光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2022050901

随机步长光栅投影干涉图极值特征相位解算

毛露露[1*]，梁利利[1]，梁继允[2,3]

（1. 咸阳师范学院 实验实训中心，陕西 咸阳 712000；
2. 中国电子技术标准化研究院，北京 100007；3. 深圳赛西信息技术有限公司，广东 深圳 518000）

摘　要： 针对传统移相干涉测量中需要多帧干涉图，对测量设备稳定性要求高，相位提取速度较慢的问题，提出了一种基于干涉图特殊极值特征的两帧随机相移干涉图相位解算方法。该方法仅需两帧干涉图，利用高斯高通滤波器对具有随机相移量的两帧干涉图分别进行处理以滤除其背景，再通过干涉图中一定数量的特殊极值特征像素点来确定两帧干涉图之间的相移量，进而根据反正切相移相位提取算法对干涉图的相位进行解算。仿真模拟和实测对比结果表明，该方法可通过两帧随机相移干涉图获取较高精度的测量相位，大大减少了测量系统误差对相位解算结果的影响，对于256×256 pixels的石膏像眼部干涉图，执行时间在0.02 s以内，相位提取速度较快。

关键词： 光栅投影；干涉图；随机相移；极值特征；相位提取

中图分类号： TN247　**文章编号：** 1001－5868(2022)05－0942－07

Phase Solution of Extremum Feature of Grating Projection Interferogram with Random Step Size

MAO Lulu[1], LIANG Lili[1], LIANG Jiyun[2,3]

（1. Experimental Training Center, Xianyang Normal University, Xianyang 712000, CHN;
2. China Electronics Standardization Institute, Beijing 100007, CHN;
3. Shenzhen CESI Information Technology Co., Ltd., Shenzhen 518000, CHN）

Abstract: For the problems that the traditional phase-shifting interferometry required multiple interferograms, which thus required high stability of the measurement equipment, resulting in slow phase extraction, a phase solving method of two-frame random phase-shifting interferograms based on the special extremum feature of the interferogram was proposed. This method required only two-frame interferograms. The two-frame interferograms with random phase shifting were processed separately by Gaussian high-pass filter to filter out their backgrounds. Then the phase shifting between these two interferograms was determined by a certain number of special extremum feature pixels in the interferogram. Finally, the phase of the interferogram was calculated according to the phase-shifting phase extraction algorithm of the arctangent function. The comparison results of simulation and actual measurement show that this method can obtain high-precision measurement phase through two-frame random phase-shifting interferograms, greatly reducing the influence of measurement system errors on the phase solving results. For the 256×256 pixels interferogram of the eye part of the plaster model, the execution time is within 0.02 s, which is fast for phase extraction.

Key words: grating projection; interferogram; random phase shifting; extremum feature; phase extraction

收稿日期：2022－05－09.
基金项目：咸阳师范学院科研计划重点项目(XSYK21030).
* **通信作者：**毛露露　**E-mail:** maolulu95@163.com

0　引言

干涉技术作为一种高精度的光学测量方法，被广泛应用于工业微型元件检测、产品质量检测、物体表面形变测量、文物保护及三维重建等诸多领域[1-3]。传统的相移干涉相位解算至少需要三帧干涉图才能恢复相位信息，亦被称为多步相移干涉法[4]，操作简单、应用场合广泛、计算精度高，但采集干涉图数量较多，耗时长，且对相移硬件设备的稳定性要求严格。在实际测量中，外界实验环境的振动、相移的标定方法、移相设备的线性或非线性误差等不确定因素都会在获取干涉图的过程中引起随机移相误差，从而影响测量精度[5]。

针对多步相移干涉法的不足，研究者们提出了多种单帧干涉图时-频域相位提取方法[6-8]，该类方法仅需一帧干涉图即可完成相位提取，对硬件稳定性要求较低，但相比相移干涉技术，噪声敏感及细节分析性能等方面表现较差。两帧相移干涉技术的优势在于减少了干涉图的数量，同时可避免现有技术存在细节模糊的问题。Zhu 等[9]提出了基于傅里叶变换的两步相移相位提取技术，该技术精度易受噪声影响。Hao 等[10]提出一种对环境噪声不敏感的随机移相干涉测量方法，它以每个像素点为单位来确定干涉图的背景和调制幅值，耗时较长。Vargas 等[11]提出基于 Gram-Schmidt(GS)正交化算法的两帧相移相位解调算法，该方法相位提取快速准确，但不能提取相移值，在实际应用中具有一定的局限性。Niu 等[12]提出基于干涉图内积商的两帧相移相位提取方法，即 QIP 法，该算法能够准确提取两帧随机相移干涉图的相移值及相位结果，但计算过程相对较复杂。Zhang 等[13]提出一种 GS 正交归一化与最小二乘迭代相结合的两帧相位提取算法，该算法相位提取性能效果突出，但采用迭代方法复杂耗时，不适用于快速测量场合。

针对上述问题，本文提出了一种基于干涉图特殊极值特征的两帧随机相移方法，用于干涉图相位的提取，该方法能够在相移量、背景光强等信息完全未知的情况下，仅需两帧随机相移的干涉图即可提取相位，与现有方法相比，速度快，提取相位准确，具有较高的实用价值。

1　原理分析

一般地，相移干涉图的光强分布可表示为

$$I_n(x,y)=I'(x,y)+I''(x,y)\cos[\varphi(x,y)+\Delta_n] \tag{1}$$

式中，$n=1,2,\cdots,N$；$I'(x,y)$和$I''(x,y)$分别为干涉图的背景强度与调制强度；$\varphi(x,y)$为包裹相位分布；Δ_n 为第 n 帧干涉图对应的相移值。

1.1　干涉图背景滤除

现有的两帧相移相位提取方法一般均需对干涉图预先进行背景滤除，且干涉图背景项的滤除效果会直接影响相位测量的精度[14]。本文采用高斯高通滤波法对干涉图进行背景光强的去除。首先预处理输入的干涉图 $I(x,y)$，将其转换至频域，对 $M\times N$ 的干涉图 $I(x,y)$进行傅里叶变换得到 $F(u,v)$：

$$F(u,v)=\frac{1}{MN}\sum_{x=0}^{M-1}\sum_{y=0}^{N-1}I(x,y)\mathrm{e}^{-\mathrm{j}2\pi(ux/M+vy/N)} \tag{2}$$

式中，$u=0,1,2,\cdots,M-1$；$v=0,1,2,\cdots,N-1$。再通过高斯高通滤波器进行滤波操作，传递函数可表示为

$$H_{\mathrm{HP}}(u,v)=1-H_{\mathrm{LP}}(u,v)=1-\mathrm{e}^{-(u^2+v^2)/2\sigma^2} \tag{3}$$

式中，$H_{\mathrm{LP}}(u,v)$为低通滤波器的传递函数；u,v 为频域坐标；σ 为滤波窗口大小。再通过傅里叶逆变换将干涉图转换回空间域，从而得到滤除背景项后的干涉图。在进行傅里叶逆变换时可对干涉图的行和列分别做一维傅里叶逆变换，如下式所示：

$$I(x,y)=\frac{1}{MN}\sum_{u=0}^{M-1}\sum_{v=0}^{N-1}F(u,v)\mathrm{e}^{\mathrm{j}2\pi(ux/M+vy/N)} \tag{4}$$

其中，$x=0,1,2,\cdots,M-1$；$y=0,1,2,\cdots,N-1$。干涉图的背景项作为低频信息，可通过上述滤波器进行滤除，结合实验，文中滤波窗口大小 $\sigma=3$，该取值附近能够有效地滤除背景项信息。得到滤除背景项后的干涉图光强可表示为

$$I_{fn}(x,y)=I''(x,y)\cos[\varphi(x,y)+\Delta_n] \tag{5}$$

上述分析中采用高斯高通滤波法过渡带较短，能有效关注干涉图的细节像素，不易造成失真[15]。

1.2　极值特征的相位解算

在干涉相位测量中，首先需要采集两帧具有随机相移量的干涉图，则当 $n=1,2$ 时，式(5)可改写为下式：

$$\begin{cases}I_{f1}(x,y)=I''(x,y)\cos[\varphi(x,y)+\Delta_1]\\ I_{f2}(x,y)=I''(x,y)\cos[\varphi(x,y)+\Delta_2]\end{cases} \tag{6}$$

其中，$I_{f1}(x,y)$和 $I_{f2}(x,y)$分别表示滤除背景后的第一帧干涉图和第二帧干涉图，相对相移量 $\Delta=\Delta_2-\Delta_1$，并令 $\Delta_1=0,\Delta_2=\Delta$。进一步，根据欧拉公式，由式(5)得：

$$I_{fn}(x,y)=\frac{1}{2}I''(x,y)\exp[\mathrm{i}\varphi(x,y)+\mathrm{i}\Delta_n]+\frac{1}{2}I''(x,y)\exp[-\mathrm{i}\varphi(x,y)-\mathrm{i}\Delta_n] \tag{7}$$

将 $n=1,2$ 分别代入式(7),联立可得:

$$\varphi(x,y)=\arctan\left[\frac{I_{f1}(x,y)\cos\Delta-I_{f2}(x,y)}{I_{f2}(x,y)\sin\Delta}\right] \tag{8}$$

由式(8)可以看出,只要求出两帧相移干涉图之间的相移量 Δ 即可得到待测包裹相位 $\varphi(x,y)$。

相移量作为相移干涉图相位测量的重要参数,代表着不同干涉图之间的差异。但受相移装置、环境等因素影响,实际相移值一般与理论相移值存在一定的偏差。鉴于此,基于干涉图的特殊极值特征像素点来提取两帧相移干涉图之间的相移量,该方法对相移范围没有特殊的限制。

为了寻找滤除背景后相移干涉图的极值特征像素点,由式(6)可以得出:

$$\frac{I_{f2}(x,y)}{I_{f1}(x,y)}=\frac{\cos[\varphi(x,y)+\Delta]}{\cos[\varphi(x,y)]} \tag{9}$$

对于第一帧滤除背景后干涉图的极值特征点用 $I_{f1,E}(x,y)$ 表示,第二帧中与该特征点所对应的像素点表示为 $I_{f2,E}(x,y)$。由于在极值特征点处待测相移干涉图的相位结果 $\varphi(x,y)=2k\pi$ 或 $\varphi(x,y)=2k\pi$,则可得两帧干涉图之间的相移量为

$$\Delta=\arccos\left[\frac{I_{f2,E}(x,y)}{I_{f1,E}(x,y)}\right] \tag{10}$$

由于干涉图在实际相位测量中往往容易受到调制度、杂散光、振动等多种因素的干扰,仅利用单个极值特征像素点易发生极值点的误判,得到的相移量偏差较大。为了使提取的相移量具有较高的精度,本文提取一定数量的极值特征像素点,在获取极大值和极小值的过程中,为了尽量避免极值点的误判,分析极值特征点误判的情况模型,对误判的极值特征像素点进行剔除,以确保所提取的极值特征点序列的正确性。经优化后,两帧相移干涉图之间的相移量则可表示为

$$\Delta=\frac{\sum_{i=1}^{O}\arccos\left[\frac{I_{f2,O_i}(x,y)}{I_{f1,O_i}(x,y)}\right]+\sum_{j=1}^{P}\arccos\left[\frac{I_{f2,P_j}(x,y)}{I_{f1,P_j}(x,y)}\right]}{O+P} \tag{11}$$

式中,O 和 P 分别表示第一帧滤除背景干涉图 $I_{f1}(x,y)$ 中极大值、极小值的个数;O_i 和 P_j 分别表示其在干涉图中所对应的像素点位置。由式(11)求得相移量之后代入式(8),即可得到包裹相位 $\varphi(x,y)$。

从式(8)可以看出,包裹相位的计算中通常会包含反正切函数,得到的相位结果一般为被包裹在 $[-\pi,\pi]$ 之间的相位主值,此类相位信息一般呈阶跃状分布,不连续。为了得到连续相位,利用二维相位展开算法对所得的包裹相位 $\varphi(x,y)$ 进行相位展开,二维相位解包裹的相位关系如下:

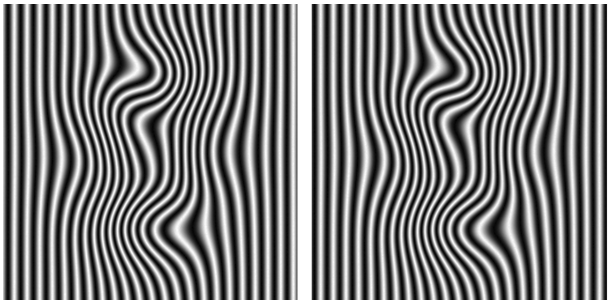
$$\phi_{i,j}(x,y)=\varphi(x,y)_{i,j}+2\pi k_{i,j} \tag{12}$$

式中,$k\in Z$,$0\leqslant i\leqslant M-1$,$0\leqslant j\leqslant N-1$,$\phi(x,y)$ 为解包裹后获取的连续相位结果。

2 数值模拟

为了评价上述方法的性能,在 Matlab 中建立数值模型进行仿真运算。仿真分析中通过计算机编程模拟生成具有一定相移的干涉条纹图,为增加仿真干涉条纹的复杂度,在理想的正(余)弦干涉条纹的基础上采用 Peaks(·)函数对其进行波峰调制生成经调制的变形条纹。

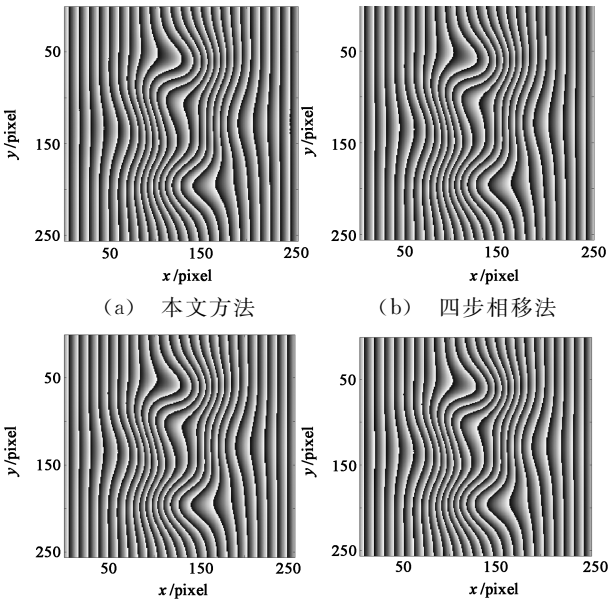
为了使仿真干涉图更加接近实际测量情况,利用 Awgn(·)函数对干涉图引入高斯白噪声。在信噪比(SNR)为 50 dB 时,建立了 256×256 pixels 的两帧仿真干涉图,如图 1 所示,引入相移量分别设置为 0 rad,π/2 rad。



(a) 第一帧干涉图 (b) 第二帧干涉图

图 1 仿真相移干涉图

为了验证所提方法的可靠性,仿真实验中模拟生成步进为 π/2 rad 的四幅大小均为 256×256 pixels 的相移干涉图进行运算,且同样采用 Awgn(·)函数对所有干涉图引入 SNR 为 50 dB 的噪声。由于标准的四步相移法作为经典的相移法,精度较高[16],因此,实验中以四步相移法得到的展开相位结果作为参考相位[17]。将本文所提方法与 GS 法、QIP 法的相位结果进行对比,图 2 为利用四种不同方法得到的仿真相移干涉图的包裹相位。

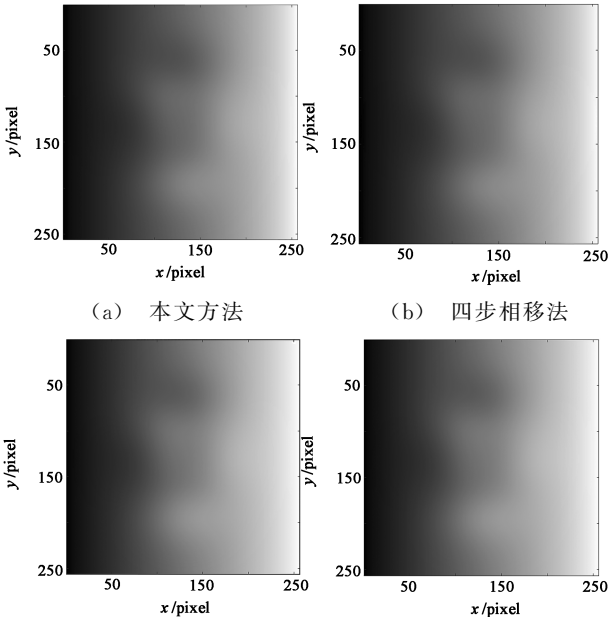


（a）　本文方法　　（b）　四步相移法

（c）　GS 法　　（d）　QIP 法

图 2　仿真相移干涉图包裹相位

根据本文验证的实际需求，选用行列逐点二维相位解包裹算法对所得包裹相位分别进行解算，得到的展开相位结果如图 3 所示。



（a）　本文方法　　（b）　四步相移法

（c）　GS 法　　（d）　QIP 法

图 3　仿真相移干涉图展开相位

根据本文所提方法的展开相位解算结果，先对其绝对误差进行分析，其相位误差为计算的展开相位与参考相位的差值，误差分布如图 4 所示。为进一步观察比较，实验还给出了图 5 所示的待测干涉图在 $x=50$ pixel，$x=128$ pixel，$x=200$ pixel 处的展开相位剖面误差结果。

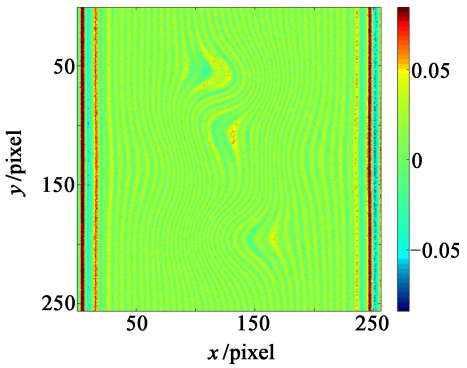


图 4　本文方法绝对相位误差

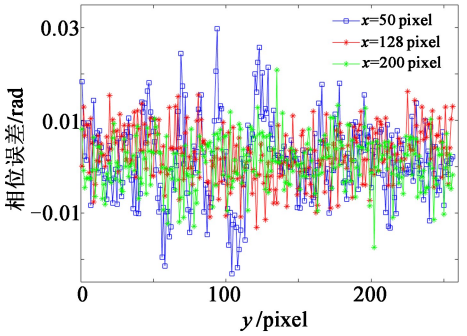


图 5　展开相位剖面误差

从图 4 和图 5 的误差分布情况可以看出，相位提取结果中，两侧边缘上个别区域出现了相位误差较大的现象，但整体上最大相位误差在 10^{-2} 量级，且大部分区域所对应的相位误差结果均在 ±0.02 rad 以内，满足相位测量的误差需求。

为了定量分析上述各方法的相位提取性能，基于参考相位计算不同条件下的均方根误差（RMSE）结果，从而完成相位解算方法的可靠性验证及评价，RMSE 定义如下：

$$RMSE=\sqrt{\frac{1}{m}\sum_{i=0}^{m-1}[\phi_i(x,y)-\phi_{\mathrm{ref}}(x,y)]^2} \tag{13}$$

式中，m 表示运算的总像素数，$\phi_i(x,y)$ 为利用两帧随机相移方法提取的相位，$\phi_{\mathrm{ref}}(x,y)$ 为参考相位。

在未加入噪声的情况下，先对本文所提方法的相移量提取性能进行分析，图 6 为不同相移量下展开相位的均方根误差结果。可以看出，当引入的相移量从 0.1 rad 变化到 0.5 rad 时，均方根误差变化较大；当相移量在 0.5～2.0 rad 之间变化时，均方根误差基本趋于稳定，约为 0.02 rad。

由于干涉图的噪声是影响相位提取结果精度的重要因素，为进一步验证所提方法对噪声的鲁棒性，对干涉图引入的噪声进行改变，仿真生成信噪比不

同的含噪干涉图。通过三种不同的两帧相移干涉图相位提取方法进行相位解算，并计算其均方根误差来分析不同噪声强度对干涉图相位解算的影响。此处同样以四步相移法得到的展开相位结果作为基准，引入不同噪声的仿真相移干涉图均方根误差结果见表 1。

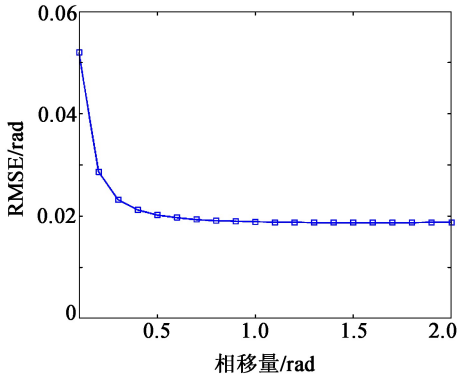


图 6 不同相移量下的均方根误差

表 1 不同信噪比下仿真相移干涉图的均方根误差

SNR/dB	RMSE/rad		
	本文方法	GS 法	QIP 法
30	0.051 9	0.052 3	0.052 2
35	0.030 2	0.030 9	0.031 5
40	0.023 5	0.024 7	0.024 8
45	0.019 8	0.021 6	0.020 3
50	0.018 7	0.019 9	0.018 9
55	0.017 7	0.018 5	0.018 9
60	0.017 2	0.018 2	0.018 6
65	0.017 2	0.018 1	0.018 7
70	0.017 2	0.018 0	0.018 6
75	0.017 1	0.018 2	0.018 6
80	0.017 2	0.018 1	0.018 6

从表 1 可以看出，与其他两种两帧相移方法相比，本文所提方法的均方根误差结果整体较小，表现出更好的准确度和噪声抑制性能。当信噪比大于 45 dB 时，所提方法的均方根误差基本保持在 0.02 rad 以内变化，呈现出较好的稳定性，这也体现出所提出方法对噪声较好的鲁棒性。

3 实验验证

为了进一步验证本文方法的相位解算性能，实验中对拍摄获取的实测随机相移干涉图进行了相位分析。通过光栅投影三维测量实验平台对石膏像面部测量获取光栅投影干涉图，光栅投影三维测量实验平台系统架构如图 7 所示。投影仪选用 SANYO 公司的 DLP 多媒体投影机，型号为 PLC-XU350C。相机为 DH-HV1351UM 型工业相机，获取图像的最高分辨率为 1 600×1 200 pixels。计算机配置为 i5-1135G7，16 G RAM。

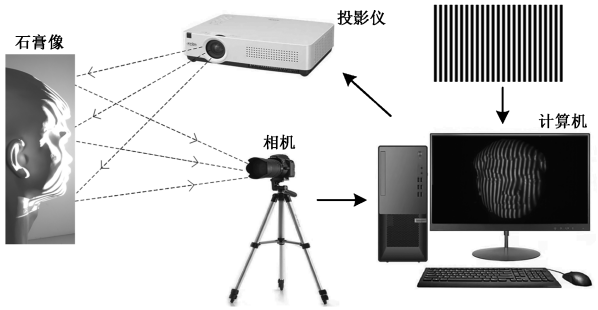
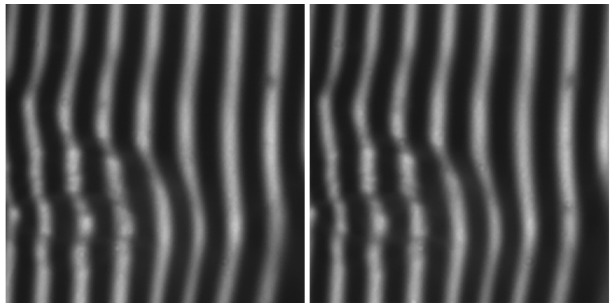


图 7 光栅投影三维测量系统架构

通过实验拍摄获取了两帧具有随机相移的石膏像面部干涉图，为了便于验证，在同一像素点位置对其进行下采样操作，最终采集的两帧 256×256 pixels 的石膏像眼部干涉图如图 8 所示。

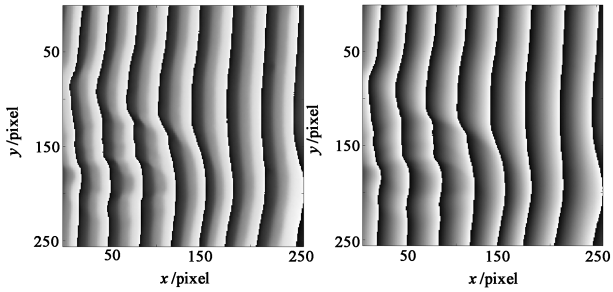


(a) 第一帧干涉图 (b) 第二帧干涉图

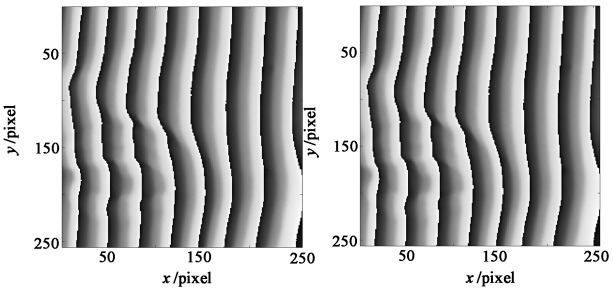
图 8 两帧石膏像眼部干涉图

由于实验中实际参考相位难以获取，因此，同样以精确度较高的四步相移法提取的展开相位作为基准值计算石膏像眼部干涉图展开相位的均方根误差。图 9 给出了四种方法得到的石膏像眼部干涉图包裹相位结果。

与模拟仿真过程相同，对石膏像眼部干涉图的包裹相位图进行相位解包裹，得到其展开相位结果如图 10 所示。

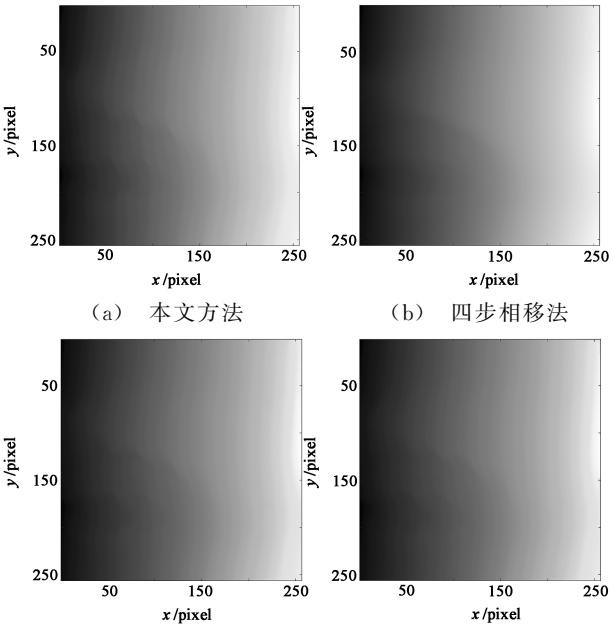


(a) 本文方法 (b) 四步相移法



（c）　GS 法　　（d）　QIP 法

图 9　石膏像眼部干涉图包裹相位结果



（a）　本文方法　　（b）　四步相移法

（c）　GS 法　　（d）　QIP 法

图 10　石膏像眼部干涉图展开相位结果

根据上述展开相位结果，得到本文方法提取石膏像眼部干涉图相位的绝对误差结果如图 11 所示。从图中可以看出相位误差较大的区域出现在右侧边缘，但整体来看最大相位误差在 10^{-1} 量级，在可接受区间之内，满足实际相位提取的误差要求。

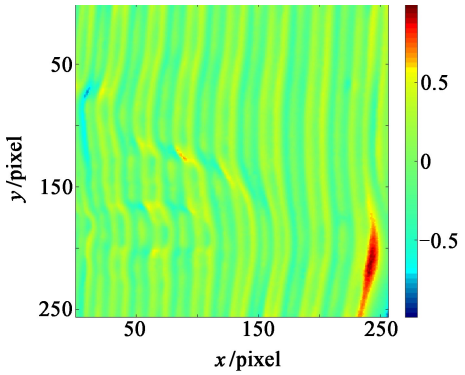


图 11　石膏像眼部干涉图相位误差

为进一步量化比较本文所提方法与 GS 法、QIP 法对实测干涉图的相位解算性能，实验获取了三种方法提取石膏像眼部干涉图的 RMSE 及执行时间，计算结果如表 2 所示。

表 2　石膏像眼部干涉图的 RMSE 及执行时间比较

方法	本文方法	GS	QIP
RMSE/rad	0.193 9	0.214 8	0.214 7
执行时间/s	0.017 3	0.016 9	0.021 8

由表 2 可知，与其他两种方法相比，本文所提方法的 RMSE 最小，相位提取准确度较好；从执行时间角度分析，GS 法耗时最少，本文所提方法次之，与其相差不大，均在 0.02s 以内，但 GS 法在相位解算中只能获取相位分布结果，不能提取相移值。综合来看，在适应多场合需求的情况下，所提方法在相位提取精度和速度方面均表现出明显的优势。

4　结论

现有的相移干涉图相位解调方法对硬件稳定性要求较高，易受环境因素影响，多需迭代运算，耗时长，具有一定的局限性。鉴于此，提出了一种基于干涉图特殊极值特征的随机步长相移干涉图相位解算方法。该方法利用高斯高通滤波器完成背景滤除，基于随机步长光栅投影干涉图特殊极值特征像素点提取相移量，简化了相位测量过程，大大降低了对硬件设备的要求，能够有效减少相移误差对测量精度的影响，扩大了应用范围。仿真及实测对比实验结果表明，相比传统的相移干涉技术，本文所提方法需要的干涉图数量更少，计算量也有所减少，具有相位提取精度高、速度快的优势，可同时满足对速度需求较高，且硬件条件较差的应用场合，在光学干涉快速测量领域具有一定的实用价值。

参考文献：

[1]　Servin M, Garnica G, Estrada J C, et al. High-resolution low-noise 360-degree digital solid reconstruction using phase-stepping profilometry[J]. Opt. Express, 2014, 22(9): 10914-10922.

[2]　温景超，吴立强，赵彦飞，等. 基于光学干涉法的翻新电子元器件鉴别方法[J]. 半导体光电，2020，41(6)：822-826.
Wen Jingchao, Wu Liqiang, Zhao Yanfei, et al. Identification method of refurbished electronic components based on optical interferometry[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2020, 41(6): 822-826.

[3]　Nguyen H, Tan T, Wang Y, et al. Three-dimensional shape reconstruction from single-shot speckle image using deep convolutional neural networks[J]. Opt. and Lasers in Engin.,

2021, 143(1): 106639.

[4] Ayubi G A, Duarte I, Ferrari J A. Optimal phase-shifting algorithm for interferograms with arbitrary steps and phase noise[J]. Opt. and Lasers in Engin., 2019, 114: 129-135.

[5] Lei H, Yao Y, Liu H, et al. Accurate phase extraction algorithm based on Gram-Schmidt orthonormalization and least square ellipse fitting method[J]. J. of Modern Opt., 2018, 65(10): 1199-1209.

[6] Bone D J, Bachor H A, Sandeman R J. Fringe-pattern analysis using a 2-D Fourier transform[J]. Appl. Opt., 1986, 25(10): 1653-1660.

[7] Qian K. Applications of windowed Fourier fringe analysis in optical measurement: A review[J]. Opt. and Lasers in Engin., 2015, 66: 67-73.

[8] Ma J, Wang Z, Pan B, et al. Two-dimensional continuous wavelet transform for phase determination of complex interferograms[J]. Appl. Opt., 2011, 50(16): 2425-2430.

[9] Zhu Y, Liu L, Zhu L, et al. Discussions about FFT-based two-step phase-shifting algorithm[J]. Optik, 2008, 119(9): 424-428.

[10] Hao Q, Zhu Q, Hu Y, Random phase-shifting interferometry without accurately controlling or calibrating the phase shifts[J]. Opt. Lett., 2009, 34(8): 1288-1290.

[11] Vargas J, Antonio Quiroga J, Sorzano C O S, et al. Two-step demodulation based on the Gram-Schmidt orthonormalization method[J]. Opt. Lett., 2012, 37(3): 443-445.

[12] Niu W, Zhong L, Sun P, et al. Two-step phase retrieval algorithm based on the quotient of inner products of phase-shifting interferograms[J]. J. of Opt., 2015, 17(8): 085703.

[13] Zhang H, Zhao H, Zhao Z, et al. Two-frame fringe pattern phase demodulation using Gram-Schmidt orthonormalization with least squares method[J]. Opt. Express, 2019, 27(8): 10495-10508.

[14] 朱进进，吴雨祥，邵晓鹏. 基于利萨茹椭圆拟合的两步相移轮廓技术[J]. 物理学报，2021，70(17)：71-81.
Zhu Jinjin, Wu Yuxiang, Shao Xiaopeng. Two-step phase shifting profilometry based on Lissajous ellipse fitting technique [J]. Acta Physica Sinica, 2021, 70(17): 71-81.

[15] Trusiak M, Patorski K. Two-shot fringe pattern phase-amplitude demodulation using Gram-Schmidt orthonormalization with Hilbert-Huang pre-filtering [J]. Opt. Express, 2015, 23(4): 4672-4690.

[16] 马 峻，毛露露，陈 宏，等. 数字干涉图实时相位提取PSM-IP核的FPGA实现[J]. 电子测量与仪器学报，2019，33(12)：71-79.
Ma Jun, Mao Lulu, Chen Hong, et al. FPGA implementation of real-time phase extraction PSM-IP core for digital interferograms [J]. J. of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(12): 71-79.

[17] 李 洋，李 岩，赵爱国，等. 四步相移结合互补格雷码的快速相位展开[J]. 激光杂志，2022，43(2)：36-41.
Li Yang, Li Yan, Zhao Aiguo, et al. Fast phase unwrapping of four-step phase shift combined with complementary gray code [J]. Laser J., 2022, 43(2): 36-41.

作者简介：

毛露露(1995—)，男，陕西省渭南市人，硕士，助理实验师，主要研究方向为光电信息技术及仪器、数字图像处理；

梁利利(1981—)，女，陕西省咸阳市人，硕士，高级工程师，主要研究方向为图像处理与模式识别。