

doi:10.3788/gzxb20174603.0311005

一种两步相移相位解算方法

张晓璇, 王月敏, 黄淑君, 高楠, 张宗华

(河北工业大学 机械工程学院, 天津 300130)

摘 要:提出一种将傅里叶与相移法结合的三维物体快速测量方法. 通过时域提取精确的均值包络与频域滤波结合的方法预处理条纹, 结合基于相位半角的两步相移, 只需要两幅相移条纹图, 即可得到精确的相位信息. 通过仿真和实验将本文方法与现有方法进行了分析对比, 实验结果证明, 本文方法可以获得优于现有两步相移方法的准确度, 一般测量环境下的均方根误差在 3×10^{-3} rad 以内. 本文提出的方法对噪声和表面突变不敏感, 具有鲁棒性好、运算速度快、准确度高等优点, 在三维快速测量领域有较高的应用价值.

关键词:光学测量; 相位测量轮廓术; 快速测量; 相移法; 傅里叶变换; 均值包络; 相位展开

中图分类号: O43; TN911.73

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2017)03-0311005-7

A Two-step Phase-shifting Algorithm for Phase Calculation

ZHANG Xiao-xuan, WANG Yue-min, HUANG Shu-jun, GAO Nan, ZHANG Zong-hua

(School of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

Abstract: A fast three-dimensional object measurement method was proposed by combining the Fourier profilometry with the phase shifting profilometry. By accurately extracting the mean envelope of the fringe in time domain and simply filtering in frequency domain, the fringe can be pre-processed. Combined with the two-step phase-shift algorithm base on 90° phase shift, an accurate phase value can be obtained from two fringe patterns. The results of simulation and experiment of comparing the proposed method with the existing methods show that this method can achieve a higher accuracy, which the RMS (Root Mean Square) is less than 3×10^{-3} rad. The proposed method has the following advantages of good robustness for its insensitive to noise and surface mutation, fast operation and high accuracy. Therefore, it will have a high application value in the field of fast measurement.

Key words: Optical measurement; Phase measuring profilometry; Fast measurement; Phase shifting algorithm; Fourier transform; Mean envelope; Phase unwrapping

OCIS Codes: 110.2960; 110.2990; 100.6890; 100.5070; 050.5080; 070.2615; 050.2770

0 引言

物体三维形貌的快速测量在工业检测、航空航天、医学、文物、教育等行业应用广泛. 针对物体三维形貌的快速测量, 现主要分为两大类方法: 第一类是通过硬件提高测量速度^[1-2], 随着硬件水平的不断提高, 此类方法将不再成为制约测量速度的主要因素; 第二类方法是通过尽可能地减少计算形貌信息所需要的图像个

基金项目: 国家自然科学基金 (Nos. 51675160, 61171048)、河北省应用基础研究计划重点基础研究项目 (No. 15961701D)、河北省高层次人才项目 (No. GCC2014049)、河北省人才工程培养经费项目 (No. A201500503) 和天津市科技计划项目 (No. 15PTSJJC00260) 资助

第一作者: 张晓璇 (1992-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为三维形貌的快速测量. Email: 330849890@qq.com

导师 (通讯作者): 张宗华 (1974-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为光学检测、三维数字成像和造型、条纹自动分析和三维生物测定术. Email: zhzhang@hebut.edu.cn

收稿日期: 2016-09-05; **录用日期:** 2016-11-01

<http://www.photon.ac.cn>

数来提高测量速度. 针对传统的相位测量轮廓术^[3], 求解相位最常用的方法是傅里叶法和相移法. 傅里叶法^[4]可以从一幅条纹图中解调出相位信息, 但由于其计算原理本身的限制, 对于表面形貌变化较大的物体无法实现准确测量. 针对这一问题, 有人提出了窗式傅里叶变换和小波傅里叶变换^[5], 这两种变换方法在一定程度上改善了突变表面物体的测量效果, 但其计算原理复杂, 计算量大. 传统的相移法^[6]计算准确度高, 但是由于最少需要使用 3 幅相移图解调相位信息, 使其不适用于快速测量环境.

近年来, 为适应快速测量要求, 在保证高测量准确度的同时, 尽可能地减少所需采集图像的个数, 多种两步相移算法相继被提出^[7-14]. Zhang 等^[7]提出了一种 2+1 步相移算法, 分别投影 2 帧相移量相差 $\pi/2$ 的正弦光栅和 1 帧背景光到被测物体表面, 以此消去背景项影响, 但是该方法需要额外增加一幅图像信息. π 相移的傅里叶变换轮廓术^[8]可以通过两幅条纹图做差去除背景项, 但在环境变化剧烈的情况, 背景项不能完全消除. Kreis 等^[9]提出基于傅里叶变换的两步相移算法, 可通过傅里叶变换直接提取待测相位, 但其恢复相位的准确度受噪声影响较大. 康新等^[10]提出基于投影栅线法的两步相移法, 但该方法归一化过程中人为将半周期内强度近似为常量, 通过反余弦解调相位. 李宝顺等^[11]提出采用相位半角的两步相移法, 利用三角形半角关系推导出基于 $\pi/2$ 相移的两步相移公式, 但该方法没有考虑背景项影响, 要求在密闭暗室或环境光足够弱的环境中测量. 以上两步相移方法提取相位的一个重要环节是基于条纹图背景的去掉. 但由于噪声, 采集过程中环境改变, 以及近似误差等因素, 使得背景成分不能精确提取, 从而影响测量准确度.

本文通过时域提取精确的均值包络与频域的滤波方法结合, 很好地去除了条纹图背景项. 然后利用两步相移方法得到用反正切函数表示的折叠相位图, 经最佳三条纹选择^[15]相位展开方法, 得到精确的相位信息. 结合多彩色通道技术^[16], 本文提出的方法在快速测量领域具有较高的应用价值.

1 原理分析

正弦条纹结构光投射至物体表面后, 从相机获取的经过被测物体表面高度调制的变形条纹图在点 (x, y) 处的光强分布可以表示为

$$I_i(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos [2\pi f_0 x + \varphi(x, y) + \delta_i] \quad (1)$$

式中: $a(x, y)$ 为点 (x, y) 处的背景光强, 它受物体表面属性和该位置的环境光共同影响; $b(x, y)$ 为该点处条纹幅值; $\varphi(x, y)$ 为包含物体深度信息的待测相位; δ_i 为第 i 幅条纹图的相移量.

1.1 基频分量去除

对于式(1)中的背景光强 $a(x, y)$, 可以表示为条纹 i 的均值包络, 其值可通过极大极小值包络求得. 而得到精确包络线的基础是准确提取条纹的极值点. 对于离散的数据信号, 极值点可利用差分的方法求取. 对于原始信号 $y(n)$, 其一阶差分为

$$D[y(n)] = y(n) - y(n-1) \quad (2)$$

将一阶差分符号化, 可得

$$\text{Sig}(n) = \begin{cases} -1, & D[y(n)] < 0 \\ 0, & D[y(n)] = 0 \\ 1, & D[y(n)] \geq 0 \end{cases} \quad (3)$$

对 $\text{Sig}(n)$ 求一阶差分, 有

$$D[\text{Sig}(n)] = \text{Sig}(n) - \text{Sig}(n-1) \quad (4)$$

当 $D[\text{Sig}(n)]$ 大于零时, 表示其一阶差分由负至正过零点, 因此该点为极小值点. 同理, $D[\text{Sig}(n)]$ 小于零时, n 为极大值点.

但在实际测量中, 由于环境中杂散光和采集过程中微小振动等影响, 会使条纹图中包含一定的噪声. 这些噪声成分容易造成极值点的误判, 无法得到能够反映条纹真实变化规律的包络线.

通过分析极值点误判的一般情况模型, 对差分符号化值进行了矫正, 剔除误判的极值点, 从而提取出正确的极值点. 通过线性插值方法, 计算出条纹图剖面线的上下包络线, 从而求得条纹图的均值包络. 通过均值包络可将条纹图拉回基线, 达到基本去除条纹背景的效果.

经上述处理后, 原条纹图中的直流分量 $a(x, y)$ 得到了有效抑制和消除. 但由于均值包络插值拟合的过程, 不可避免地会存在一定的微小误差, 使得条纹图没有完全拉回基线, 即仍存在一定的直流分量残留. 上述

预处理,使得频域中零频和低频分量受到抑制,傅里叶频谱中零频分量与基频分量延拓的混叠区域明显减弱,为进一步通过频域滤波去除零频提供了基础.因此采用简单的矩形窗即可进一步滤除零频分量,矩形窗的大小可表示为

$$\begin{cases} \text{Imp}(x) = \begin{cases} \text{Imp}(x), & |x-x_0| \geq \omega \\ 0, & |x-x_0| < \omega \end{cases} \\ \omega = 0.5\sigma |X_{\text{MAXR}} - X_{\text{MAXI}}| \end{cases} \quad (5)$$

式中, ω 为窗口宽度, X_{MAXR} 和 X_{MAXI} 为功率谱中的基频位置, $\text{Imp}(x)$ 表示功率谱强度.由于 $f_b < f_0/2$,即零频分量的最大值 f_b 小于正弦条纹基频 f_0 的二分之一.结合实验,当 σ 取0.4时可以得到较好的滤波效果.

1.2 相位计算

利用上述方法去除条纹背景项后,图像的光强分布可以表示为

$$I_i(x, y) = b(x, y) \cos [2\pi f_0 x + \varphi(x, y) + \delta_i] \quad (6)$$

本方法中取 $\pi/2$ 相移,因此,两幅变形条纹图的光强分布可以表示为

$$\begin{cases} I_1(x, y) = b(x, y) \cos [2\pi f_0 x + \varphi(x, y)] \\ I_2(x, y) = b(x, y) \cos [2\pi f_0 x + \varphi(x, y) + \frac{\pi}{2}] \end{cases} \quad (7)$$

$$\frac{I_2(x, y)}{I_1(x, y)} = \frac{b(x, y) \cos [2\pi f_0 x + \varphi(x, y) + \frac{\pi}{2}]}{b(x, y) \cos [2\pi f_0 x + \varphi(x, y)]} = -\tan [2\pi f_0 x + \varphi(x, y)] \quad (8)$$

所以

$$2\pi f_0 x + \varphi(x, y) = \arctan \left(-\frac{I_2}{I_1} \right) \quad (9)$$

通过相位展开方法,即可得到相位值 $\varphi(x, y)$.本文选用最佳条纹选择的方法展开相位.这种方法可以独立计算各个像素的绝对相位而不受相邻像素的影响,因此可以用来测量大的梯度或不连续的物体.此方法需要投影仪投射多幅不同频率的条纹,投射条纹数需满足

$$X_{n_i} = X_{n_0} - (X_{n_0})^{(i-1)/(n-1)}, i=1, 2, 3, \dots, n-1 \quad (10)$$

式中, N_{n_0} 为最大条纹数, N_{n_i} 为第 i 个条纹的条纹数量, n 为所用到条纹组数目,本文采用最佳三条纹法.该方法中 X_{n_0} 为基础相位, X_{n_1} 与 X_{n_2} 通过与 X_{n_0} 之间差频确定条纹级次,从而实现准确地相位展开.

2 实验及测量结果

2.1 仿真试验及结果分析

为验证本文方法,在MATLAB软件中建立了仿真系统进行验证.首先生成了一个高度分布已知的Peaks物体,如图1.根据三角测量原理,计算出变形条纹图.为使仿真实验更加接近实际情况,在仿真条纹中加入了3%的白噪声.模拟产生的原始条纹图和变形条纹图分别如图2(a)、(b).

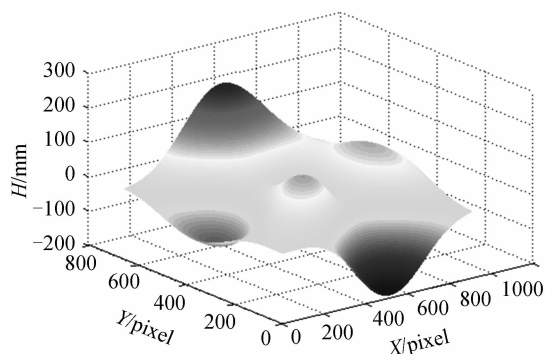


图1 模拟物体高度分布

Fig. 1 Height distribution of simulated object

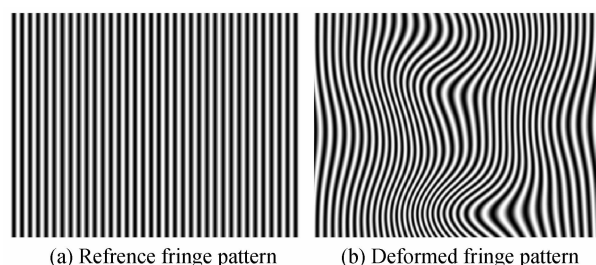


图2 模拟产生的原始条纹图变形条纹图

Fig. 2 Reference fringe pattern and deformed fringe pattern of the simulated object

利用所提出的方法,计算得到折叠相位和展开相位图,分别如图3(a)、(b).由三角测量原理计算得到高度分布如图4.

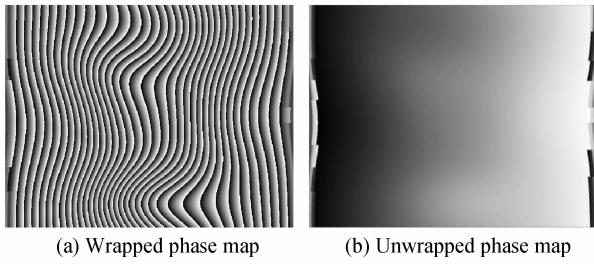


图3 仿真模型折叠相位图和展开相位图

Fig. 3 Wrapped phase map and unwrapped phase map of the simulated object

为定量分析本文方法的精确度,采用模拟物体高度的预设值与计算值之间的均方根(Root Mean Square, RMS)误差来评价. RMS 定义为

$$\text{RMS} = \frac{[\sum_{i=1}^n (h - \hat{h})^2]^{1/2}}{n} \quad (11)$$

式中, n 代表参与运算的像素个数, h 与 \hat{h} 分别代表物体的计算高度和预设高度.

在仿真实验中将本文的方法与四步相移法(Four Step Phase Shift, FPS),傅里叶变换法(Fourier Transform Profilometry, FTP)及 π 相移方法进行了对比实验. RMS 结果显示本方法较上述方法表现出更高的准确度. 提取处理结果的中间一行(即第 384 行)数据,计算上述方法在有效区域的均方根误差,结果见表 1.

表 1 FPS, FTP, π 相移及本文方法高度均方根误差Table 1 Height RMS of FPS, FTP, π -shifting and the proposed method

Number of simulated fringes	RMS(δ /mm)			
	FPS	FTP	π -shifting method	Proposed method
$f_0 = 36$	0.005 9	0.157 0	0.045 3	0.004 7
$f_0 = 64$	0.004 0	0.112 3	0.020 6	0.002 0
$f_0 = 100$	0.003 5	0.091 1	0.012 4	0.001 4

为进一步检验本方法的鲁棒性,模拟产生了包含不同强度噪声,条纹数为 36 的条纹图,并计算有效区域均方根误差,用于分析不同噪声对实验结果的影响,见表 2. 随着噪声的逐渐增大,均方根误差保持在 0.004 1~0.005 3 之间变化,未出现明显增大趋势,表现出较好的稳定性. 说明所提出的方法对噪声具有较好的鲁棒性.

表 2 不同强度噪声影响下本文方法的均方根误差

Table 2 Height RMS of proposed method under different noise

Noise intensity	RMS/mm	Noise intensity	RMS/mm
1.5%	0.004 1	3.5%	0.004 5
2%	0.004 1	4%	0.004 8
2.5%	0.004 4	4.5%	0.005 3
3%	0.004 7	5%	0.004 9

2.2 实物实验及结果分析

本文利用 DLP LightCrafter 4500 数字投影仪以及工业 CCD 相机搭建了如图 5 所示实验系统,对人脸面具模型进行了测量. 投影仪的亮度为 150 流明,分辨率为 912×1170 ,对比度为 1000 : 1. 所采用相机是来自 SVS 的工业相机 SVCam-eco204,相机帧速为 47 帧每秒,分辨率为 768×1024 . 系统投影最大条纹数为 64 的参考条纹组,采集得到的变形条纹灰度图如图 6(a).

按照本文提出的方法,对变形条纹进行预处理,去除条纹的背景项. 首先求得条纹的均值包络. 由于噪声等影响,利用传统求包络的方法容易出现极值点的误判,导致均值包络的提取出现错误. 经实验,简易滤波方法可以减少极值点的误判数目,但无法做到完全消除. 通过对极值点判断条件的改进,在一般情况下可以完全消除极值点的误判情况,从而得到更为精确的均值包络提取.

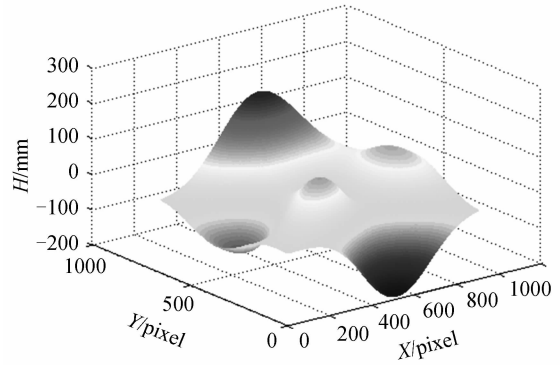


图 4 计算得到高度分布图

Fig. 4 The calculated value of the height distribution

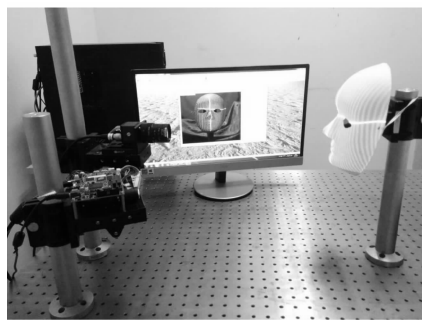


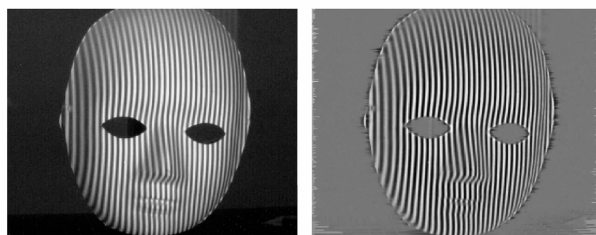
图5 实验系统

Fig. 5 Experiment system

经上述背景去除方法得到去除背景项的变形条纹图如图 6(b). 对比原始变形条纹图 6(a)可以看出, 已基本去除条纹背景. 将得到的变形条纹图进行傅里叶变换得到频谱图, 如图 7(a). 可见频谱中零频部分与基频部分实现了较好的分离. 此时只需用简单的矩形窗即可滤除残余的零频分量, 结果如图 7(b).

将上述处理后的条纹图利用两步相移和最佳三条纹选择方法进行相位计算即可得到展开相位图.

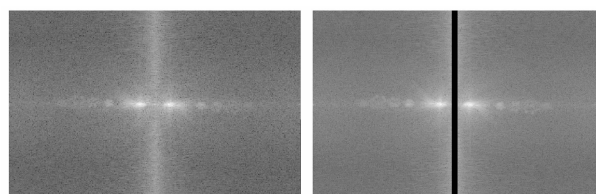
为验证本方法的计算效果, 将本文方法与经典算法进行了对比试验. 分别利用四步相移法、傅里叶变换法以及 π 相移法对同一组数据进行了相位计算, 展开相位结果如图 8. 可见, 傅里叶变换法以及 π 相移法由于基频提取中信息的丢失, 尤其是高频信息的丢失, 产生振铃效果, 使得变化剧烈的边缘部分的相位计算不能得到理想的效果. 本文方法对边缘部分的处理明显优于以上两种方法, 与四步相移法计算得到的展开相位效果相似. 取其中 550 行展开相位, 剖面图如图 9, 其中虚线表示四步相移法展开相位剖面图, 实线表示本文方法的剖面图.



(a) Deformed fringe pattern (b) Deformed fringe pattern after removing mean envelope

图6 去除均值包络前后的面具变形条纹灰度图

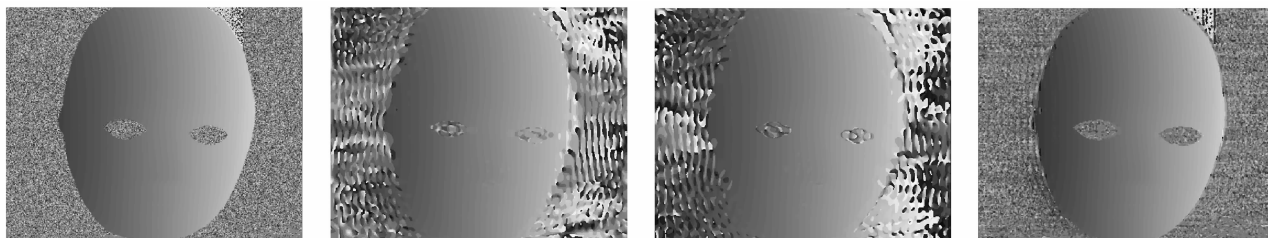
Fig. 6 Deformed fringe pattern before and after removing mean envelope



(a) Before filtering (b) After filtering

图7 滤波前后的频谱图

Fig. 7 Spectrum before and after filtering



(a) FPS (b) FTP (c) π -shifting (d) The proposed method

图8 四种方法得到面具模型展开相位图

Fig. 8 Unwrapped phase of FPS, FTP, π -shifting and the propose method

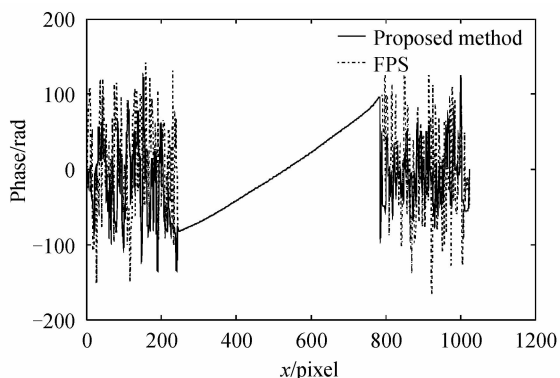


图9 展开相位剖面图

Fig. 9 Profile of unwrapped phase map

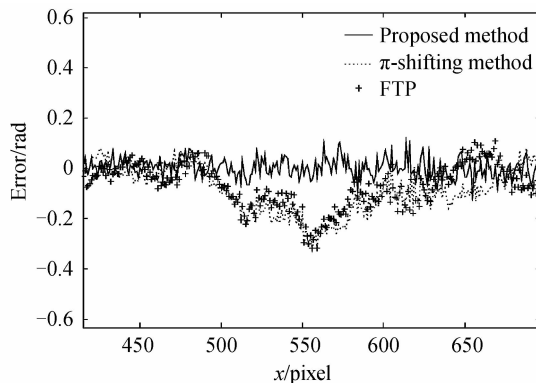


图10 FTP, π 相移和本文方法计算相位误差

Fig. 10 Phase error of FTP, π -shifting and the proposed method

为定量评价本方法的测量准确度,取展开相位图第 550 行,不考虑边缘影响,将四步相移得到的展开相位结果作为基准,计算了各种方法展开相位的均方根误差,结果见表 3. 可见本文提出的方法,即使在不考虑边缘优势的情况下,准确度仍优于 π 相移法及传统傅里叶方法,与四步相移法可以达到近似相当的准确度. 几种方法的误差放大如图 10,其中实线、十字线和虚线分别表示本文方法、傅里叶法和 π 相移法与四步相移法计算相位值之间的误差.

表 3 FTP, π 相移及本文方法相位均方根误差
Table 3 Phase RMS of FPS, FTP, π -shifting and the proposed method

Calculation method	FFT	π -shifting method	Proposed method
RMS(δ /rad)	0.238 4	0.039 0	0.002 2

可见,在相位图 550 列左右,对应面具模型梯度变化较大(面具模型鼻子)部分,本方法在准确度方面体现出明显的优势,绝对误差在 0.15 rad 以内,另外两种方法绝对误差均在 0.35 rad 以内.

为进一步验证本文方法的有效性,基于本文实验系统测量了具有不同材质、不同颜色、不同反射率的物体,分别为牛皮纸盒、塑料鼠标、陶瓷水杯以及橡胶杯盖,测量结果如图 11,并以四步相移计算的展开相位结果为基准分别计算了各物体测量结果的均方根误差,结果见表 4.

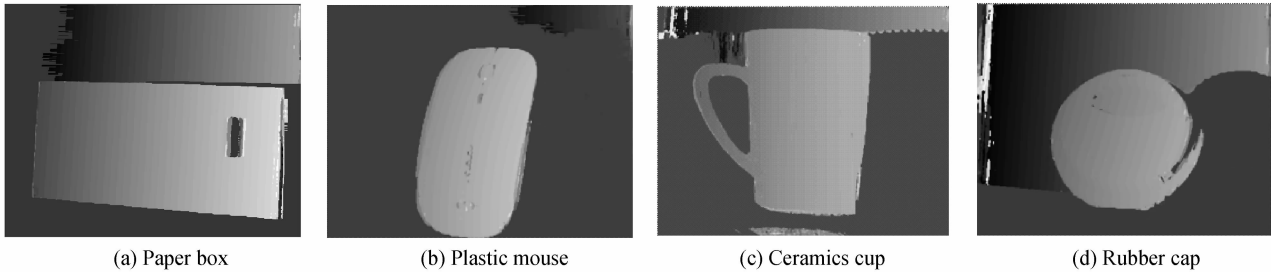


图 11 四个被测物体展开相位图
Fig. 11 Unwrapped phase map of different objects

表 4 四个被测物体相位均方根误差
Table 4 Phase RMS of different objects

Measured object	Paper box	Plastic mouse	Ceramics cup	Rubber cap
RMS(δ /rad)	0.0017	0.0035	0.0061	0.0031

实验结果表明,对于表面反射率较高的物体,由于采集得到条纹质量较低,测量准确度有一定程度下降,但在可接受范围内. 总体来说,本方法针对不同表面特性的被测物体均可达到较高测量准确度,具有一定的稳定性.

3 结论

本文提出了一种两步相移相位求解方法. 通过一定的预处理技术,结合相位半角相移以及最佳三条纹选择相位展开算法,精确解调出物体的相位信息. 通过理论分析及实验测量,验证了本方法的有效性. 实验结果表明本文提出的方法可以得到优于窗式傅里叶与 π 相移法的测量准确度,且与四步相移法近似相当. 相比传统的四步相移算法,由于减少了所需条纹图幅数,采集速度提高了一倍. 同时,相比较窗式傅里叶变换方法 20.7 s 的计算时间,本方法在保证较高计算准确度的同时具有较高的运算速度,单幅相位图的计算时间为 2.3 s. 此外,本文的预处理方法可用于传统傅里叶算法的预处理. 经实验验证本文方法预处理后的傅里叶算法对表面梯度变化较大的边缘部分的相位提取效果有较大的改善,可以得到优于窗式傅里叶的测量准确度,同时具有明显优于窗式傅里叶的运算速度. 本文所提出的方法结合多颜色通道测量技术,可实现单帧测量,在快速测量领域体现出较高的应用价值.

参考文献

- [1] HEIST S, SIELER M, BREITBARTH A, *et al.* High-speed 3D shape measurement using array projection[J]. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 2013, **8788**(5): 1-12.
- [2] HEIST S, LUTZKE P, SCHMIDT I, *et al.* High-speed three-dimensional shape measurement using GOBO projection[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2016, **87**(1): 90-96.
- [3] CHEN F, BROWN G M, SONG M M. Overview of three-dimensional shape measurement using optical methods[J].

- Optical Engineering*, 1999, **39**(1): 10-22.
- [4] TAKEDA M, MUTOH K. Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3-D object shapes[J]. *Applied Optics*, 1983, **22**(24): 3977-3982.
- [5] ZHANG Z H, JING Z, WANG Z H. Comparison of Fourier transform, windowed Fourier transform, and wavelet transform methods for phase calculation at discontinuities in fringe projection profilometry[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2012, **50**(8): 1152-1160.
- [6] HUI Mei, WANG Dong-sheng, DENG Nian-mao, *et al.* Four-frame phase-stepping interferometry-base insensitive algorithm to phase-stepping error[J]. *Journal of Tsinghua University(Science and Technology)*, 2003, **43**(8): 10-17
惠梅,王东生,邓年茂,等. 对移相误差不敏感的四帧相位算法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2003, **43**(8): 10-17
- [7] ZHANG S, YAU S T. High-speed three-dimensional shape measurement using a modified two-plus-one phase-shifting algorithm[J]. *Optical Engineering*, 2007, **46**(11): 113603.
- [8] GUO L, SU X, LI J. Improved Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3D object shapes[J]. *Optical Engineering*, 1990, **29**(12):64-66.
- [9] KREIS T M, JUEPTNER W P O. Fourier transform evaluation of interference patterns: demodulation and sign ambiguity[C]. SPIE, 1992, **1553**: 263-273.
- [10] KANG Xin, HE Xiao-yuan. Two-step phase-shifting technique for phase measurement profilometry by grating projection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(1):75-79.
康新,何小元. 两步相移实现投影栅相位测量轮廓术[J]. 光学学报, 2003, **23**(1): 75-79.
- [11] LI Bao-shun, CAI Qing-qing, BAO Ya-ping, *et al.* Two-step phase-shifting algorithm by the use of half angle of phase [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(11): 1110002.
李宝顺,蔡青青,包亚萍,等. 采用相位半角的两步相移法[J]. 光子学报, 2014, **43**(11):1110002.
- [12] ZHOU Can-lin, SI Shu-chun, GAO Cheng-yong, *et al.* Two-step generalized phase-shifting profilometry by grating projection[J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2013, **24**(9): 1784-1788.
周灿林,司书春,高成勇,等. 两步广义相移的投影栅轮廓术[J]. 光电子. 激光, 2013, **24**(9):1784-1788.
- [13] NIU Wen-hu, ZHONG Li-yun, SUN Peng, *et al.* An improved two-step phase-shifting algorithm based on Gram-Schmidt orthonormalization[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, **42**(6): 239-245.
牛文虎,钟丽云,孙鹏,等. 一种改进的施密特正交化两步相移算法[J]. 中国激光, 2015, **42**(6):239-245.
- [14] LIU Y P, DU G, ZHANG C R, *et al.* An improved two-step phase-shifting profilometry[J]. *Optik*, 2016, **127**(1): 288-291.
- [15] TOWERS C E, TOWERS D P, JONES D C. Optimum frequency selection in multifrequency interferometry[J]. *Optics Letters*, 2003, **28**(11): 887-889.
- [16] ZHANG Z H, TOWERS C E, TOWERS D P. Time efficient color fringe projection system for 3D shape and color using optimum 3-frequency selection[J]. *Optics Express*, 2006, **14**(14): 6444-6455.

Foundation item: The National Natural Science Foundation of China (Nos. 51675160,61171048), the Key Basic Research Project of Applied Basic Research Programs Supported by Hebei Province (No. 15961701D), the Research Project for High-level Talents in Hebei University (No. GCC2014049), the Talents Project Training Funds in Hebei Province (No. A201500503), the Tianjin Science and Technology Project (No. 15PTSJJC00260)