

# 一种提高复合光栅实时三维测量精度的方法

张睿 曹益平 何定高

(四川大学光电科学技术系, 四川 成都 610064)

**摘要** 提出了一种采用组合滤波窗提高复合光栅实时三维测量精度的新方法,通过对复合光栅相位测量轮廓术(PMP)原理的分析,发现当从采集的变形复合光栅中解调相移变形条纹时,解调精度与滤波窗的选择有关。通过对几种常见滤波窗函数的分析和比较,设计了一种将汉宁窗和矩形窗相结合的新型滤波窗。由于组合窗的滤波精度与物体频谱分布情况(面型情况)有关,在复合光栅三维实时测量中,对频谱成分适中的 Peaks 函数物体进行数字模拟,得到测量该类物体所需的组合窗口优化参数分布图,用得到的理论数据指导处理频谱成分适中的实物实验,有效提高了复合光栅实时三维测量精度。数字模拟和实验均证实了该方法的有效性和适用性。

**关键词** 测量;相位测量轮廓术;复合光栅;新组合窗口;优化设计;测量精度

**中图分类号** TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.1008005

## New Method for Improving the Accuracy of Real-Time Three-Dimensional Measurement Based on a Composite Grating

Zhang Rui Cao Yiping He Dinggao

(Department of Opto-Electronics, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China)

**Abstract** A new method for improving accuracy of real-time three-dimensional (3D) measurement based on a composite grating is proposed. By analyzing the composite phase measuring profilometry (PMP), it is found that phase demodulation precision is related to filtering window choice when demodulating the deformed phase shift stripes from a deformed composite grating. By analyzing and comparing several common filtering windows, a new kind of filtering window which is combined Hanning and rectangular window together is designed. Because filtering precision is related to distribution of spectrum, by digital simulating Peaks-function object in 3D measurement based on a composite grating, distribution of optimized parameters of combined window is obtained. Using these data, the proper object in experiment to improve the accuracy of real-time 3D measurement based on a composite grating can be realized. Both simulating and actual experimental results prove the method's effectiveness and practicability.

**Key words** measurement; phase measuring profilometry; composite grating; new combined window; optimized design; measurement precision

**OCIS codes** 120.2830; 120.5050; 120.5060; 120.4570

## 1 引言

相位测量轮廓术(PMP)<sup>[1~4]</sup>是一种非接触的光学三维面形测量技术,广泛应用于工业检测、逆向工程及机器视觉<sup>[5~8]</sup>等领域。传统 PMP 通常需要投影 3 帧或 3 帧以上光栅条纹图并且采集相应的变形光栅条纹图,才能实现对物体的一次测量,测量速度

慢,难以适应实时测量的需要。为此 C. Guan 等<sup>[9]</sup>提出投影复合光栅进行三维测量的方法,实现了对物体三维面形实时测量的目的。根据复合光栅相位测量轮廓术原理,在物体重建过程中,需要通过有效的滤波过程将携带相移光栅频谱信息的成分分离出来,并进行相位计算、相位展开、高度标定等后续计

收稿日期: 2011-05-13; 收到修改稿日期: 2011-06-13

基金项目: 国家 863 计划(2007AA01Z333)、国家重大专项(2009ZX02204-008)和四川省学术和技术带头人培养基金(07GRC-01)资助课题。

作者简介: 张睿(1985—),女,硕士研究生,主要从事三维光学信息处理方面的研究。E-mail: zhangruiwl@163.com

导师简介: 曹益平(1962—),男,博士,教授,主要从事光学三维传感、光信息处理和光机电一体化等方面的研究。

E-mail: caoyiping@mail.sc.cninfo.net

算并最终恢复出物体高度。因此,滤波过程是影响物体重建精度的一个重要环节。

常见的滤波窗主要有:三角窗、海宁窗、汉宁窗和矩形窗。在对上述4种窗函数的滤波性能比较分析后,本文设计了一种组合滤波窗并通过对其优化设计进一步提高了相位提取和复合光栅三维测量<sup>[10]</sup>的精度。

## 2 复合光栅相位测量轮廓术原理

相位测量轮廓术具有较高的测量精确度,用来获取三维物体的细节特征。但需要多次投影,测量速度较慢。为此 C. Guan 等<sup>[9]</sup>提出投影一帧复合光栅进行三维测量的方法,测量速度有所提高。实验原理如图1所示。首先,设计出一组  $N$  帧相移光栅图像,其数学表达式为

$$I_n^0(x, y) = a + b\cos(2\pi\eta_y y - 2\pi n/N), \quad (n = 1, 2, \dots, N) \quad (1)$$

式中  $a$  表征背景光强,  $b/a$  表征条纹对比度,  $\eta_y$  为相移光栅的基频。用  $N$  帧与相移光栅正交且不同频率  $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n$  的载频光栅分别对应调制各相移光栅  $I_1^0(x, y), I_2^0(x, y), \dots, I_n^0(x, y)$ , 经叠加生成图1(a)

所示的复合光栅图像,即

$$I^0(x, y) = c + d \sum_{n=1}^N I_n^0(x, y) \cdot \cos(2\pi\xi_n x), \quad (2)$$

式中  $c$  和  $d$  分别表征各载频光栅的背景光强和条纹对比度。将其投影到图1(b)所示的待测物体上,经 CCD 采集获得的变形复合光栅图像如图1(c)所示

$$I(x, y) = c + d \sum_{n=1}^N [a + b\cos(2\pi\eta_y y + \phi - 2\pi n/N)] \cos 2\pi\xi_n x, \quad (3)$$

式中  $\phi$  为物体的高度引起的相移光栅相位变化  $\phi(x, y)$  的简写形式, 将其进行快速傅里叶变换 (FFT) 得到图1(d)所示的频谱图, 设置3个滤波窗口分别滤出各相移光栅频谱成分, 如图1(e)所示。对其分别做逆快速傅里叶变换 (IFFT) 并取模运算得到图1(f)所示的表征 PMP 各步相移的变形条纹  $I_n(x, y)$

$$I_n(x, y) = a + b\cos(2\pi\eta_y y + \phi - 2\pi n/N). \quad (4)$$

从(4)式中计算出物体的截断相位分布, 再通过相位展开算法<sup>[11~13]</sup>得到物体的连续相位分布, 最后根据相位与高度的映射关系<sup>[14]</sup>, 就可以重构出物体的高度分布  $h(x, y)$ 。

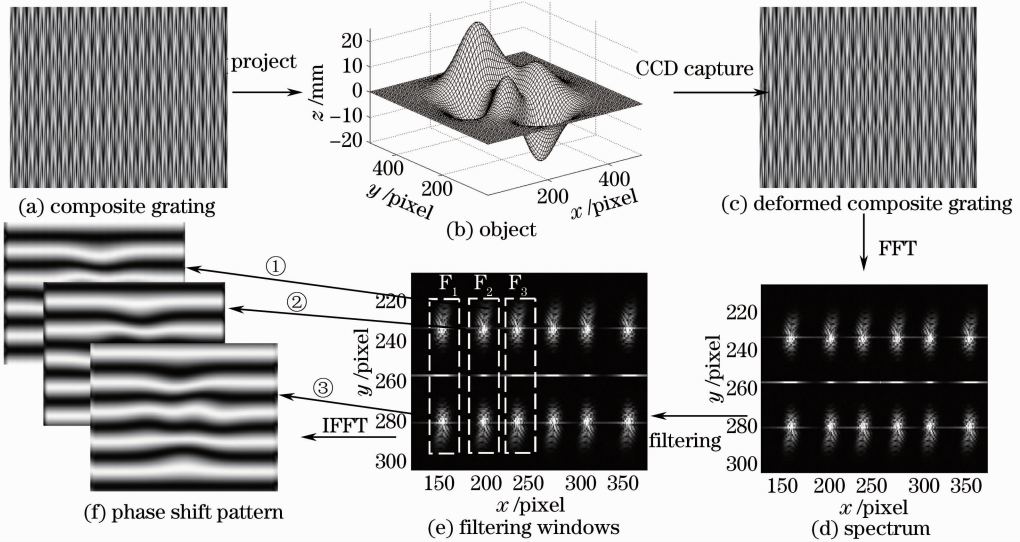


图1 复合光栅相位轮廓术原理图

Fig. 1 Composite phase measuring profilometry

上述描述表明了图1(e)中滤波窗形状的选择直接影响到解调相移光栅频谱成分的精度, 因此正确选择滤波窗是提高复合光栅实时三维测量精度的关键。

## 3 组合窗的提出

为了比较各个滤波窗的滤波性能, 以图1中高

度为 25 mm 的 Peaks 函数形物体为例, 在复合光栅相位轮廓术中分别采用上述4种滤波窗在不同窗口宽度下进行滤波并实现物体重建, 比较测量精度。其中测量精度用均方差  $\sigma_{rms}$  来表征, 即物体的重建高度与实际高度的误差均方根 (RMS)。如图2所示, 横坐标为窗口宽度  $L_x$ , 纵坐标为不同窗口宽度下的  $\sigma_{rms}$ 。

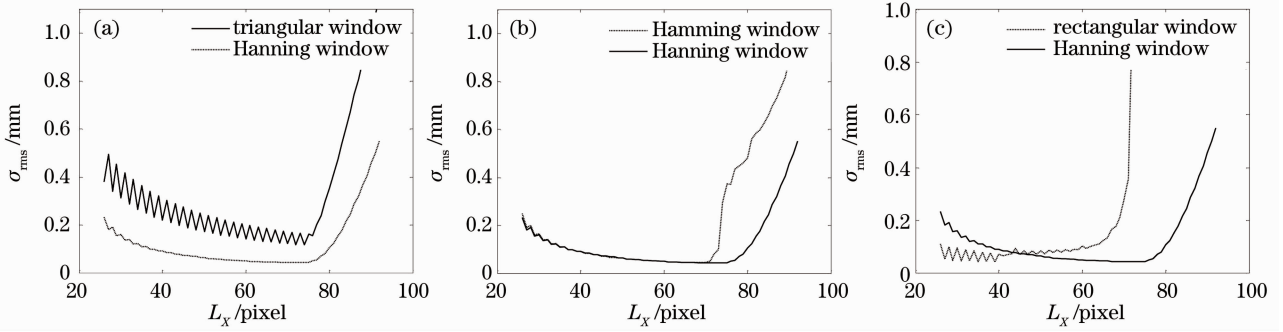


图2 各窗函数均方差曲线

Fig. 2 RMS curve for each window

由图2可以得出结论:1)各个频段下,汉宁窗滤波性能都明显优于三角窗和海明窗;2)汉宁窗在高频段滤波效果优于矩形窗,矩形窗在低频段滤波效果优于汉宁窗。为此,结合该两种滤波窗各自的优点,设计出一种组合窗:高频段使用汉宁窗,低频段使用矩形窗。其函数图如图3所示,其中横坐标为归一化的窗口宽度 $X$ , $\alpha$ 表示矩形部分占窗口总宽度的比例(图中以 $\alpha=0.5$ 为例)。纵坐标为窗口透射率 $Y$ 。由图3可以得出结论:1)当 $\alpha=0$ 时,为汉宁窗函数;2)当 $\alpha=1$ 时,为矩形窗函数;3)当 $0 < \alpha < 1$ 时为组合窗函数。

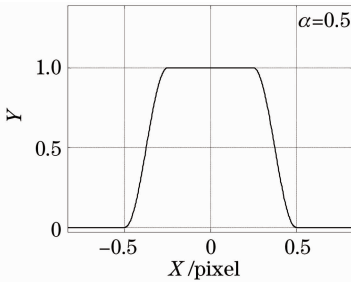


图3 组合窗函数

Fig. 3 Function of combined

为了研究所设计的组合窗的滤波优越性,如图4所示,分别比较了汉宁窗和矩形窗的RMS曲线。由图4(a)中可以看出,所设计的组合窗在各频段其滤波性能始终优于汉宁窗;由图4(b)可以看出,所设计的组合窗在大部分的高频段,其滤波效果明显优于矩形窗,只在很小部分的低频段稍逊色于矩形窗,并且在实际测量中也是高频段居多。因此综合图4可以得出结论:将组合窗用于复合光栅相位测量轮廓术中对于提高相移光栅频谱成分的提取精度和待测物体的三维重构精度是有效的。

#### 4 组合窗的优化设计

图4的实验结果是在 $\alpha=0.5$ 时得到的,研究发

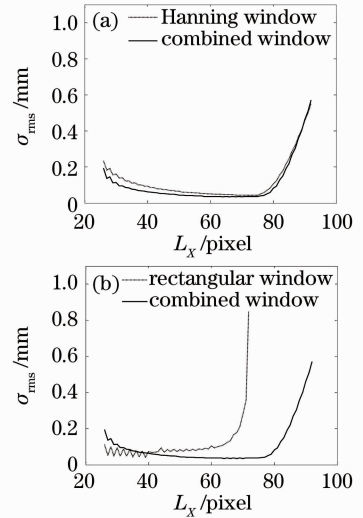


图4 均方差曲线图

Fig. 4 RMS curves

现,当窗口宽度确定,组合窗的滤波精度会随 $\alpha$ 的变化而发生变化,因此需要进一步对组合窗进行优化设计,找到滤波精度最高时不同的窗口宽度所对应的最优化的 $\alpha$ 值。

现对组合窗的优化设计进行数字模拟实验。实验中,取 $N=3$ ,复合光栅大小为 $512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$ ,对图5(a)中峰值高度为 $25 \text{ mm}$ 的Peaks函数物体进行数字模拟。在复合光栅相位测量轮廓术中,通过改变组合窗在指定窗口宽度下的窗口参数 $\alpha$ ,求出各测量精度并做出RMS分布图,如图5(b)所示。图中的白色曲线为整个误差曲面的‘脊’,曲线上的点所对应的竖坐标为误差均方根的绝对值最小值,将其投影得到图5(c),曲线上各点对应的横、纵坐标就表示相对最优化的窗口参数。从图中可以看出,当窗口宽度取 $L_x=50 \text{ pixel}$ 时,对应最优化的参数 $\alpha=0.38$ 。若不对组合窗进行优化,取 $L_x=50 \text{ pixel}$ , $\alpha=0.5$ 的组合窗参与滤波,得到的物体误差分布图如图5(d)所示,此时计算得误

差均方根  $\sigma_{\text{rms}} = 0.0437 \text{ mm}$ ; 当采用优化后的组合窗参与滤波时, 得到的物体误差分布图如图 5(e) 所示, 此时计算得误差均方根  $\sigma_{\text{rms}} = 0.0247 \text{ mm}$ 。测量精度得到改善, 从而充分体现了组合窗优化设计的有效

性和必要性。

为了进一步评价该组合窗的滤波有效性, 对高度分别为 5, 10, 15, 20 和 25 mm 的平面进行了测量, 其绝对误差  $\delta$ 、平均相对误差  $s$ 、均方差  $\sigma_{\text{rms}}$  如表 1 所示。

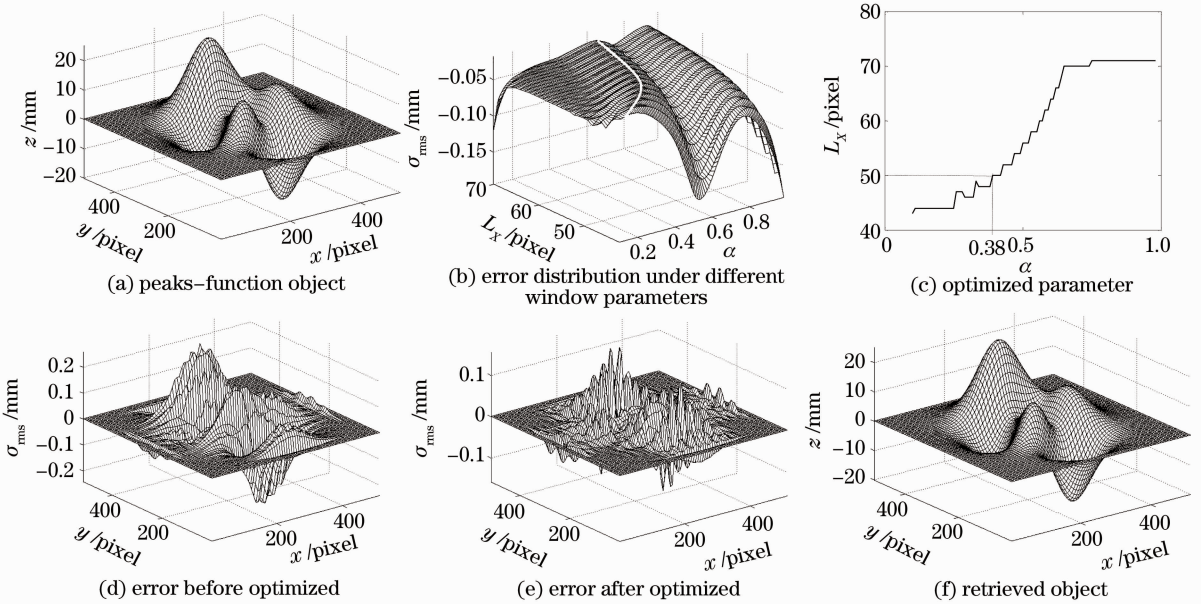


图 5 组合窗优化设计及模拟结果

Fig. 5 Optimized design of combined window and simulating results

表 1 不同高度平面的测量误差

Table 1 Measurement errors of different height planes

$h / \text{mm}$	5		10		15		20		25	
	Normal	Optimized	Normal	Optimized	Normal	Optimized	Normal	Optimized	Normal	Optimized
$\delta / \text{mm}$	0.23	0.11	0.31	0.16	0.38	0.18	0.43	0.22	0.53	0.33
$s / \%$	2.18	1.20	2.05	0.90	2.12	0.73	1.98	0.65	1.81	0.88
$\sigma_{\text{rms}} / \text{mm}$	0.11	0.06	0.21	0.09	0.32	0.11	0.40	0.13	0.45	0.22

从表 1 可以看出, 无论在绝对误差、相对误差还是均方差, 优化后的组合窗不仅能有效获取物体三维信息, 而且可以有效提高改善测量精度。为了验证组合窗优化设计的实用性, 对图 6(a) 中的频谱成分适中的心形物体进行了测量。图 6(b) 为 CCD 采

集的变形复合光栅图像, 图 6(c) 为优化前的组合窗处理实验数据得到的物体面部三维轮廓, 图 6(d) 为优化后的组合窗处理实验数据得到的物体面部三维轮廓, 可见该优化方案有较好的重建效果。

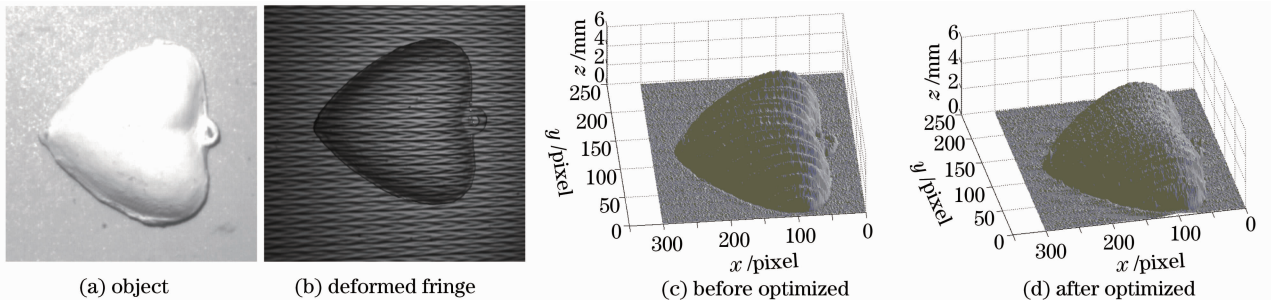


图 6 实验结果

Fig. 6 Experiment results

## 5 结 论

介绍了复合光栅相位测量轮廓术原理,通过比较4种常见的滤波窗的滤波性能,提出采用组合滤波窗提高复合光栅实时三维测量精度的方法。并通过数字模拟和实物实验对组合窗进行进一步的优化设计,证明了采用组合窗来提高复合光栅相位轮廓术精度的有效性和适用性。

## 参 考 文 献

- 1 V. Srinivasn, H. C. Liu, M. Halioua. Automated phase-measuring profilometry of 3-D diffuse objects[J]. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(18): 3105~3108
- 2 Zhong Lijun, Cao Yiping, Yu Ruizhi. Improved algorithm adapting to on-line 3D inspection[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(6): 1503~1507  
钟立俊,曹益平,喻睿智.一种适合在线三维检测的改进算法[J]. *中国激光*, 2009, **36**(6): 1503~1507
- 3 Li Yong, Su Xianyu. New method for system calibration in phase measurement profilometry with large view field[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(8): 1162~1163  
李勇,苏显渝.一种大视场相位轮廓术系统标定方法[J]. *光学学报*, 2006, **26**(8): 1162~1163
- 4 Song Wanzhong, Su Xianyu, Cao Yiping *et al.*. A new method of three-dimensional coordinates calibration in phase measuring profilometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(3): 273~277  
宋万忠,苏显渝,曹益平等.相位测量轮廓术中三维坐标校准新方法[J]. *光学学报*, 2003, **23**(3): 273~277
- 5 Yang Xichen. Laser processing robot and its industrial applications[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(11): 2780~2798  
杨洗陈.激光加工机器人技术及工业应用[J]. *中国激光*, 2009, **36**(11): 2780~2798
- 6 Liu Zhen, Zhang Guangjun, Wei Zhenzhong *et al.*. An accurate calibration method for line structured light vision sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(11): 3124~3128  
刘震,张广军,魏振忠等.一种高精度线结构光视觉传感器现场标定方法[J]. *光学学报*, 2009, **29**(11): 3124~3128
- 7 Xu Gang, Zhang Wenming, Li Haibin *et al.*. Binocular stereo vision method based on wavelet multi-resolution mesh generation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(4): 1021~1024  
徐刚,张文明,李海滨等.基于小波多分辨率网格划分的双目立体视觉方法[J]. *光学学报*, 2009, **29**(4): 1021~1024
- 8 Liu Tianliang, Luo Limin. Segmentation-based stereo matching algorithm with variable support and disparity estimation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(4): 1002~1009  
刘天亮,罗立民.一种基于分割的可变权值和视差估计的立体匹配算法[J]. *光学学报*, 2009, **29**(4): 1002~1009
- 9 C. Guan, L. Hassebrook, D. Lau. Composite structured light pattern for three-dimensional video [J]. *Opt. Express*, 2003, **11**(5): 406~417
- 10 He Dinggao, Cao Yiping. Optimized design of composite grating based on PMP [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008, **35**(2): 128~133  
何定高,曹益平.基于相位测量轮廓术的复合光栅优化设计[J]. *光电工程*, 2008, **35**(2): 128~133
- 11 Kang Xin, He Xiaoyuan, C. Guan. Phase unwrapping using the least cross-section-difference [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(7): 647~651  
康新,何小元, C. Guan. 基于最小截面差的相位展开[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(7): 647~651
- 12 Su Xianyu, Chen Wenjing, Cao Yiping *et al.*. Phase unwrapping algorithm based on the oriented parameter map [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2004, **15**(4): 463~467  
苏显渝,陈文静,曹益平等.参数图导向的相位展开方法[J]. *光子学报*, 2004, **15**(4): 463~467
- 13 Zhang Bin, Song Yang, Song Yizhong *et al.*. Flow field moire tomography based on phase unwrapping and a new iterative reconstruction algorithm [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(4): 531~536  
张斌,宋阳,宋一中等.基于相位展开和一种新的迭代重建算法的流场莫尔层析术[J]. *中国激光*, 2006, **33**(4): 531~536
- 14 Li Wansong, Su Xianyu, Su Likun. Phase-measuring in big scale measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(6): 792~796  
李万松,苏显渝,苏礼坤.相位检测面形术在大尺度三维面形测量中的应用[J]. *光学学报*, 2000, **20**(6): 792~796