

散斑干涉条纹区域的自动提取

吴双乐, 胡慧然, 钟诗民, 孙方圆, 赵琪涵, 王永红*

合肥工业大学仪器科学与光电工程学院, 安徽 合肥 230009

摘要 根据干涉条纹区域的特征, 对比了多种常规的边缘检测方法, 提出了一种基于二阶梯度熵函数的散斑干涉条纹区域自动提取的判定函数, 并通过分析不同的散斑干涉条纹图片, 确定了最佳的检验子区域熵的尺寸区间以及不同干涉条纹图中的自适应阈值区间, 最终通过连通区域分割完成对条纹区域的自动提取。对所提方法进行实验验证, 结果表明: 子区域熵尺寸取 15 pixel 以上时, 图片熵值的计算更准确; 自适应阈值在 $[0, Q_{\max} - 1.25]$ 中取值时 (Q_{\max} 为图中最大梯度熵值), 可以将干涉条纹区域与散斑背景区域有效分割, 实现对散斑干涉条纹区域的自动提取。

关键词 测量; 散斑干涉; 干涉条纹区域; 二阶梯度熵; 自适应阈值

中图分类号 TP391.4

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.1212004

Automatic Extraction of Speckle Interference Fringe Regions

Wu Shuangle, Hu Huiran, Zhong Shimin, Sun Fangyuan,

Zhao Qihan, Wang Yonghong*

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

Abstract According to the characteristics of interference fringe region and compared with many conventional edge detection methods, a judgment function is proposed for the automatic extraction of speckle interference fringe regions based on second-order gradient entropy functions. By analyzing different speckle interference fringe images, an optimum entropy size interval of a test sub-region and adaptive threshold intervals of different interference fringe patterns are determined. The automatic extraction of the stripe region is finally completed through connected region segmentation. The method is validated experimentally. Experimental results show that more accurate image entropy is obtained when the size of sub-region entropy is above 15 pixel. The fringe region and speckle background region can be segmented accurately when the adaptive threshold is within a range of 0 to $Q_{\max} - 1.25$, where Q_{\max} is the maximum gradient entropy in the image, thereby achieving automatic extraction of the speckle interference fringe region.

Key words measurement; speckle interferometry; interference fringe region; second-order gradient entropy; adaptive threshold

OCIS codes 120.6165; 100.2960; 100.3008

1 引 言

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, 具有非接触、全场、高精度等特点, 近年来被广泛应用于检测物体的振动、位移、形变等^[1-3]。散斑干涉测量的基本原理如下: 激光器生成的激光光束在被测物表面发生漫反射, 产生干涉现象, 由光电探测器采集被测物变形前后

的散斑干涉图像, 然后提取被测物的相位信息^[4-7]。利用散斑干涉技术对静态问题求解时常优先选用相移法, 即通过多个方程解得包含物体变形信息的相位值。虽然光流法也可以获取物体表面的运动和形变信息, 但由于该方法将相邻图像间的运动近似为线性且灰度短期内保持不变, 当特征点纹理发生较大变化时跟踪效果不理想^[8-9], 从而导致光流法相比于相移法产生的误差更大, 因此应选用相移技术来

收稿日期: 2019-06-21; 修回日期: 2019-08-08; 录用日期: 2019-08-20

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFF0101803)、国家自然科学基金(51805137)、安徽自然科学基金(1808085QE129)

* E-mail: yhwang@hfut.edu.cn

获取相位图。然而通过相移法解得的散斑包裹相位图中含有大量噪声,这为后续相位的连续化带来了不便。在实际应用中,通常先对包裹相位图进行滤波,降低噪声,然后再进行解包裹^[10-11]。

在散斑干涉实验中,干涉条纹图往往只占据相机拍摄图像的一部分区域,然而散斑背景区域却占据了较大比例。采用程序对干涉条纹图像进行处理时,图像的大小与计算时间息息相关。背景区域的存在使得条纹图像的每一次处理时间成本较大,计算效率较低。一直以来,国内外学者都是通过手动选取干涉条纹区域,这样可以减少计算时间并使计算结果更准确。然而,在面对大量测量图片时,手动选取条纹区域无疑增加了时间和人工成本。此外,虽然路径相关解包裹算法^[12]的计算速度较快,但易受背景区域的影响而出现解调错误^[13]。近年来,诸多学者致力于研究路径无关算法等解包裹算法^[14-15],目的是使解包裹结果不受或少受背景区域的影响。但是,这些新型的解包裹算法往往包含大量复杂的计算,在对包裹相位图进行处理时需要耗费大量的时间。因此,研究一种可在散斑干涉条纹图中自动提取条纹区域的方法显得尤为重要,这对于提高散斑干涉测量的精度和自动化水平也具有重要意义。

为了实现散斑干涉条纹图中条纹区域的自动提取,本文分析条纹区域的特征,参考常用的边缘检测算法,运用二阶梯度函数和自适应阈值实现了条纹区域的检测判别,并根据设定的连通区获得真正的条纹区域。最后,通过几组不同形状被测物的散斑干涉条纹图来验证该方法的有效性。

2 基本原理

2.1 预处理

散斑干涉条纹区域的自动提取相当于一种特征提取技术,干涉条纹区域具有以下三个明显特征:1)干涉条纹区域内像素点附近子区的灰度值梯度大;2)干涉条纹区域内最大灰度值与最小灰度值之差较大,在图像上该特征表现为条纹对比度明显,并具有随机的灰度分布;3)散斑干涉条纹区域内的点构成的区域具有连通性,即符合前两个特征的像素点并不是孤立的点,在其周围必定有相似的像素点。利用上述三个特征,可以将背景区域与条纹区域进行分割。

在特征提取技术中,目前常用的边缘检测算法主要分为三类:一阶梯度算子、二阶梯度算子和多阶检测算子^[16],代表类型分别为 Sobel 算子、Laplacian

算子与 Canny 算子等^[17]。通过分析条纹区域的特征不难发现,条纹区域内的灰度变化曲线十分明显,对边缘检测算子都较为敏感,所以不能直接通过边缘检测算子对散斑区域进行分割。

采用三种边缘检测算子对图 1(a)中的散斑干涉条纹图进行检测,结果如图 1(b)~(d)所示。一阶梯度算子不能很好地提取出各阶条纹边缘,如图 1(b)所示,这会对后续的计算处理产生较大影响;对于多阶检测的 Canny 算子,如图 1(c)所示,通过调节高阈值与低阈值能很好地提取出各阶条纹的边缘,但是由于该算子对边缘过于敏感,各阶条纹之间的一些伪边缘也被检测出来,从而削弱了条纹区域的特征;二阶梯度算子(Laplacian 算子)可以很好地提取出各阶条纹,如图 1(d)所示,使条纹与背景区域特征较大程度地区分开来,并将图片灰度值转为梯度值,适合用作干涉条纹区域提取前的预处理。

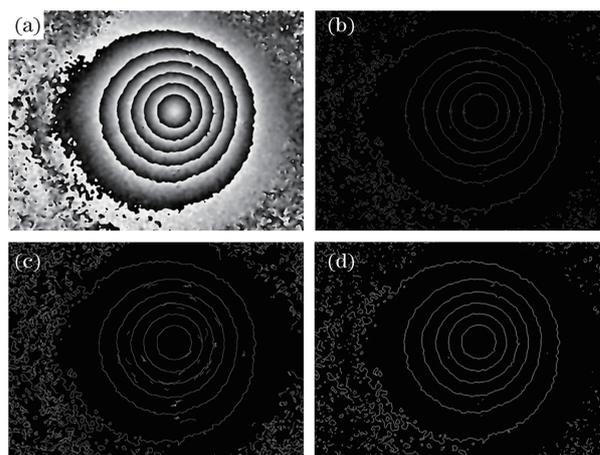


图 1 几种边缘检测算子检测结果对比。(a)原始图像; (b) Sobel 检测结果; (c) Canny 检测结果; (d) Laplacian 检测结果

Fig. 1 Comparison of detection results of several edge detection operators. (a) Original image; (b) Sobel detection result; (c) Canny detection result; (d) Laplacian detection result

本文采用二阶梯度算子 Laplacian 算子处理散斑干涉条纹图像,以保留条纹区域的特征,并将之与背景有效区域分开。对于连续可微的图像灰度函数 $f(x, y)$,其 Laplacian 图像 $g(x, y)$ 定义为

$$g(x, y) = \frac{\partial^2 f(x, y)}{\partial^2 x} + \frac{\partial^2 f(x, y)}{\partial^2 y}, \quad (1)$$

在数字图像中,图像像素点以离散形式表达为

$$g(x, y) = \left| f(x+1, y) + f(x-1, y) + f(x, y+1) + f(x, y-1) - 4f(x, y) \right|, \quad (2)$$

式中： (x, y) 为像素点坐标； $f(x, y)$ 为像素点 (x, y) 处的灰度函数； $g(x, y)$ 为图像经 Laplacian 算子预处理后重新赋予的灰度函数。从上述表达式可以看出，如果图像中某像素点处的灰度值与其相邻像素点灰度值均值之差越大，则该像素点处的灰度值越大；反之，则越小。所以，采用 Laplacian 算子对图像进行预处理可以较好地保留图像边缘和灰度值跳跃较大的区域。如图 2 所示，在散斑背景区域和散斑干涉条纹区域分别任取一部分，统计其经 Laplacian 变换前后的灰度分布直方图。可以看出：在对图像进行 Laplacian 变换前，背景区域和条纹区域的灰度分布均能覆盖 $[0, 255]$ ，且分布较为平稳；经过 Laplacian 变换后，背景区域的灰度分布为 $0 \sim 80$ 和 $230 \sim 255$ ，保留了原先灰度分布的 40%，而条纹区域的灰度分布只剩下不足原先的 10%。因此，利用该算子对散斑干涉条纹图像进行预处理，可以较大程度地将背景区域与条纹区域灰度分布区分开。

2.2 二阶梯度熵

Laplacian 变换后干涉条纹区域较其他区域的灰度分布更少，所包含的信息量更少。在以点 (x, y) 为中心的一定大小的邻域内，利用散斑判定值 $R_s(x, y)$ 与散斑信息量 $I_s(x, y)$ 可以建立数学模型

$$R_s(x, y) = f[I_s(x, y)], \quad (3)$$

并且可以认为 $R_s(x, y)$ 值越小，该点就越符合干涉条纹区域内的点。

为了统计散斑所带信息量的大小，这里引入熵的概念，熵一般表征统计混乱的程度，最先由 Rudolf Clausius 提出，并被应用在热力学中，后来被 Shannon 引入到信息论中。在信息论中，设信源中随机变量为 x_n (n 为随机变量的个数)，其出现的概率为 $p(x_n)$ ，则定义信源的信息熵 E 为^[18]

$$E = \left| \sum_{i=1}^n p(x_i) \lg p(x_i) \right|. \quad (4)$$

熵应用到图像领域时，用来表征统计图像所包含的信息量的大小。对于一幅 8 位的 BMP 图片，设灰度值 i 出现的概率为 ρ_i ，则图像的信息熵 H 为

$$H = \left| \sum_{i=0}^{255} \rho_i \lg \rho_i \right|, \quad (5)$$

(5) 式反映了图片平均信息量的大小，对于纯黑或纯白的图片，信息熵的值为 0，可认为图片所带信息量很小。当灰度直方图平稳时，即图片中灰度值出现的概率都相等，那么信息熵的值就相对较大，可认为

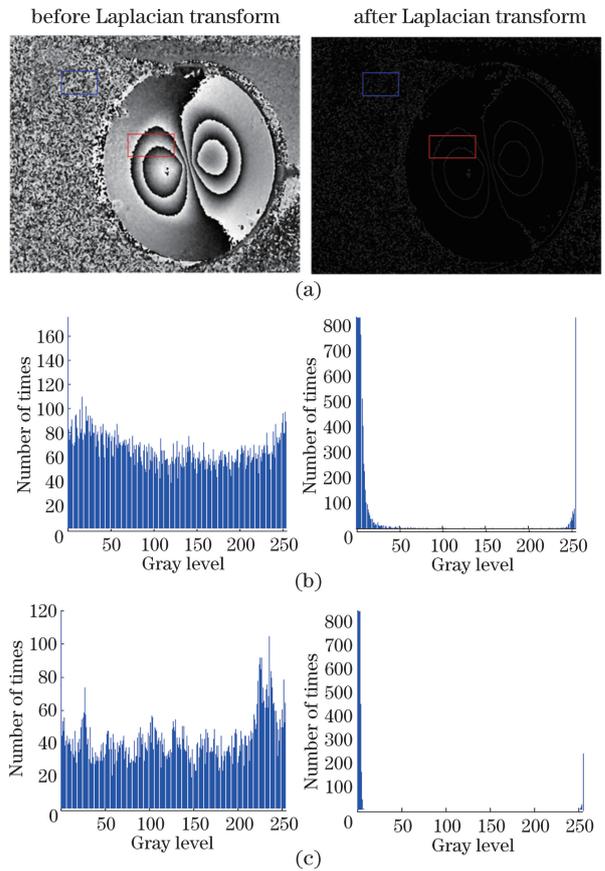


图 2 Laplacian 变换前后的灰度直方图。(a) 干涉条纹图；(b) 散斑背景区域直方图；(c) 散斑干涉条纹区域直方图

Fig. 2 Gray histograms before and after Laplacian transformation. (a) Interference fringes; (b) gray histograms of speckle background region; (c) gray histograms of speckle interference fringe region

图片所含信息量较大。

基于灰度分布的图片信息熵函数虽然能很好地统计出图片信息量的大小，但受实验条件影响，背景区域的信息量仍是未知的，因此无法将散斑干涉条纹区域与背景进行有效的分离。考虑到图片信息熵这一缺陷，本文从散斑干涉条纹特征出发，提出了一个适用于干涉条纹特征的函数——二阶梯度熵函数 Q_M ，在消除背景的影响下，用该函数对图片中的条纹区域进行判定。

$$Q_M = \left| \sum_{i=0}^M \sum_{j=0}^M \rho_{\nabla(i,j)} \lg \rho_{\nabla(i,j)} \right|, \quad (6)$$

式中： M 表示检测子区的边长大小； $\rho_{\nabla(i,j)}$ 为当前像素点 (i, j) 的二阶灰度梯度值在 $M \times M$ 大小子区内出现的概率。以 M 大小的子区遍历图片，就可获得图片的二阶梯度熵值 L_Q 序列，其中 Q 为二阶梯度

熵值。

根据得到的二阶梯度熵值序列,找到其中最大的二阶梯度熵 Q_{\max} ,设定干涉条纹所在区域内的熵值为 $[0, Q_{\max} - k]$, k 为常数。当图像中像素点 (x, y) 的二阶梯度熵值 $Q_{(x,y)}$ 处于 $[0, Q_{\max} - k]$ 中时,将该点置为 1,否则置为 0,如此可获得对应的二值化图像 L_b 。以图 2(a)为例,计算其二阶梯度熵,取 k 为 1.25,得到的二值化图像如图 3 所示。

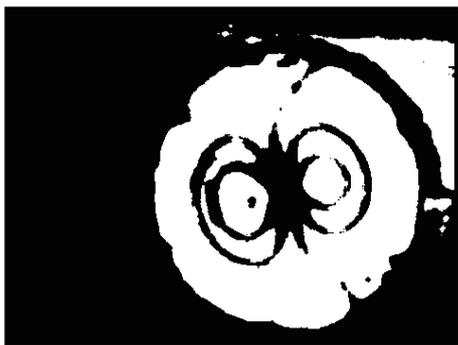


图 3 二阶梯度熵值分割结果
Fig. 3 Segmentation result of second-order gradient entropy

在二值化图片 L_b 中,根据数值 1 所在的区域可获得连通区域的面积数组 $[S_1, S_2, \dots, S_n]$,根据连通区域的面积从大到小排列,若设定条纹区域个数为 N ,则最终散斑干涉条纹所在的区域为 $[S_1, S_2, \dots, S_N]$ 。以图 3 为例,设定条纹区域个数为 1,则提取结果如图 4 所示。对其加以处理并映射到原图就可以得到最终的干涉条纹区域提取结果,如图 5 所示。

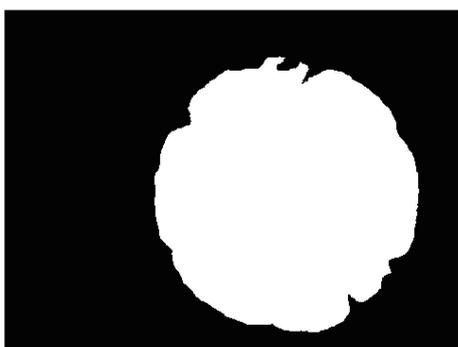


图 4 二值区域提取结果
Fig. 4 Result of binary region extraction

所以,基于二阶梯度熵函数的散斑干涉条纹区域提取算法的流程图可总结为图 6。

3 参数的确定

3.1 检验子区的大小

对于(6)式定义的二阶梯度熵函数,当检验子

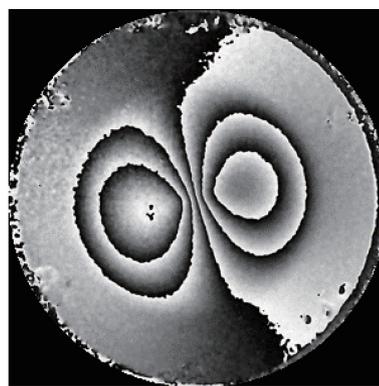


图 5 干涉条纹区域提取结果

Fig. 5 Result of interference fringe region extraction

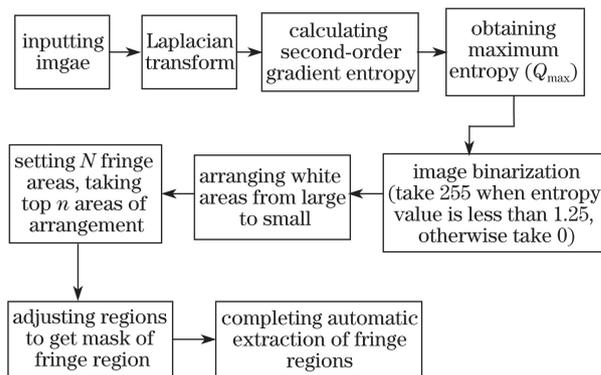


图 6 散斑干涉条纹区域提取算法实现流程图
Fig. 6 Flow chart of algorithm for speckle interference fringe region extraction

区的边长较大时,熵值的判定结果较准确。但如果子区范围过大,就会导致大量的不必要的计算,耗费较多的时间。因此,需要确定一个合适的检验子区大小,使其既能确保计算结果的准确性,又要保证一定的计算速度。本文使用几种典型的散斑干涉条纹图对子区大小进行对比分析,利用二阶梯度熵函数分别对各干涉条纹图进行对比实验。方法如下:使检验子区大小从 1 pixel 逐渐增加至 50 pixel,分别代入公式计算其熵值,得到的结果如图 7 所示。

二阶梯度熵中的三条曲线分别表示相应大小的检验子区在散斑干涉条纹图中对应的二阶梯度熵函数的最大值、最小值以及最大值与最小值的差值(minus)。从图 7 中可以看出,随着检验子区增大,干涉条纹图的熵值逐渐增大,当子区大小超过 15 pixel 时,熵值基本为定值,因此可以将 15 ~ 20 pixel 定义为最优尺寸。直接用信息熵函数计算图 7(a)中干涉条纹图的灰度熵,结果如图 8 所示,并如图 9 所示从条纹和背景区域各选取一部分分别计算其灰度熵和二阶梯度熵值,计算结果如图 10 所

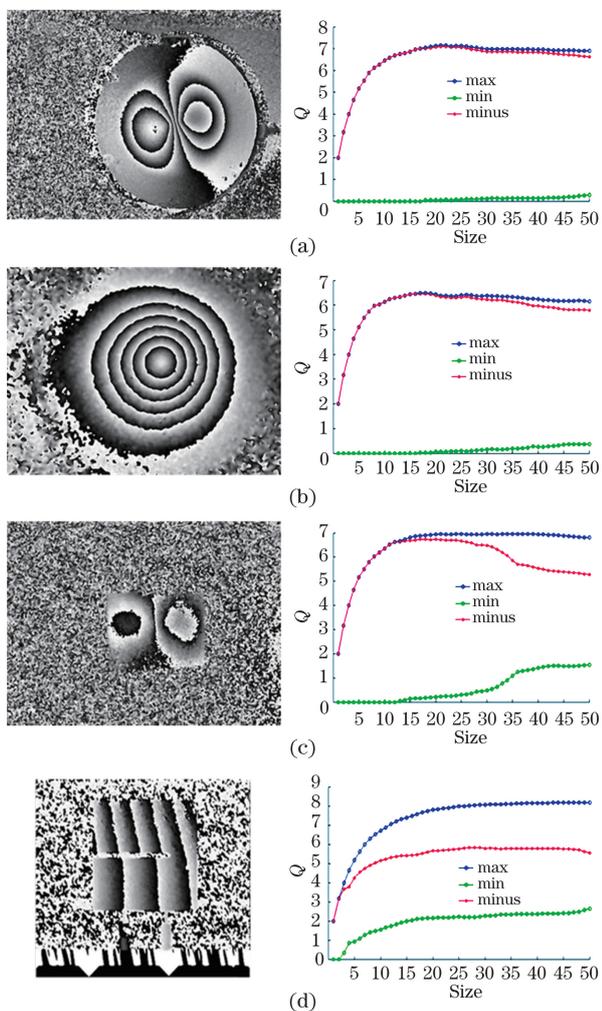


图 7 不同散斑干涉条纹图的二阶梯度熵。(a) 圆形被测物的剪切散斑干涉条纹(左)及其二阶梯度熵(右);(b) 圆形被测物的数字散斑干涉条纹(左)及其二阶梯度熵(右);(c) 矩形被测物的剪切散斑干涉条纹(左)及其二阶梯度熵(右);(d) 矩形带缝被测物的数字散斑干涉条纹(左)及其二阶梯度熵(右)

Fig. 7 Second-order gradient entropies of different speckle interference fringe patterns. (a) Shearography fringes of circular measured object (left) and their second-order gradient entropy (right); (b) digital speckle interference fringes of circular measured object (left) and their second-order gradient entropy (right); (c) shearography fringes of rectangular measured object (left) and their second-order gradient entropy (right); (d) digital speckle interference fringes of rectangular object with slit (left) and their second-order gradient entropy (right)

示。可见,相比于灰度熵,二阶梯度熵函数对条纹区域更敏感,二阶梯度预处理后所得的熵值分布更广,条纹区域与背景区域更易区分。

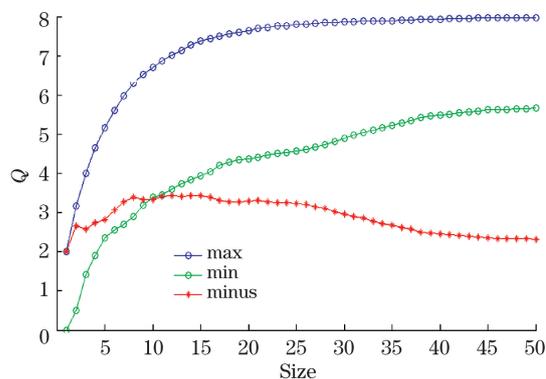


图 8 图 7(a)对应的灰度熵
Fig. 8 Gray entropy corresponding to Fig. 7(a)

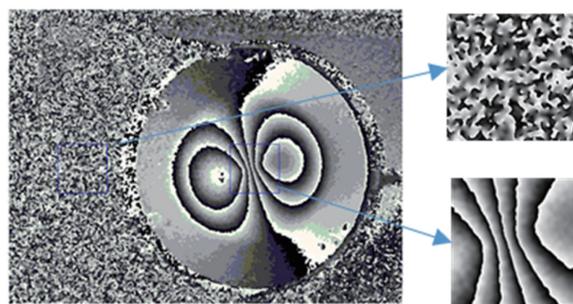


图 9 背景与条纹区域截取结果
Fig. 9 Interception results of background and stripe areas

3.2 自适应阈值的大小

用于二值化判定的自适应阈值的选取决定了干涉条纹区域提取的准确性,为确保自适应阈值选取的正确性,本文通过选取一些经典的干涉条纹图来大致确定阈值的范围,选择的经典条纹图如图 11 所示。

对图 11 所示的干涉条纹区域进行手动选取,获得的干涉条纹区域如图 12 所示。

令二阶梯度熵检验子区大小为 16,遍历图 11、12 中的每幅图片,获取图 11 中二阶梯度熵的最大值 $Max_1(Q)$ 以及图 12 中二阶梯度熵的最大值 $Max_2(Q)$ 、最小值 $Min(Q)$ 、均值 $Avg(Q)$,以及前后对应的两最大值的差值 $Diff(max)$,结果如表 1、2 所示。

表 1、2 中最后一列为各行数据的平均值。可以看出,虽然对于不同的散斑干涉条纹图,求得的二阶梯度熵值处于不同的区间,但对于每一幅图来说,条纹区域的最大熵值与整幅干涉条纹图的最大熵值相差均为 1.25 左右。另外,表 2 中干涉条纹区域熵值的均值和最小值均较小,说明上文所提出的利用 Laplacian 算子对干涉条纹图进行预处理,以使干涉条纹区域包含更少的信息量的方法是有效的。假设

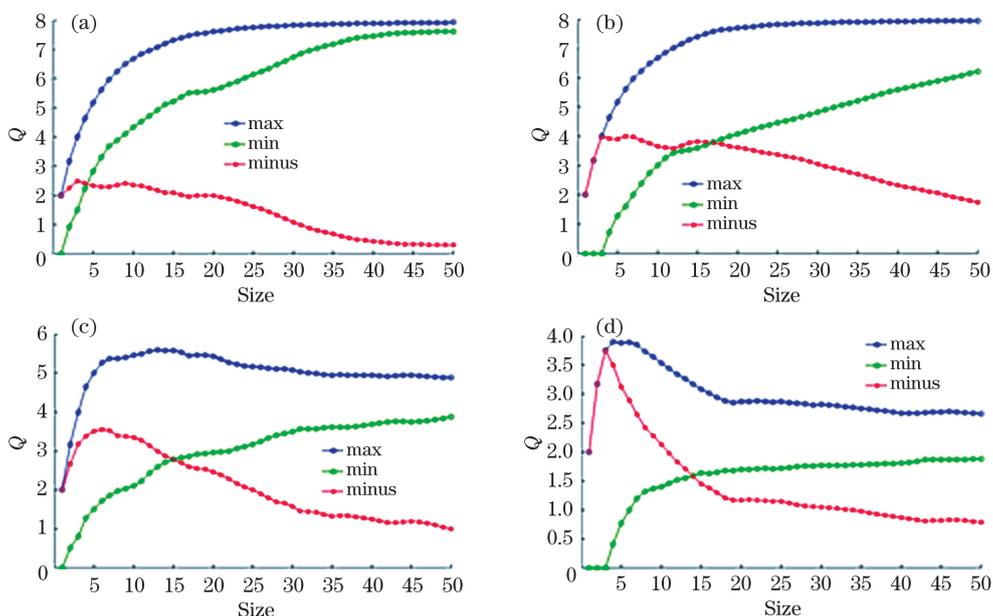


图 10 背景区域与条纹区域的对比验证结果。(a)背景区域的灰度熵;(b)条纹区域的灰度熵;
(c)背景区域的二级梯度熵;(d)条纹区域的二阶梯度熵

Fig. 10 Verification results of fringe region and background region. (a) Gray entropy of background region; (b) gray entropy of fringe region; (c) second-order gradient entropy of background region; (d) second-order gradient entropy of fringe region

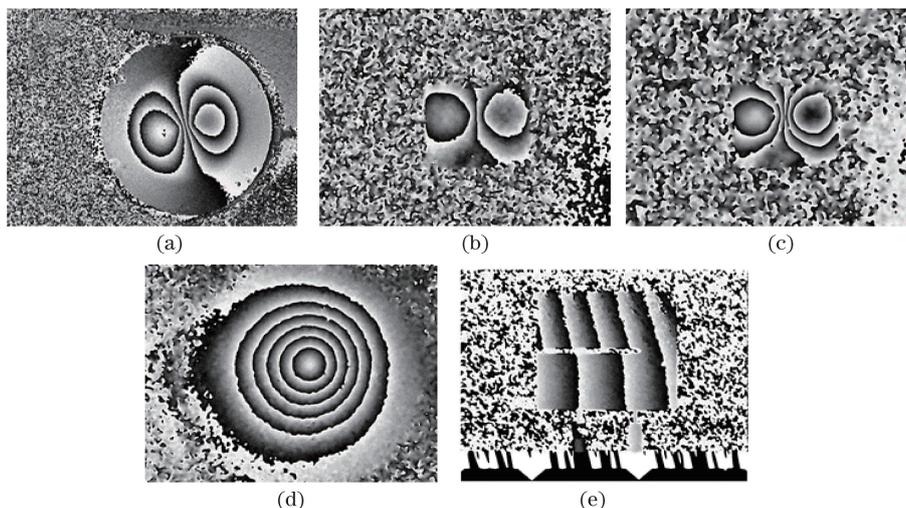


图 11 经典干涉条纹图。(a)~(c)不同形状被测物的剪切散斑干涉条纹;
(d)~(e)不同形状被测物的数字散斑干涉条纹

Fig. 11 Classical interference fringe patterns. (a)-(c) Shearography fringes of objects with different shapes;
(d)-(e) digital speckle interference fringes of objects with different shapes

散斑干涉条纹图的最大二阶梯度熵值为 Q_{\max} , 在本文的后续实验中, 将自适应阈值取为 $Q_{\max} - 1.25$, 则可认为二阶梯度熵值在 $[0, Q_{\max} - 1.25]$ 之间的点即为条纹区域内的点。

表 1 图 11 对应的二阶梯度熵值

Table 1 Second-order gradient entropy corresponding to Fig. 11

Parameter	Gradient entropy					Average
	Fig. 11(a)	Fig. 11(b)	Fig. 11(c)	Fig. 11 (d)	Fig. 11(e)	
Max ₁ (Q)	6.8629	6.3655	5.598	6.1225	6.9419	6.3782

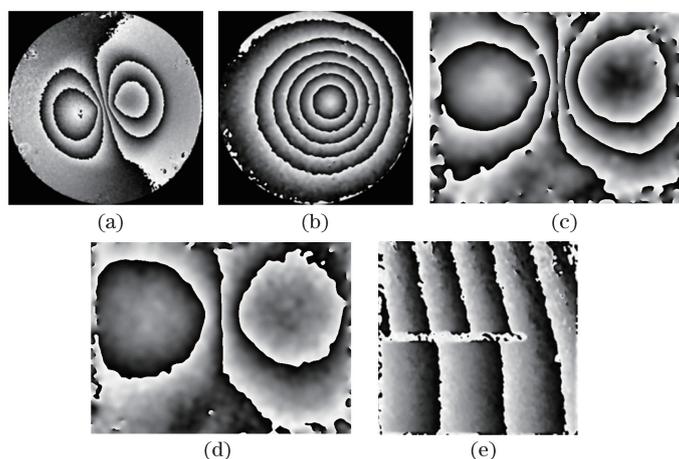


图 12 在图 11 所示的经典干涉条纹图中手动提取的干涉条纹区域

Fig. 12 Interference fringe regions manually extracted in classical interference fringes shown in Fig. 11

表 2 图 12 对应的二阶梯度熵值

Table 2 Second-order gradient entropy corresponding to Fig. 12

Parameter	Gradient entropy					Average
	Fig. 12 (a)	Fig. 12(b)	Fig. 12(c)	Fig. 12(d)	Fig. 12(e)	
Max ₂ (Q)	5.6603	5.2949	4.5775	4.4336	5.5506	5.1034
Min(Q)	0	0	0.4571	0.3537	0.4999	0.2621
Avg(Q)	1.5211	1.7105	2.1247	1.5870	1.9778	1.7842
Diff(max)	1.2026	1.0706	1.0205	1.6889	1.3913	1.2748

4 实验验证

为了验证本文提出的二阶梯度熵函数对散斑干

涉条纹区域提取的普适性与有效性,分别对几种典型常见形状的被测物进行实验验证,结果如图 13 所示,实验图像包含了大小和形状不同的被测物所得

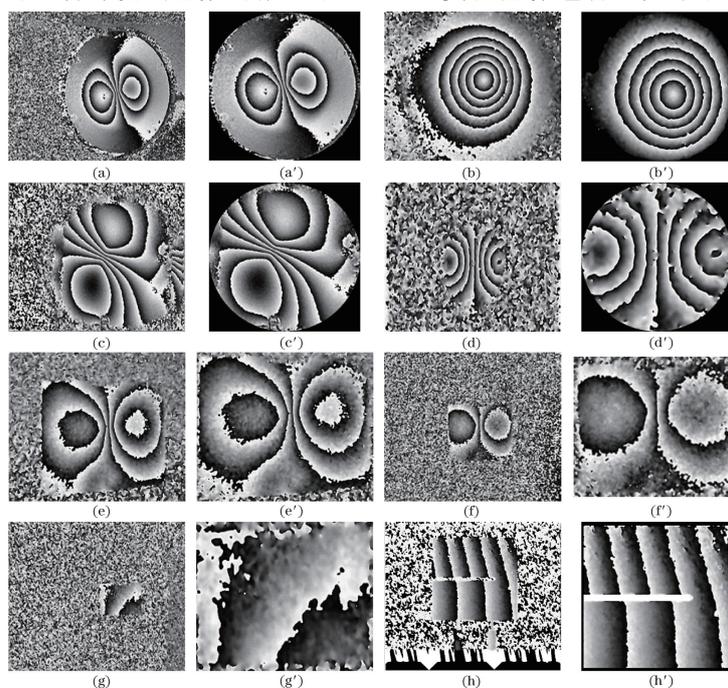


图 13 不同干涉条纹图及对应的提取结果。(a)~(h)散斑干涉条纹图;(a')~(h')条纹区域提取结果

Fig. 13 Different interference fringe patterns and corresponding extraction results. (a)-(h) Speckle interference fringe patterns; (a')-(h') extraction results of fringe region

的干涉条纹图以及不同类型的散斑干涉条纹图。

从实验结果可以看出:对于边缘较为细小或复杂的被测物,如图 13(h)中狭缝里侧的弧形边缘区域,本文提出的二阶梯度熵函数可能会造成微小的误判;对于矩形被测物,如若摆放不正也会导致提取区域中包含小部分的散斑背景区域,如图 13(e)、(e')所示。总体来说,本文方法可以较好地提取出散斑干涉条纹所在的区域,基本上剔除了散斑背景区域,达到了干涉条纹区域自动提取的目的。

5 结 论

采用 Laplacian 算子对散斑干涉条纹图进行预处理,将背景区域与条纹区域的灰度分布有效地区分开,提出将二阶梯度熵函数作为子区判定依据,最终通过连通区域的数量与大小确定了条纹区域的位置。通过对几种典型的干涉条纹图进行分析得出,15~20 pixel 的检验子区尺寸为最优的尺寸,自适应阈值的区间为 $[0, Q_{\max} - 1.25]$ 。对实际实验所得的干涉条纹图进行验证,从提取结果可以看出该方法可以较好地提取出干涉条纹所在的区域,对后续的相关计算提供了限制区域,可以为人工选取提供参考或代替人工选取。

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. Measurement of thermal expansion of a piston using holographic and electronic speckle pattern interferometry[J]. *Optical Engineering*, 1992, 31(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.
- [7] 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): 0815020.
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): 0815020.
- [8] Horn B K P, Schunck B G. Determining optical flow [J]. *Artificial Intelligence*, 1981, 17(1/2/3): 185-203.
- [9] Xiao J, Zhu S P, Huang H, *et al.* Object detecting and tracking algorithm based on optical flow[J]. *Journal of Northeastern University(Natural Science)*, 2016, 37(6): 770-774.
肖军, 朱世鹏, 黄杭, 等. 基于光流法的运动目标检测与跟踪算法[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2016, 37(6): 770-774.
- [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] Wang X. Research of shearography of nondestructive testing[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2016: 6-17.
王鑫. 基于激光错位散斑干涉的无损检测技术研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2016: 6-17.
- [12] Wyant J C. Two-dimensional phase unwrapping-theory, algorithms, and software, by Dennis C. Ghiglia and Mark D. Pritt[J]. *Optics and Photonics News*, 2000, 11(11): 47.
- [13] Wang Y H, Lü Y B, Gao X Y, *et al.* Research progress in shearography and its applications[J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(3): 300-309.
王永红, 吕有斌, 高新亚, 等. 剪切散斑干涉技术及应用研究进展[J]. *中国光学*, 2017, 10(3): 300-309.
- [14] Li J R. Research on the digital speckle pattern interferometry system based on spatial carrier phase shifting[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2014: 31-41.
李骏睿. 基于空间载波相移的激光散斑测量系统[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2014: 31-41.
- [15] Sun J F. Research on key technology of deformation measurement based on electronic speckle pattern interferometry[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2017: 30-31.
孙建飞. 基于电子散斑干涉变形测量的关键技术研

- 究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2017: 30-31.
- [16] Zhou X M, Lan S, Xu Y. Comparison of the edge detection algorithms in image processing[J]. Modern Electric Power, 2000, 17(3): 65-69.
周心明, 兰赛, 徐燕. 图像处理中几种边缘检测算法的比较[J]. 现代电力, 2000, 17(3): 65-69.
- [17] Gonzalez R C, Woods R E, Eddins S L. Digital image processing using (MATLAB)[M]. Ruan Q Q, Transl. 2nd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005: 285-304.
Gonzalez R C, Woods R E, Eddins S L. 数字图像处理(MATLAB版)[M]. 阮秋琦, 译. 2版. 北京: 电子工业出版社, 2005: 285-304.
- [18] Fang A P, Tian P B, Jia Y, *et al.* The application of the maximum entropy principle in the forecast for probability distribution[J]. Physics and Engineering, 2017, 27(6): 86-89, 94.
方爱平, 田蓬勃, 贾怡, 等. 最大熵原理在概率分布预测中的应用[J]. 物理与工程, 2017, 27(6): 86-89, 94.