

doi: 10.3788/gzxb20124107.0800

# 基于调制方向提取载波散斑条纹中心线的方法

林振衡

(莆田学院 电子信息工程学系, 福建 莆田 351100)

**摘 要:** 条纹中心线法是一种重要的电子散斑干涉条纹解调方法, 其前提条件是获得高准确度的条纹中心线. 本文在分析载波电子散斑干涉条纹自身特征的基础上, 提出了一种基于载波条纹调制方向提取条纹中心线的方法. 该方法首先通过同态滤波有效滤除高频乘性散斑噪声, 提取出载波条纹; 然后应用基于调制方向提取中心线算法确定载波条纹灰度极值点并做二值化处理; 再采用基于中心线拟合或者基于条纹间距的边沿中心线补偿法, 获得完整的条纹中心线图. 实验结果表明: 该方法简单、可靠, 能快速、准确地提取出连续的中心线.

**关键词:** 载波电子散斑干涉; 调制方向; 条纹中心线; 同态滤波; 修补

**中图分类号:** TP391.41

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1004-4213(2012)07-0800-5

## 0 引言

载波电子散斑干涉 (Carrier-wave Electronic Speckle Pattern Interferometry, CESPI) 是一种采用激光散斑测量物体光学粗糙表面微小形变的非接触式测量技术<sup>[1-2]</sup>. 它通过在两次曝光的时间间隔偏转物面或者参考面来调制干涉条纹, 然后利用解调技术解调出变形引起的包裹相位, 再通过相位去包裹处理从一或两幅载波散斑相关条纹图中提取物体的离面变形相位信息, 进而获得离面形变量或位移量, 具有灵敏度高、全场非接触、测量准确度高等优点<sup>[3]</sup>, 已被广泛应用于光学粗糙表面的变形测量<sup>[4]</sup>和三维面形测量<sup>[5-6]</sup>.

目前, 载波电子散斑干涉条纹的解调方法主要有傅里叶变换法和条纹中心线法. 傅里叶变换法是电子散斑干涉测量领域的主流方法, 但对于条纹密度变形较高或存在封闭条纹的散斑条纹图, 该方法则无法处理<sup>[7]</sup>. 基于散斑干涉条纹亮度分析的条纹中心技术仍是条纹图像数字化自动分析处理方法中较有效的一种方法. 尤其当实验系统难以实现相位测量时, 条纹中心线法将是首选的方法<sup>[8]</sup>. 相比傅里叶变换法, 它具有测量快捷、操作简单的优点. 而应用该方法的前提是获得散斑条纹的中心线. 常用的条纹中心线提取方法有: 基于灰度域值的条纹细化提取法<sup>[9]</sup>, 导数符号二值图中心线提取法<sup>[10]</sup>, 基于条纹方向的中心线提取法<sup>[11]</sup>, 细胞神经网络快速提

取法<sup>[12]</sup>. 这些方法各有优点, 也存在一些不足: 基于灰度阈值的条纹细化提取算法作细化处理前必须先对条纹做二值化处理, 容易丢失中心点信息, 造成原理性误差; 导数符号二值图法对噪声非常敏感, 易受噪声影响, 并且算法相对烦琐, 条纹处理速度慢; 基于条纹方向的中心线提取法是通过条纹光强分布图进行处理获得中心线, 由于光强的梯度并不等于条纹相位的梯度, 且容易受到背景光强变化、条纹对比度变化和图像噪声的影响, 因此存在一定的误差.

针对 CESPI 测量技术获得的载波散斑相关条纹自身的特性, 本文提出了一种更加简便、可靠的基于调制方向的散斑条纹中心线提取方法.

## 1 载波电子散斑干涉条纹的特征

在进行 CESPI 测量时, 需要在形变加载前进行载波调制, 主要是通过将被测物面 (或参考物面) 沿着  $x$  轴方向 (或者沿  $y$  轴方向) 偏转一小角度来调制载波信息. 假设沿  $y$  轴方向进行载波调制, 对应的载波散斑条纹图为一组平行于  $x$  轴包含大量高频散斑噪声的条纹, 如图 1(a). 在加载变形后, 得到的变形载波散斑条纹图为一组弯曲的散斑条纹, 如图 1(b).

对变形后载波散斑条纹图进行频域同态滤波处理<sup>[13]</sup>后得到的变形载波条纹图如图 2, 对应的部分灰度值分布表如表 1, 其在  $x=50$  坐标上沿  $y$  轴方向的条纹灰度曲线如图 3. 具有带通滤波效果的频

基金项目: 福建省自然科学基金 (No. 2011J01363) 资助

第一作者: 林振衡 (1974-), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为光学测量和光电检测技术. Email: lintom@21cn.com

收稿日期: 2011-11-23; 修回日期: 2012-01-04

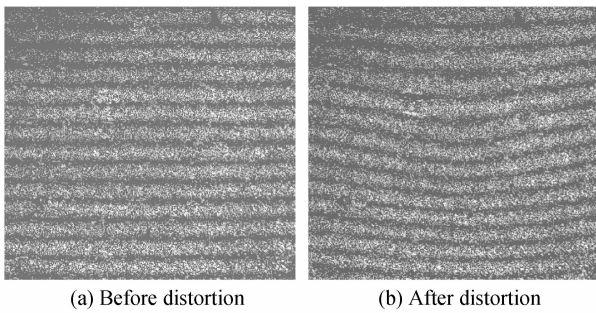


图 1 载波散斑条纹图  
Fig. 1 Carrier-wave speckle pattern fringes

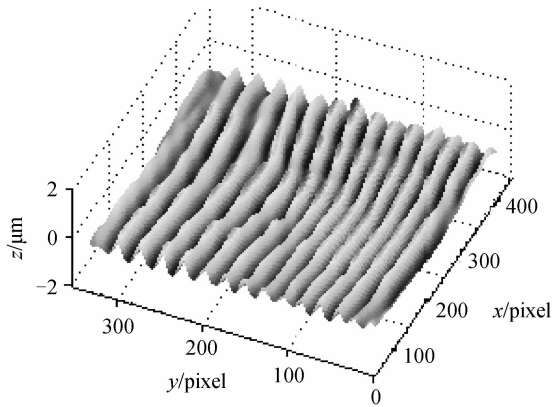


图 2 同态滤波后的载波条纹图  
Fig. 2 Carrier-wave fringes after Homomorphic Filtering

表 1 部分滤波后载波条纹的灰度值分布表

Table 1 A part gray scale parameter of carrier-wave fringes after filtering process

$x \backslash y$	49	50	51	52
26	-0.199	-0.249	-0.255	-0.286
27	-0.272	-0.277	-0.281	★-0.293
28	★-0.282	★-0.286	★-0.290	-0.281
29	-0.274	-0.277	-0.279	-0.248
30	-0.247	-0.247	-0.248	-0.196
31	-0.199	-0.198	-0.197	-0.124
32	-0.132	-0.129	-0.127	-0.033
33	-0.047	-0.042	0.000	0.072
34	0.053	0.059	0.065	0.181
35	0.161	0.169	0.178	0.292
36	0.269	0.277	0.284	0.382
37	0.362	0.369	0.376	0.442
38	0.428	0.433	0.438	▲0.461
39	▲0.455	▲0.458	▲0.460	0.436
40	0.438	0.438	0.438	0.370

(注:表中★点表示对应的灰度极小值的坐标点,▲点表示对应的灰度极大值的坐标点)

域同态滤波技术是通过载波散斑条纹图进行对数变换,使其中不同成分变成相加的关系,然后设计合理带通滤波函数滤除背景光强信号、低频噪声信号和高频散斑信号,提取出载波条纹信息。

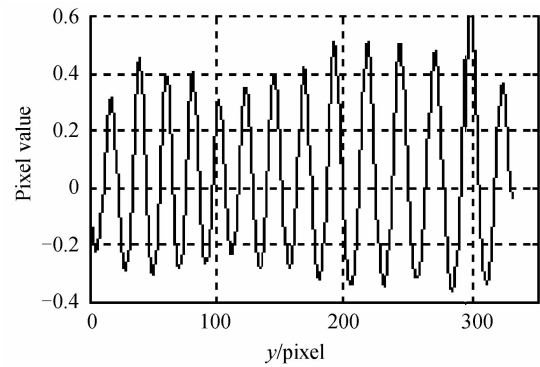


图 3 沿 y 轴的载波条纹的灰度曲线图  
Fig. 3 Pixel value graph of Carrier-wave fringes along y axis

分析图 1~图 3 可知:载波散斑条纹图经过频域同态滤波处理后,不仅有效滤除了高频噪音,而且散斑条纹的灰度呈现有规律的明暗变化;在某一  $x$  坐标上的灰度值,沿  $y$  轴方向(即条纹调制方向)有规则地逐渐减小至一个灰度最小值,然后逐渐增大至一个灰度最大值,再由该最大值减小至另一最小值,如此周期变化.该变化规律正好和条纹的明暗变化规律吻合.由于条纹中心线的位置就是探测到的亮度最强或最弱的位置,因此只要在载波条纹图中寻找到这些灰度极值点,就能够确定出条纹中心线的位置。

## 2 基于调制方向的载波条纹中心线提取算法

由于载波条纹极值点是沿调制方向规则分布的,因此通过以下算法及步骤可快速确定出载波散斑条纹的中心线。

第一步:对载波散斑条纹图作频域同态滤波预处理,获得滤波后的载波条纹,并判定载波条纹的调制方向.为了保证载波相关条纹只沿一个方向变化,在 CESPI 测量时沿一个轴向进行调制。

第二步:根据载波条纹灰度变化规律,可应用 MATLAB 软件编写程序,确定出在第一条非调制轴向坐标线上灰度沿调制轴向变化的极值点。

假设:测量时沿  $y$  轴方向调制,获得滤波后的灰度矩阵  $A$  的大小为  $\text{size}(A) = (m, n)$ ,其中  $x = (1 : n), y = (1 : m)$ .那么,确定  $x=1$  线上极值点的具体算法为:

①令  $p_1 = A(i, 1) - A(i-1, 1)$  (其中  $i \geq 2$  且  $i \leq r-1$ ),再对  $p_1$  作取符号运算  $q_1 = \text{sign}(p_1)$ ;

②令  $p_2 = A(i, 1) - A(i+1, 1)$  (其中  $i \geq 2$  且  $i \leq r-1$ ),再对  $p_2$  作取符号运算  $q_2 = \text{sign}(p_2)$ ;

③令  $t = q_1 + q_2$ , 并根据  $t$  的取值判断坐标点  $k(i, 1)$  是否为极值:

$$\begin{cases} t=2, \text{为极大值点, 即亮条纹中心线上的点} \\ t=-2, \text{为极小值点, 即暗条纹中心线上的点} \\ t=0, \text{为非极值点, 即非条纹中心线上的点} \end{cases}$$

④做二值化处理, 将极值坐标点的灰度值赋值为 1, 非极值坐标点的灰度值赋值为 0.

第三步: 确定出其他非调制轴向坐标线上的极值点并做二值化处理, 获得中心线条纹图, 其中中心线宽度为 1 像素.

第四步: 根据条纹中心线的连续性, 去除歧义中心点, 补全相邻的间断中心点.

上述中心线提取算法不仅可以通过 MATLAB 软件编写, 也可利用其它软件进行编程. 利用该算法可以获得除了调制轴向两侧以外条纹的中心线. 但由于算法要求  $i \geq 2$  且  $i \leq r-1$ , 导致程序无法自动处理每条调制轴线首端和末端的灰度信息, 使得两侧  $i=1$  和  $i=r$  的边沿条纹的中心点无法确定, 需进行边沿中心线修补.

### 3 载波条纹的边沿中心线修补方法

由于 CESPI 载波散斑条纹具有连续分布的特点, 因此相应的中心线条纹同样具有“连续性”的特点. 利用该特点, 本文提出了两种边沿中心线修补方法.

#### 3.1 基于中心线拟合的边沿中心线修补法

应用中心线拟合修补法时, 首先在图像两边沿附近寻找到条纹中心线的端点; 然后选择合适的像素模板和曲线拟合算法对靠近边缘的中心线上各点进行曲线拟合, 确定出拟合曲线方程; 最后根据拟合曲线计算结果判断边沿点是否为极值点, 并对判定为极值点的边沿点其灰度值赋为 1, 反之赋为 0.

选择合理的曲线拟合算法是该修补方法的关键. 本文采用三次多项式拟合结合最小二乘法进行曲线拟合. 令拟合曲线数学模型为

$$y(x) = k_1 x^3 + k_2 x^2 + k_3 x + k_4 \quad (1)$$

假设: 载波调制方向为  $y$  轴, 选用的像素模板为 5, 通过跟踪得到条纹中心线的一个端点为  $(y_0, x_0)$ , 其附近的 4 个中心点分别为  $(y_4, x_4)$ 、 $(y_3, x_3)$ 、 $(y_2, x_2)$ 、 $(y_1, x_1)$ . 式(1)可表示为

$$y(x_i) = k_1 x_i^3 + k_2 x_i^2 + k_3 x_i + k_4 \quad (2)$$

式中  $i=0, 1, 2, 3, 4$ .

那么残量平方和为

$$E = \sum_{i=0}^4 [y(x_i) - \bar{y}]^2 \quad (3)$$

式中  $\bar{y}$  代表  $y_0, y_1, \dots, y_4$  的平均值.

通过选择合理的系数  $k_1, k_2, k_3, k_4$  使得式(3)取值最小, 也即令

$$\sum_{i=0}^4 (k_1 x_i^3 + k_2 x_i^2 + k_3 x_i + k_4 - \bar{y}) \cdot x_i = 0 \quad (4)$$

式中  $t=0, 1, 2, 3$

获得拟合曲线后, 将与中心线端点相邻的上下边沿点的  $x$  轴坐标分别带入式(2), 求得对应的  $y$  值, 并作四舍五入. 若求解的  $y$  值为 0 或  $r$ , 则该边沿点为补充的中心点, 否则就为非中心点.

#### 3.2 基于条纹间距的边沿中心线修补法

基于条纹中心线拟合的边沿中心线修补方法准确度较高, 但算法比较复杂, 程序运行速度慢, 因此可采用另一种更加简单方法——基于条纹间距的边沿中心线修补法. 该方法是利用载波条纹近似等间距分布的规律, 通过分析边沿点距离最近相邻极值点的距离是否等于已知条纹中心线之间的平均距离, 来判断边沿点是否为极值点.

第一步: 计算出在每一非调制轴向坐标线上(如:  $x=1$ )极大值点和极小值点之间的平均间距  $d$ ; 并确定该坐标线对应的起始极值点坐标和终结极值点坐标, 并记作  $m(1)$  和  $m(t)$ ;

第二步: 判断边沿首端点是否为极值, 判据为:

$$\begin{cases} m(1) = d & \text{该点为极值点} \\ m(1) \neq d & \text{该点非极值点} \end{cases}$$

第三步: 判断边沿末端点是否为极值点, 判据如下所示:

$$\begin{cases} r - m(t) = d & \text{该点为极值点} \\ r - m(t) \neq d & \text{该点非极值点} \end{cases}$$

第四步: 灰度二值化处理, 也即令极值坐标点的灰度为 1, 非极值坐标点的灰度为 0.

该方法相对基于中心线拟合的边沿中心线修补方法具有算法简单, 程序运行速度快的优点.

### 4 实验

以基于灰度域值条纹细化方法为例, 对图 1(b) 变形后载波散斑条纹图进行处理, 由于条纹细化处理前需先对条纹做二值化图像预处理, 对应不同二值化域值的二值条纹图如图 4(a)、(b).

由图 4 可见: 根据不同二值化域值处理得到的二值条纹图之间存在较大的差异, 阈值的选择将直接影响中心线的提取. 域值选择太大, 二值条纹容易出现断点; 域值选择太小, 二值条纹容易出现多余的联结. 因此, 选择合适的二值化域值是应用灰度域值条纹细化法提取中心线的关键, 而目前通常需要依靠人工反复调试来获得, 操作烦琐、效率低.

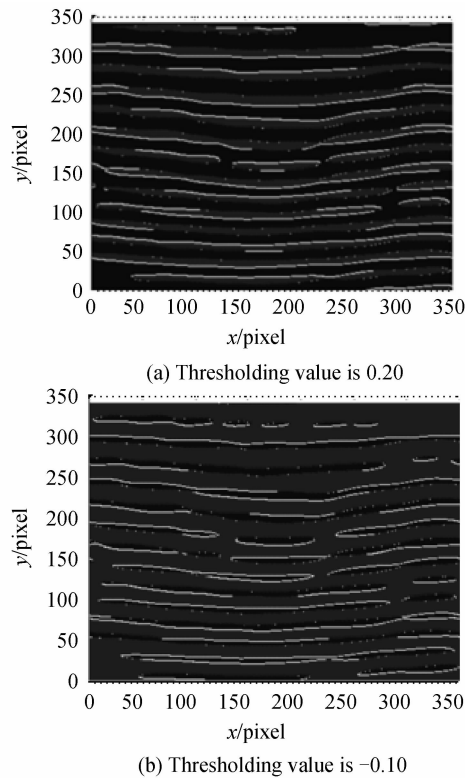


图4 不同二值化阈值的二值条纹图

Fig. 4 Thresholding fringes for different tresholding value

采用上述基于调制方向提取中心线提取和基于条纹间距修补边沿中心线的方法获得的变形前载波散斑条纹中心线图 and 变形后载波散斑条纹中心线图分别如图5(a)、(b). 由图5可见:获得的条纹中心

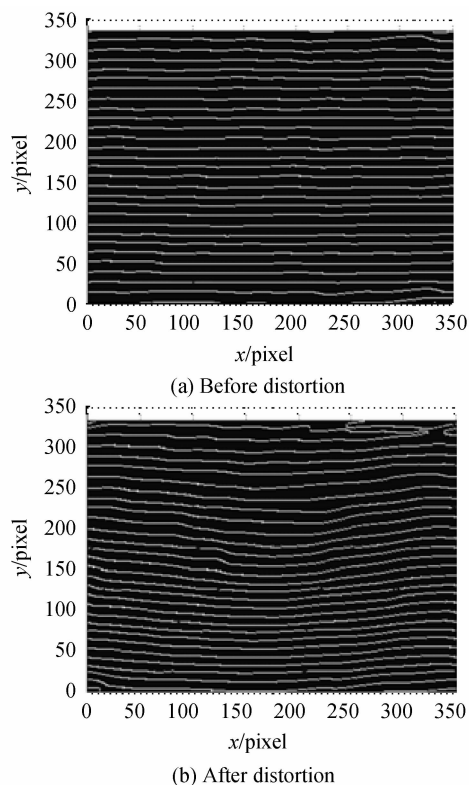


图5 载波散斑条纹的中心线图

Fig. 5 The fringe center maps of carrier-wave speckle pattern fringes

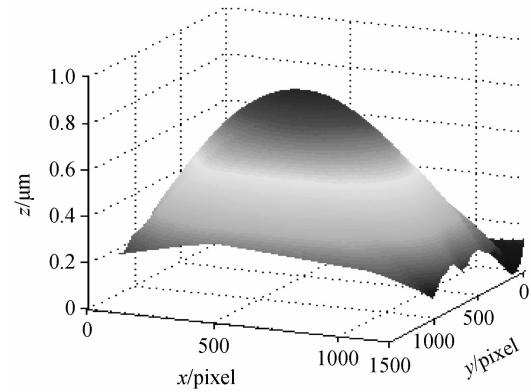


图6 三维离面位移图

Fig. 6 3D image of out-of-plane displacement

线沿着调制方向光滑连续分布;上下两侧的边沿中心线无缺失清晰分布.应用中心线解调法和亚像素曲面拟合技术可进一步解调出 CESPI 的离面位移信息,获得的三维离面位移如图6,说明被测试件表面受载荷后隆起,这与实际情况一致.

实验表明:该中心线提取法相比其他中心线提取方法具有工作可靠、程序简单、运行速度快,获得的中心线条纹图断点和毛刺少、准确度高等优点.

## 5 结论

本文根据载波电子散斑干涉条纹沿着调制方向作规则分布的特征,研究了一种基于调制方向提载波散斑条纹中心线的方法.该方法首先通过对载波散斑条纹图进行频域同态滤波处理,然后应用基于调制方向的中心线提取算法,及其对应的边沿中心线补偿方法,获得高质量、高准确度、连续的中心线条纹图.实验结果与实际情况相符合.研究成果为提取 CESPI 散斑条纹中心线提供了一种新的方法.

### 参考文献

- [1] RASTOGI P K. Digital speckle pattern interferometry and related techniques[M]. John Wiley & Sons Ltd, 2001.
- [2] PETZING J N, TYRER J R. Recent development and applications in electronic speckle pattern interferometry[J]. *Journal of Strain Analysis*, 1998, **33**(2): 153-169.
- [3] BHADURI B, MOHAN N K, KOTHIYAL M P. A dual-function ESPI system for the measurement of out-of-plane displacement and slope[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2006, **44**(6): 637-644.
- [4] LIU Cheng, YAN Chang-chun, GAO Shu-mei. Improved carrier-wave electric speckle interferometry [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(2): 214-217.  
刘诚, 阎长春, 高淑梅. 一种改进的载波电子散斑干涉处理方法[J]. *光子学报*, 2005, **34**(2): 214-217.
- [5] ZHAO Rui-dong, SUN Ping. Shape measurement based on phase-shifting electronic speckle pattern interferometry [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(11): 2045-2048.  
赵瑞冬, 孙平. 利用电子散斑相移技术测量物体三维面形的方法[J]. *光子学报*, 2010, **39**(11): 2045-2048.
- [6] SUN Ping, FAN Xiang-ju, WANG Xing-hai. Three-dimensional electronic speckle pattern interferometry with

- carrier modulation by using large-shearing block prism[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(4): 0412012.
- 孙平, 范香菊, 王兴海. 基于大错位方棱镜的三维载频电子散斑干涉技术[J]. *光学学报*, 2011, **31**(4): 0412012.
- [7] LI Kai, ZHANG Da-zhi, WANG Jing-jing, *et al.* Phase extraction of an espi fringe pattern by using two-dimensional continuous wavelet transform[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(3): 733-738.
- 李凯, 张大治, 王晶晶, 等. 基于二维连续小波变换的 ESPI 条纹图相位提取方法[J]. *光学学报*, 2010, **30**(3): 733-738.
- [8] WANG Hai-tao, LUO Qiu-feng, WAN Ming, *et al.* Extracting information of ESPI fringes based on fringe center method[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2010, **42**(1): 107-111.
- 王海涛, 罗秋凤, 万敏, 等. 基于条纹中心线法的电子散斑干涉条纹信息提取[J]. *南京航空航天大学学报*, 2010, **42**(1): 107-111.
- [9] DAI Fu-long, WANG Zhao-yang. Automatic fringe patterns analysis using digital processing techniques: I fringe center method[J]. *Acta Photonica Sinica*, 1999, **28**(8): 700-706.
- 戴福隆, 王朝阳. 条纹图像的数字化自动分析处理技术之一
- 条纹中心法[J]. *光子学报*, 1999, **28**(8): 700-706.
- [10] ZHANG Dong-sheng, MA Min, AROLA D. Fringe skeletonizing using an improved derivative sign binary method [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2002, **37**(1): 51-62.
- [11] 于起峰, 伏思华. 基于条纹方向和条纹等值线的 ESPI 与 InSAR 干涉条纹图处理方法[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 3-67.
- [12] WANG Yao-nan, PENG Shu-rong, DENG Ji-wei, *et al.* InSAR interferogram filtering based on the center lines of the interference-stripes[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2009, **38**(3): 210-215.
- 王耀南, 彭曙蓉, 邓积微, 等. 一种基于条纹中心线的 InSAR 干涉图滤波方法[J]. *测绘学报*, 2009, **38**(3): 210-215.
- [13] LIN Zhen-heng, HUANG Yuan-qing. A method of image processing for carrier-wave ESPI based on homomorphic filtering [J]. *Journal of Xiamen University (Natural Science)*, 2009, **48**(6): 818-822.
- 林振衡, 黄元庆. 基于同态滤波的载波 ESPI 图像处理方法 [J]. *厦门大学学报(自然科学版)*, 2009, **48**(6): 818-822.

## A Method to Extract Carrier-wave Speckle Pattern Fringe Skeletons Based on Modulation Direction

LIN Zhen-heng

(Department of Electronic and Information Engineering, Putian College, Putian, Fujian 351100, China)

**Abstract:** Fringe center method is an important demodulation method for electronic speckle pattern interferometry fringe. The precondition of this method is to obtain fringe skeletons with high precision. Based on the analysis of carrier-wave electronic interferometry fringe characteristics, a fringe skeletons extracting method based on modulation direction was proposed. Firstly, a homomorphic filtering was used to filter the high frequency multiplicative speckle pattern noise effectively and pick out carrier-wave fringes. Then a fringe skeletons extracting algorithm based on modulation direction was applied to confirm the dots of gray scale extremum and make binarization processing. In order to get whole fringe skeletons map, the mending methods based on skeletons curve fitting or based on the fringe separation were adopted to compensate the edge fringe skeletons. Experimental results show that this method is simple and reliable. It can extract the consecutive fringe skeletons quickly and accurately.

**Key words:** CESPI; Modulation direction; Fringe skeletons; Homomorphic filtering; Mend