

一种新的单幅条纹图的相位解调方法*

杨福俊¹ 何小元¹ 王蕴珊²

(1 东南大学 工程力学系, 江苏 南京 210096)

(2 山东大学 物理与微电子学院, 山东 济南 250061)

摘 要 基于非载波条纹图的条纹灰度分布的极值准确定位,提出了一种新的由单幅条纹图解调相位方法.该方法首先准确定位每个条纹灰度的极值包括最大和最小,再基于极值图将条纹的强度值分布线性地变换到-1和1之间,最后利用 arcos 反余弦取代传统的 atan2 反正切算法求出相位,结合极值图就能快速准确地解调出含有封闭条纹的条纹图相位.本方法仅用一幅条纹图,不需要传统的条纹定级和对分数级条纹插值与拟合,自动判别条纹相位变化的波谷,准确获得条纹相位分布.这一方法使光测法研究动态和瞬态问题成为可能,而不需引入载波法调制条纹.文中通过实例说明了本方法的处理过程.

关键词 相位解调;条纹分析;图像处理;自适应加权滤波

中图分类号 O348.1; TP301 **文献标识码** A

0 引言

除通过图像相关运算等方法外,光测力学的数据多是通过采集处理光学干涉条纹图来获得结果的.条纹图的条纹相位与诸如三维形貌、位移、应变、振动以及温度梯度等待测物理量密切相关.二维条纹图的条纹相位解调方法有相移法^[1]、基于载波条纹调制的 Fourier 变换法^[2~5]、同步探测法及锁相法等^[6,7].这些方法中,采用相移法解调出的相位精度最高,但要求在相移过程中保持测试系统的机械稳定,避免大气扰动,同时一般要求采 3 幅以上的条纹图.显见相移法不能用于研究瞬态或动态问题.对于不含有封闭条纹的非载波条纹图,Fourier 变换法通过分离提取单侧频谱实现相位解调^[3].另外,Fourier 变换法通过载波调制条纹,只需一幅条纹图就可以解调出相位.光学计量中的所谓载波条纹通常是加进有一定斜率的线性载波调制非单调的条纹相位分布,这样可以用 Fourier 变换法研究动态或瞬态问题.然而据 Nyquist 采样定律,引进的载波条纹的频率必须是被调制条纹最高频率的两倍,因此除非被调制条纹的频谱很窄,空间载波法才能使用.基于上述原因,国内外学者开始致力于单幅非载波条纹图,尤其是含有封闭条纹的相位解调研究.目前已开发研究出解调单幅条纹相位的方法有两类:(一)规则化相位跟踪法(Regularized phase-tracking)和 Regularization 法^[8~11],两者都是基于

条纹相位的(至少是局域的)连续性以及相应的条纹图灰度分布也应该是连续分布的假设,利用迭代法求解出相位.由于条纹相位和条纹图的连续性的要求,这样在迭代求解相位的过程中,不规则的随机噪声同时也被滤除或减少其对解调出的相位值的影响;类似还有二维非线性回归法^[12],基于遗传算法的多项式参数法^[13,14],多层神经网络法^[15],这些方法都类似于相位跟踪法,但后面的这几种方法都要求条纹图的信噪比较高,采用迭代法求解相位,如果噪声影响大,将导致最终结果不能收敛到实际值,且求解时间都很长,一般中小图像采用 Pentium III 以上的计算机处理需要一小时左右.(二)座标变换法^[16],采用座标变换将直角坐标下的封闭条纹转换到极座标下的非封闭条纹,再利用 Fourier 变换法解调出相位,再将解调结果的反演回原坐标.这种方法虽然处理很快,但只能处理含有一个中心的封闭条纹,而且封闭条纹中心处的解调相位误差大.

本文针对上述现有方法的不足,通过非载波条纹图的条纹灰度分布的极值准确定位,提出了一种新的由单幅条纹图解调相位方法,文中同时应用局域灰度梯度信息对条纹进行加权滤波处理,获得了较理想的结果.

1 原理

1.1 条纹灰度值的分布与条纹相位关系

对于大小为 $M \times N$,带有噪声的干涉条纹图上任意点 $r(i, j)$ 灰度值分布 $I(r)$ 一般可以写成

$$I(r) = a(r) + b(r) \cos \phi(r) \quad (1)$$

式中, $a(r)$ 是一个准直流低频变量反应背景变化, $b(r)$ 与条纹的局域对比度有关,也是低频变量;一般

*自然科学基金资助项目(10072017)、国家高技术研究发展计划“863”资助项目(2002AA404140)

Tel:025-83793384 Email:yang-fj@seu.edu.cn

收稿日期:2004-06-11

来说上述两个变量中既含有加性噪声又含有乘性噪声. $\phi(r)$ 是随空间变化的条纹相位,它与三维形貌、位移、应变、振动等待测物理密切相关. 如果将式(1)中的直流变量滤除,则可得到

$$I'(r) = B(r) \cos \phi(r) \quad (2)$$

式(2)的右边参数 $B(r)$ 仍然为一个低频变量,但在每一个条纹周期内, $B(r)$ 可近似看成不变. 因此如果对每级条纹的灰度值分区域分别做线性变换,可将整个条纹图上 $B(r)$ 变成常数 1,具体变换方法将在 2.2 节说明. 这样式(2)就变成

$$g(r) = \cos \phi(r) \quad (3)$$

若对(3)式两端去反函数,可得

$$\phi(r) = \arccos [g(r)] \quad (4)$$

图 1(a)中模拟的一维条纹图所调制的相位为 $\phi(x) = 2 + 5(\sin x/32 + \sin x/16)$,其中 $x \in [0, 99]$. 该一维模拟条纹相位变化既含有波峰也有波谷,如果直接采用式(4)处理得到结果如图 1(b),从图 1(b)可以看出由式(4)处理得到的结果不能正确反映相位变化的波峰或波谷,同时此结果也无法利用相位去“包裹”技术得到全局相位分布;而只有获得类似图 1(c)的结果才能够由相位去“包裹”技术得到全局相位分布.

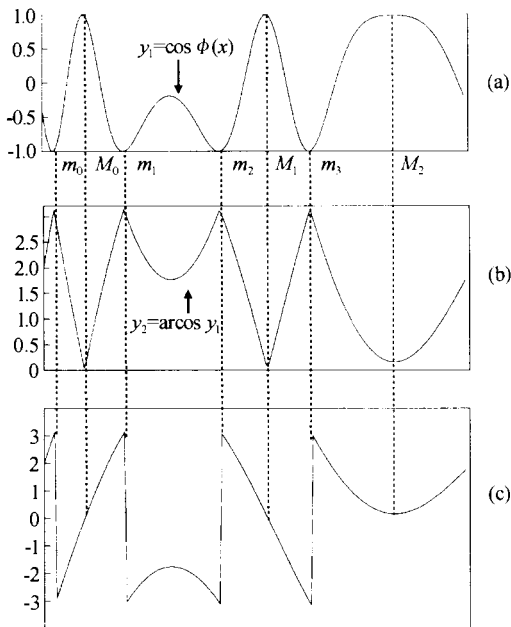


图 1 (a)一维条纹强度分布, (b)由公式 4 计算出的相位, (c)改变符号后的相位分布

Fig. 1 (a) 1-D fringe intensity distribution; (b) Phase distribution obtained using eq. (4); (c) Phase distribution after change of signs

1.2 条纹图的条纹相位解调方法

由图 1 不难发现,如果把图 1(b)中 y_2 对应于 m_0M_0, m_1m_2, M_1m_3 等段的值改变符号,就可得到图 1(c)的结果. 而 m_i, M_i 正是图 1(a)中条纹灰度极

小和极大值位置,因此对于一幅二维非载波条纹图如果采用如下的方法,利用计算机图像处理技术就可以自动地获得全场条纹相位分布.

当然在采用本文介绍的方法前,先对采集的条纹图进行诸如滤波,增强等预处理,然后按照:

1) 极值定位 用 3×3 滑动窗口对条纹图进行正交搜索,定位每级条纹灰度值极值位置,包括最大和最小值,初步得到一个极值图 $M(r)$,其中 $M(r) = 1$ 表示条纹最大值的位置, $M(r) = -1$ 为最小值的位置, $M(r) = 0$ 则为介于最大和最小值之间的点. 由于噪声的干扰,获得的极值图存在分叉、断点(线)等缺陷,采用数学形态学中的腐蚀和膨胀等方法处理,可获得完整的极值分布图.

2) 条纹灰度分布的归一化 以获得条纹灰度极值分布图为基准,对图像中条纹分布区域内的条纹灰度值,利用式(5)线性地变换到 -1 和 1 之间.

$$g(r) = \frac{2[I'(r) - \min_{s \in S} I'(s)]}{\max_{s \in S} I'(s) - \min_{s \in S} I'(s)} - 1 \quad (5)$$

式中, S 表示连接于两邻近极值点之间的最短线段,式(5)作用于整个条纹图,并且对于已经变换过的点不再变换.

3) 相位计算与符号调整 对于已经归一化处理的条纹图,利用式(6)计算出条纹图各点的相位.

$$\phi(r) = (-1)^n \arccos [g(r)]|_{r \in R} \quad R \subset \{g(r)\} \quad (6)$$

式中, R 为落在水平扫描线上与两相邻极值线交点之间的所有点. n 为整型变量. 具体的 n 取值如下:先逐行(或列)扫描条纹灰度极值分布图,每行扫描前置 $n=0$,扫描时每遇到一个极值点时就执行命令: $n=n+1$,同时对归一化处理后的条纹图的对应该行灰度按式(6)解调相位;直到整个图像的所有行完为止,这样就可获得整个条纹图的带有 2π “包裹”相位分布.

2 实验结果

2.1 模拟条纹的相位解调

图 2(a)为计算机模拟的条纹图,大小为 256×256 像素,被调制的相位分布为高斯双峰马鞍面. 模拟条纹的灰度分布为

$$I(i, j) = 95 + 95 \sin \left\{ 25 \left[\exp \frac{-(i-78)^2 - (j-178)^2}{50^2} + \exp \frac{-(i-178)^2 - (j-78)^2}{50^2} \right] \right\} \quad (7)$$

对图 2(a)进行带通数字滤波处理,并采用正交方向搜索得到条纹灰度分布极值如图 2(b). 滤波后的条纹图经过式(5)的归一化处理,利用极值分布图和式(6)获得图 3(a)所示含有 2π 包裹的相位分布,图 3(b)为本方法解调出相位与实际值之间的绝对误差

. 图 3(b)的结果说明在没有噪声干扰的情况下,产生误差的主要原因是条纹灰度极值定位不准确,这是因为条纹灰度分布只有 256 个等级、且是离散的,也就是说对于象图 1(a)模拟的无噪声条纹灰度极值定位也存在一两个像素的偏差,因此产生较大误差的点多集中条纹灰度分布的峰谷位置,本文模拟条纹处理后相位的相对误差平均值小于 0.5%.

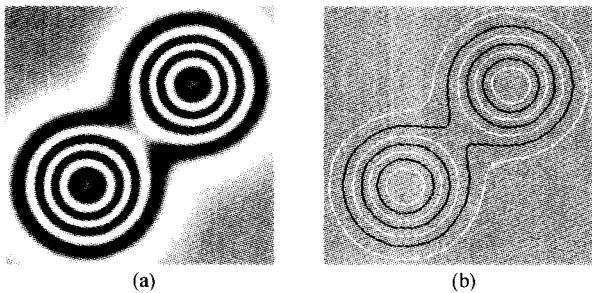


图 2 (a)模拟具有鞍点的条纹, (b)条纹灰度的极值分布图
Fig. 2 (a) Simulated fringe pattern containing extrema with saddle points; (b) Extrema map of intensity distribution

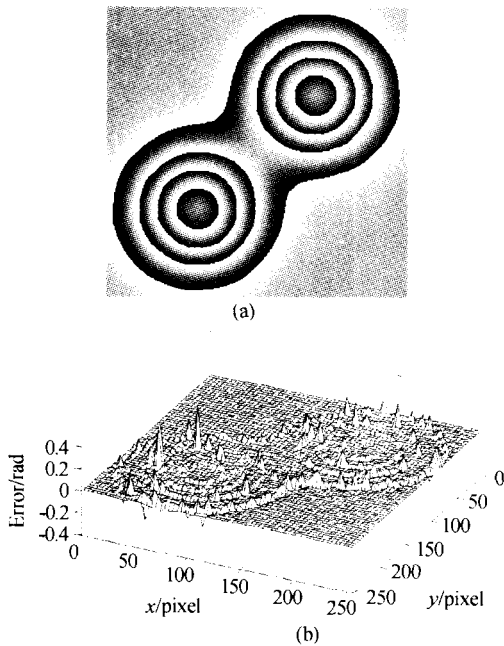


图 3 由本文提出的方法(a)解调出的相位, (b)计算模拟的相位与解调相位的绝对误差
Fig. 3 (a) Demodulated wrapped phase map; (b) Absolute error in radians between computer phase and proposed method

2.2 电子剪切散斑干涉条纹的相位解调

图 4(a)为周边固定薄铝圆板中心受集中载荷作用时,沿 45°方向剪切得到的电子散斑干涉条纹. 由于散斑条纹图的信噪比低,而且干涉条纹本身是高低频信息并存,所以采用一般的带通滤波处理,结果往往是高频颗粒噪声与高频条纹一起被滤掉,图 4(b)是基于 Fourier 变换方法对图 4(a)进行带通滤波处理的结果.

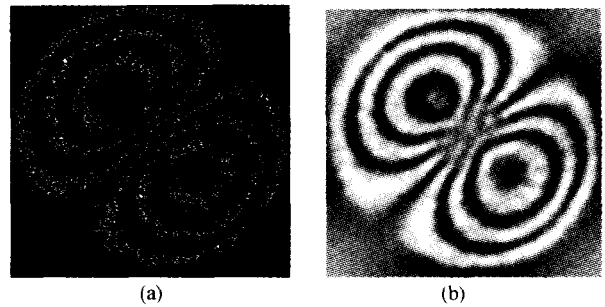


图 4 (a)中心受集中载荷周边固支圆板的电子剪切散斑条纹 (b)基于 FFT 带通滤波后的条纹
Fig. 4 (a) ESSPI fringe pattern represents the slope of centrally loaded circular plate; (b) Results of band-pass filtering FFT-based method

本文基于文献[18]开发出一种较为有效的自适应加权滤波方法,限于篇幅这里不做具体介绍,将另文详细说明. 采用该自适应加权滤波方法处理图 4 (a)的结果如图 5(a),图 5(b)是经正交方向搜索,并利用数学形态学方法对断点(线)及分叉处理后得到的条纹灰度极值分布. 图 6 是由本文介绍的方法对图 4(a)进行图像处理得到的三维相位分布. 整个图像处理及相位解调的过程由主频 800 MHz 的 PC 机实现,计算时间约 5 min.

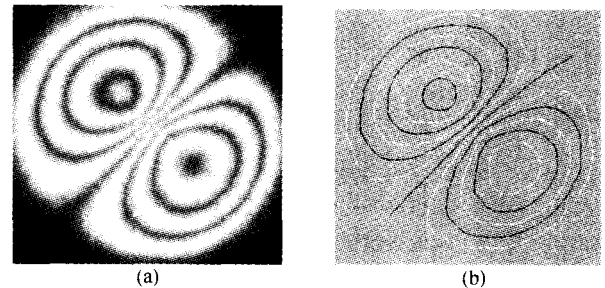


图 5 (a)采用加权自适应滤波处理后的条纹 (b)本文介绍的极值定位方法得到的条纹灰度极值分布图
Fig. 5 (a) Result obtained using adaptive weighted filtering; (b) Extreme maps obtained by the proposed method

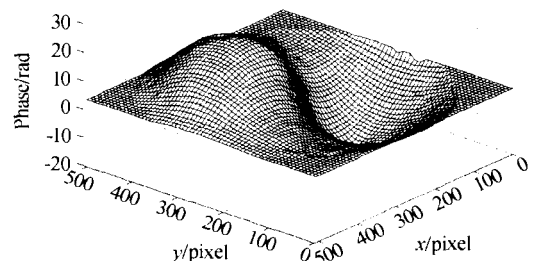


图 6 取包裹后三维相位显示
Fig. 6 3-D unwrapped phase distributions

3 结论和讨论

本文提出的单幅条纹图解调方法具有以下优点:1) 只需要一幅条纹图,就可以较准确地解调出

条纹的相位;2)与其它单幅条纹图相位解调方法相比,图像及条纹解调速度更快;3)以迭代法为基础的相位跟踪等方法,由于存在收敛速度、精度问题,本方法则不存在这些不足。

理论和模拟条纹图处理结果表明,本方法中解调出的相位误差较大常常出现在条纹极值位置,这是因为采集或模拟的条纹灰度分布一般只有256个等级、是离散的,并且坐标位置本身也为离散的整数值,从而即使是对模拟的无噪声条纹灰度极值定位也可能存在一两个像素的偏差。需要指出的是,本方法不同于传统计算机辅助条纹分析法^[17],不需要对整数或半整数条纹进行外部定级、或拟合分数级条纹,而仅对整数级和半整数级条纹定位,并采用条纹图的灰度分段线性变换来获得分数级条纹相位,这比用拟合或插值法获得的相位更准确,本文的这种相位解调方法由于采用图像处理技术,是全自动的和全场的。

参考文献

- 1 Reid G T. Automatic fringe pattern analysis; a review. *Opt Lasers Eng*, 1987, **7**(1):37~38
- 2 Takeda M, Ina H, Kobayashi S. Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry. *J Opt Soc Am*, 1982, **72**(1):156~160
- 3 Kreis T. Digital holographic interference-phase measurement using the Fourier-transform method. *J Opt Soc Am A*, 1986, **3**(6):847~855
- 4 王朝阳,戴福隆. 条纹图像的数字自动分析处理技术之二:相位分析法. *光子学报*, 1999, **28**(11):996~1001
Wang Z Y, Dai F L. *Acta Photonica Sinica*, 1999, **28**(11):996~1001
- 5 朱日宏,王青,陈磊,等. 压电晶体位移特性曲线干涉自动测量方法. *光子学报*, 1998, **27**(2):180~184
Zhu R H, Wang Q, Chen L, et al. *Acta Photonica Sinica*, 1998, **27**(2):180~184
- 6 Womack K H. Interferometric phase measurement using spatial synchronous detection. *Opt Eng*, 1984, **23**(4):391~395
- 7 Servin M, Rodriguez-Vera R. Two dimensional phase locked loop demodulation of carrier frequency interferograms. *J Mod Opt*, 1993, **40**(11):2087~2094
- 8 Servin M, Marroquin J L, Cuevas F J. Demodulation of a single interferogram by use of a two-dimensional regularized phase-tracking technique. *Appl Opt*, 1997, **36**(19):4540~4548
- 9 Servin M, Marroquin J L, Cuevas F J. Fringe-follower regularized phase tracker for demodulation of closed-fringe interferograms. *J Opt Soc Am A*, 2001, **18**(3):689~695
- 10 Marroquin J L, Rodriguez-Vera R, Servin M. Local phase from local orientation by solution of a sequence of linear systems. *J Opt Soc Am A*, 1998, **15**(6):1536~1544
- 11 Marroquin J L, Rivera M, Botello S, et al. Regularization methods for processing fringe-pattern images. *Appl Opt*, 1999, **38**(5):788~794
- 12 Yu E, Cha S S. Two-dimensional regression for interferometric phase extraction. *Appl Opt*, 1998, **37**(8):1370~1376
- 13 Ransom P L, Kokal J V. Interferogram analysis by a modified sinusoid fitting technique. *Appl Opt*, 1986, **25**(22):4199~4204
- 14 Cuevas F J, Sossa-Azuela J H, Servin M. A parametric method applied to phase recovery from a fringe pattern based on genetic algorithm. *Opt Comm*, 2002, **203**(3-6):213~223
- 15 Cuevas F J, Servin M, Stavroudis O N, et al. Multi-layer neural network applied to phase and depth recovery from fringe patterns. *Opt Comm*, 2000, **181**(4-6):239~259
- 16 Ge Z, Kobayashi F, Matsuda S, et al. Coordinate-transform technique for closed-fringe analysis by the Fourier-transform method. *Appl Opt*, 2000, **40**(10):1649~1657
- 17 Osten W, Hofling R, Saedler J. Two computer-aided methods for data reduction from interferograms. *Proc SPIE*, 1987, **863**:105~113
- 18 Lin R S, Hsueh Y C. Multichannel filtering by gradient information. *Signal Processing*, 2000, **80**(2):279~293

A Novel Approach for Phase Demodulation from a Single Fringe Pattern

Yang Fujun¹, He Xiaoyuan¹, Wang Yunshan²

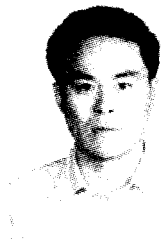
1 Department of Engineering Mechanics, Southeast University, Nanjing 210096

2 College of Physics and Microelectronics, Shandong University, Jinan 250061

Received date: 2004-06-11

Abstract A new technique for phase demodulation from a single fringe-pattern image is presented in this paper. The method locates the extremes of fringes' intensity distribution, and converts the intermediate gray-values into values between -1 and 1 using linear interpolation. Based on the extremes map, a wrapped phase distribution is demodulated from a single fringe-pattern and the phase values are computed by using an arcos mode rather than the traditional atan2 mode. Through the new method, wrapped phase values can be efficiently extracted from a single fringe-pattern without the need of carrier fringes. The phase demodulation can be processed without assigning fringe orders and making distinction between a depression and an elevation. The method is applied to the study of transient events. Experimental results and a new adaptive weighted filter are presented to demonstrate the validity of the method.

Keywords Phase extraction; Fringe analysis; Digital image processing; Adaptive weighted filter



automatic fringe-pattern analysis.

Yang Fujun received his M. Eng. degree from Shandong University of Technology, China, in 1997, and his PhD degree from Dalian University of Technology, China, in 2001, respectively. In 2001 he worked as a postdoctoral fellow at Southeast University, China. From Dec. 2002, to Dec 2003, he worked as a research engineer in Faculty of Engineering, National University of Singapore. Now, he is a staff member of the Department of Engineering Mechanics as an associate professor in Southeast University. His research interests are optical measurement techniques, microelectromechanical systems testing and