755.
李凯, 张青川. 基于 Gabor 滤波的散斑条纹图平滑方法[J]. 光学学报, 2009, 29(10): 2751-2755.
- [17] Dewaele P, Wambaccq P, Osterlinck A, *et al.* Comparison of some speckle reduction techniques for SAR images [C] // Proceedings of the 10th Annual International Geoscience and Remote Sensing Symposium, College Park, Maryland, USA. New York: IEEE, 1990: 2417-2422.
- [18] Hu H P, Fang Z B. Research on improving smoothing spline method to fit China's term structure of interest rates[J]. Journal of Management Sciences in China, 2009, 12(1): 101-111.
胡海鹏, 方兆本. 中国利率期限结构平滑样条拟合改进研究[J]. 管理科学学报, 2009, 12(1): 101-111.
- [19] He G H, Li S T, Wang M L, *et al.* Phase unwrapping algorithm based on reliability[J]. Laser Journal, 2012, 33(3): 25-26.
何光宏, 礼四同, 王茂林, 等. 可靠度导引的相位解包裹算法[J]. 激光杂志, 2012, 33(3): 25-26.