

doi: 10.3788/gzxb20144305.0512006

离焦条纹投影三维测量中正弦光栅的二值化方法研究

高鹏, 李勇, 涂颜帅, 王健

(浙江师范大学 信息光学研究所, 浙江 金华 321004)

摘 要: 采用离焦二值条纹投影技术进行三维面形测量可以克服数字投影仪的非线性响应, 同时有利于提高投影速度, 实现高速测量. 通过理论分析和实验研究了采用数字投影仪时二值条纹的基频、高次谐波能量分布与条纹周期的关系. 结合相移算法, 以相位测量误差为指标, 衡量各种二值条纹的性能. 研究表明: 在周期小时, 罗奇光栅和二维误差扩散算法生成的二值条纹离焦后能产生正弦性较好的条纹; 在采用满周期等间隔奇数次相移时, 罗奇光栅离焦能获得更高的测量准确度; 在周期大时, 采用优化脉宽调制方法得到的二值光栅离焦测量准确度最高. 研究结果为离焦条纹投影三维测量中二值光栅的选择提供了依据.

关键词: 光学三维测量; 二值条纹; 低通滤波; 正弦条纹

中图分类号: O436.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)05-0512006-7

Binarization Methods of Sinusoidal Grating in 3D Measurement Base on Defocused Fringe Projection

GAO Peng, LI Yong, TU Yan-shuai, WANG Jian

(Institute of Information Optics, Zhejiang Normal University, Jinhua, Zhejiang 321004, China)

Abstract: The non-linear intensity response of digital projector can be eliminated in 3D shape measurement using defocused binary fringe projection technique. The speed of projecting can be increased and it is possible to realize high speed measurement as well. Typical binary fringes used in digital projection were adopted as a study subject. The relation between the fundamental frequency, higher harmonics and fringe period of binary fringe was studied through the theoretical analysis and experiments. According to suitable phase shifting algorithm, the performance of various binary fringes was measured using the measurement error of phase as its target. The results showed that sinusoidal fringe with high performance could be generated by defocusing the Ronchi grating and pattern generated using 2D error diffusion algorithm under the condition that fringe with short period was adopted. The measurement accuracy of defocused Ronchi grating was higher than that of other pattern, when the algorithm of odd step phase-shifting with equal interval in one period was used for 3D measurement; the highest measurement accuracy was obtained by using defocused optimal pulse width modulation fringe, when the period of fringe was long. The research results provide the evidence for selection of binary grating in the 3D measurement based on defocused projection.

Key words: Optical 3D measurement; Binary fringe; Low-pass filtering; Sinusoidal fringe

OCIS Codes: 120.6650; 110.6880; 120.2650

基金项目: 国家自然科学基金(No. 61205012)和浙江省公益性技术应用研究计划项目(No. 2012C31005)资助

第一作者: 高鹏(1987-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为光学三维传感. Email: keaixiaohu-ya@163.com

导师(通讯作者): 李勇(1972-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为数字全息、光学三维传感及三维显示. Email: liyong@zjnu.cn

收稿日期: 2013-08-22; 录用日期: 2013-10-24

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

0 引言

光学三维测量技术具有非接触、速度快、准确度高、自动化程度高等优点,被广泛应用于机器视觉系统、逆向工程技术、医疗诊断和医学美容、人体测量、制造业等领域^[1-3].在条纹投影三维面形测量中,由于目前普遍使用的商用投影仪不易做到线性光强响应,条纹要经过预先校正,这会降低条纹的对比度及光能利用率.对正弦条纹进行二值化,或采用二值信号合成包含所需正弦光场的方法实现正弦条纹投影可以避免投影仪非线性光强响应这一问题,同时有利于提高投影仪的图像刷新率.正弦条纹二值化的代价是投影光场中出现高次谐波,不利于测量.然而,采用合适的二值图案离焦投影可以得到良好的相位测量准确度,同时提高光能的利用率.人们在能产生正弦光场的二值图案方面作了大量的研究.苏显渝等^[4]1992年提出使用罗奇光栅离焦投影(后来也称之为二值条纹离焦技术-Squared Binary Defocusing Technique, SBM)结合适当的相移算法可以得到高准确度的测量结果. Zhang, S等^[5]将罗奇光栅离焦投影方法用于数字投影仪,提高了数字光处理(Digital Optical Procession, DLP)投影仪的刷新速率并解决了非线性 Gamma 效应的影响,实现快速的正弦条纹投影. SU Wei-hua 等^[6-7]设计面积编码的光栅用于离焦投影,能提高相位测量准确度.李平平、张启灿^[8]提出面积编码的新方法,可以减小频域的量化噪音,提高投影条纹的正弦性.苏显渝^[9]提出用二元误差扩散编码的方法获得高准确度的正弦投影光场. Ayubi 等人^[10]提出脉宽调制方法(Sinusoidal Pulse Width Modulation, SPWM),在正弦条纹中加入载频并限幅,使其变为二值条纹,离焦后可得到正弦条纹. Wang 和 Zhang^[11]借鉴电力电子系统消除谐波的方法,提出优化的脉宽调制方法(Optimal Pulse Width Modulation, OPWM).该方法能消除特定阶次的谐波,通过轻微离焦能获得高质量的正弦条纹. Zhang^[12]设计了面积调制的二值条纹离焦投影得到正弦光场. Wang 和 Zhang^[13]通过实际三维测量比较 SBM、SPWM 和 OPWM 3种产生二值条纹方法的优缺点.

目前尚未有文献对提出的各种二值图案进行全面的的研究以及根据图案频谱特点提出合适的相移算法.本文对数字投影中常用的 SBM、SPWM、OPWM 和误差扩散等算法^[14]生成的二值图案从基频、高次谐波能量及频谱特点等方面进行研究,比较各种方法的性能,提出对应的相移算法并给出了理论分析和实验验证.

1 原理

1.1 投影仪离焦对光场的影响

离焦的光学系统相当于一个低通滤波器^[4,15-17],通

过离焦滤除高次谐波,在商用投影仪上容易得到质量较高的正弦条纹.投影仪离焦后的点扩散函数可以写成二维的高斯函数,即

$$h(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1)$$

式中 $\sigma = kR$ 是扩散参量即高斯函数的标准差, $k > 0$ 是一个比例系数.因为投影仪系统是圆形孔径,一个物点离焦后的模糊图像在成像平面为圆形,称之为模糊圆, R 是模糊圆的半径,即

$$R = s \cdot [f^{-1} - u^{-1} - s^{-1}] \cdot D/2 \quad (2)$$

f 为投影仪镜头焦距, u 为物距, s 为模糊圆像面到投影仪镜头的距离, D 为投影仪镜头的直径.根据薄透镜成像公式,得

$$f^{-1} = u^{-1} + v^{-1} \quad (3)$$

式中 v 为像距.从式(2)可看出,离焦成像分两种情况, $s > v$ 或者 $s < v$,从而导致 R 可能取正值或者负值.由 $\sigma = kR$ 可知, σ 和 R 成正比,从式(2)可看出 R 和 s 成正比,所以 σ 和 s 也成正比.

假设二值条纹光强为 $f(x, y)$,二值条纹经过投影仪离焦投影后得到条纹的光强为 $g(x, y)$.投影系统可看成衍射受限非相干线性空不变成像系统,物像关系满足

$$g(x, y) = f(x, y) * h(x, y) \quad (4)$$

$*$ 表示卷积运算,对式(4)进行傅里叶变换,则频域表达式为

$$G(u, v) = F(u, v) H(u, v) \quad (5)$$

式中, $H(u, v)$ 是式(1)的傅里叶变换,即

$$H(u, v) = \exp\left(-\frac{1}{2}(u^2 + v^2)\sigma^2\right) \quad (6)$$

$H(u, v)$ 相当于一个滤波器,对 $F(u, v)$ 进行滤波处理得到 $G(u, v)$.由于 $H(u, v)$ 是一个高斯函数,由高斯函数的特性可知,离焦的光学系统相当于低通滤波器,可滤除高次谐波分量.滤波器的宽窄主要由 σ 决定,根据 σ 和 s 的关系可得, s 越大, σ 越大,滤波器就越窄,滤除的高次谐波越多,同时基频也被削弱得越多;离焦距离 s 越小, σ 越小,滤波器越宽,滤除的高次谐波越少.

1.2 二值条纹频谱分析

周期为 54 的 6 种常见条纹图案例子如图 1,分别为正弦条纹图案、SBM 条纹图案、SPWM 条纹图案、OPWM 条纹图案,一维误差扩散条纹图案和二维误差扩散条纹图案.图 2 为相应的频谱,从图 2(b) 看出 SBM 频谱中各频率分布均匀,谐波分量幅值随阶次的增高而降低.从图 2(c)~2(e) 看出 SPWM、OPWM 和一维误差扩散的频谱各频率分布不均,其幅值无规则变化,高频分量远离低频,有利于通过低通滤波消除高频分量.从图 2(f) 看出二维误差扩散的频谱中高次谐波幅值较低,但是频谱中基频能量没有 SBM 条纹的高.

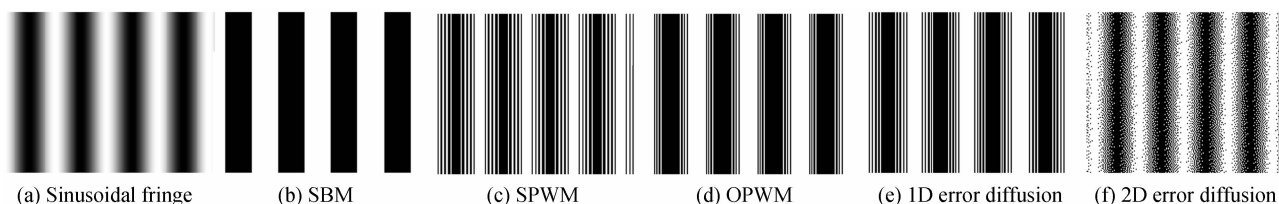


图 1 6 种条纹图案的模版

Fig. 1 Example of six different patterns

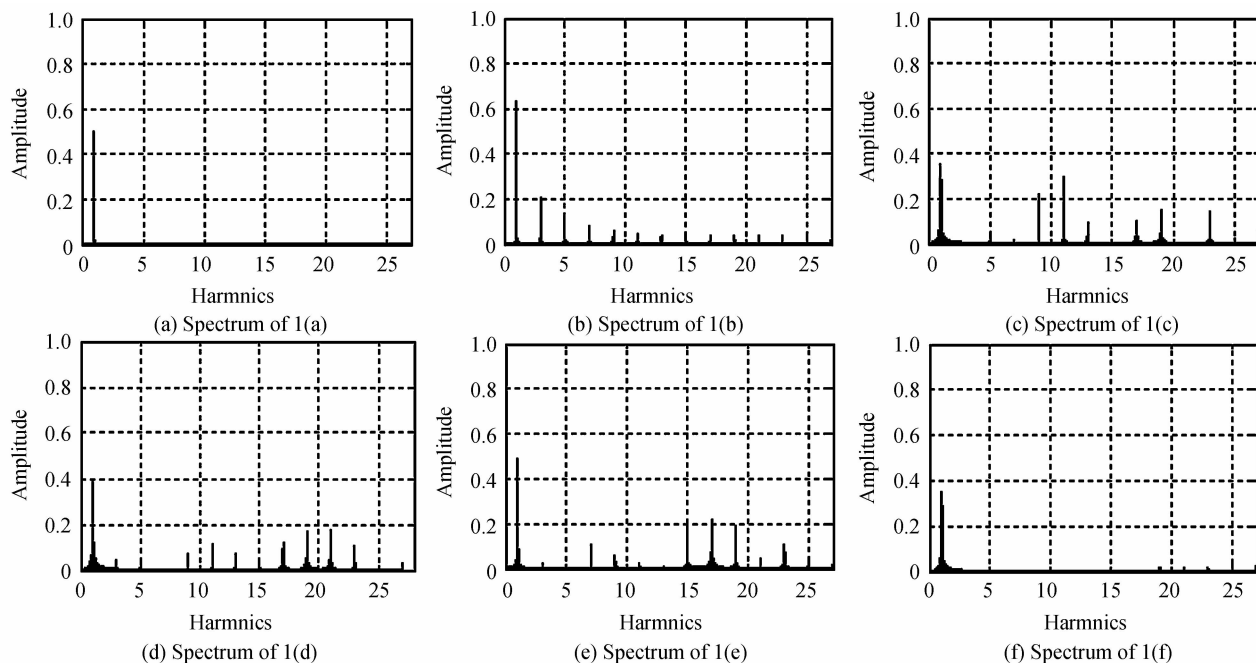


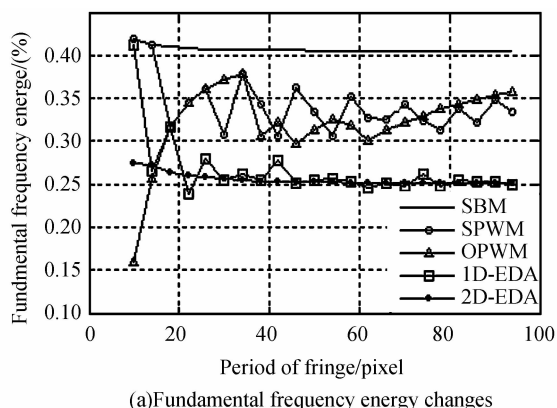
图 2 6 种条纹图案的频谱图

Fig. 2 Spectrum of six different patterns

由于数字投影仪由离散的像素构成,实际投影的图案是对连续分布的条纹图案采样,采样频率不同,会导致投影图案谐波成分变化。

图 3 为 SBM, SPWM, OPWM 和一维与二维误差扩散方法产生的条纹频域能量比较,条纹每周期采样点从 10 到 94 像素,间隔 4 像素选取. SBM 和二维误差扩散方法条纹的基频能量随着每周期采样点的变化基本保持平稳. SPWM, OPWM 和一维误差扩散方法条纹的基频能量随采样点波动变化. 随着每周期采样点的增大,5 种方法的条纹频谱中 5 次和 7 次谐波的能量逐渐减小,并趋于稳定. SBM 和二维误差扩散方法的变化比 SPWM, OPWM 和一维误差扩散方法的变化更明显. 条纹每周期采样点较少时,脉宽调制的方法和误差扩散算法都无法实现优化作用,可能还会产生更差的效果;条纹每周期采样点适中时,优化的方法可以起到一定的作用,效果不明显;条纹每周期采样点较多时,5 种方法的 5 次、7 次谐波能量趋于稳定. 结合图 2 和图 3 可知,在每周期采样点数较多情况下采用调制法、误差扩散法可以把二值化的误差搬到远离基频的高频区,从而实现轻微离焦

就能得到正弦性好的条纹, SPWM 和 OPWM 的基频能量高于误差扩散法的. 而 SBM 条纹基频能量虽然最高,但在同样的投影仪放大率下,能量大的谐波与基频距离近,需要大的离焦才能得到正弦性好的条纹. 在每周周期采样点数较少的情况下,调制法产生的条纹中能量大的谐波与基频较接近,并且某些情况下能量大于 SBM 条纹,同等离焦情况下条纹正弦性差. 二维误差扩散条纹正弦性好,但基频能量低于 SBM 条纹. 而 SBM 条纹由于基频能量比其他条纹都大,且此时高次



(a) Fundamental frequency energy changes

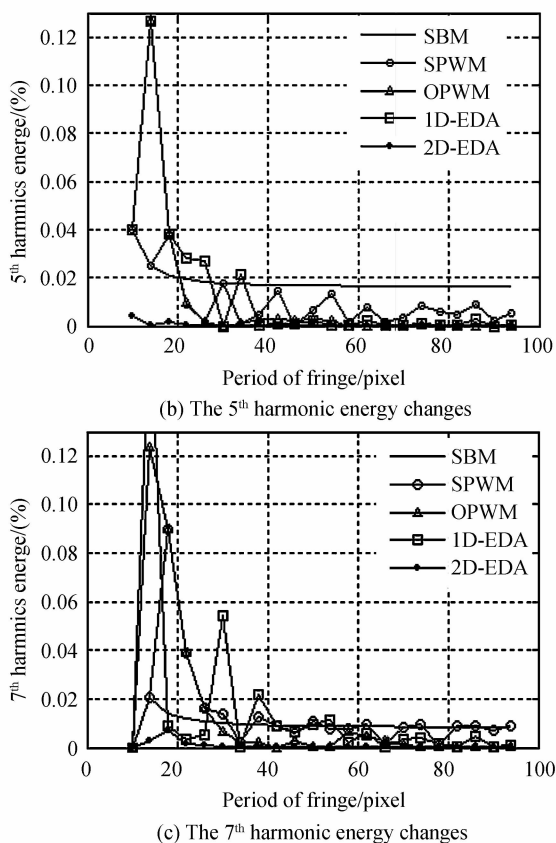


图3 二值图案在不同采样频率时频谱能量分布
Fig. 3 Spectral energy distribution of binary pattern at the different sampling frequency

谐波远离基频,同等离焦情况下性能最好.

1.3 相移算法

由图案频谱分析可知,具有半周期对称性的二值条纹空间频谱中只有奇数次谐波.因此,采用满周期等间隔奇数次相移法求相位可以得到较高的测量准确度.根据相移法原理,至少需要3幅有一定相移的图像才能获得相位.本文以满周期等间隔三步相移算法进行实验.在无相移误差时,满周期等间隔三步相移算法计算得到的相位误差主要由2,4,5,7,8,10,11,...次谐波分量决定^[15].相位误差主要由5次以上谐波引起,只要抑制该部分谐波,测量准确度就能显著提高.

设摄像机获取的3幅变形条纹强度分别为

$$I_1(x,y) = A(x,y) + B(x,y)\cos[\varphi(x,y) - 2\pi/3] \quad (7)$$

$$I_2(x,y) = A(x,y) + B(x,y)\cos[\varphi(x,y)] \quad (8)$$

$$I_3(x,y) = A(x,y) + B(x,y)\cos[\varphi(x,y) + 2\pi/3] \quad (9)$$

式中 $A(x,y)$ 为背景光强, $B(x,y)/A(x,y)$ 为条纹对比度,联合式(7)~(9),求解得到相位值为

$$\varphi(x,y) = \arctan \left[\frac{\sqrt{3}(I_1 - I_3)}{2I_2 - I_1 - I_3} \right] \quad (10)$$

所得相位值 $\varphi(x,y)$ 是截断的,范围从 $-\pi$ 到 π ,为了获得连续的相位还要采用相位展开法进行相位展开.

2 实验及结果分析

2.1 实验条件

为研究在实际实验中5种方法的性能,采用DLP投影仪(XGA DMD,分辨率:1 024×768)和CCD摄像机(CM-200 MCL,分辨率1 200×1 600),搭建PMP测量系统,系统示意图如图4.首先将两种周期的条纹投影到平面上,研究条纹基频、高次谐波及相位测量误差与离焦程度之间的关系,同时研究物体表面反射率对测量准确度的影响,最后投影小周期条纹,对三维物体进行测量,比较SBM和二维误差扩散法图案测量噪声大小.

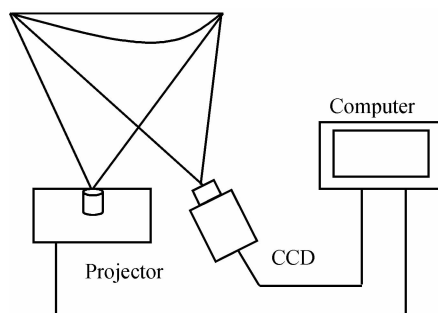


图4 PMP实验系统示意图
Fig. 4 The PMP experimental system diagram

2.2 大周期条纹性能实验

使用SBM、SPWM、OPWM、一维和二维误差扩散法等5种方法生成周期为30像素的二值条纹进行投影仪离焦实验.保持投影仪像面不变,通过移动被测物体的位置达到离焦效果,被测物体的移动方式如图5,其中B和C之间的平面为投影仪像面,当物体远离像面时,投射到物体表面的二值条纹图案变模糊即其已处于离焦状态.被测物体分为由像面向靠近投影仪(由C向D移动为负离焦)和远离投影仪(由B向A移动为正离焦)两个方向移动,此处离焦为白屏靠近投影仪移动.每次移动白屏后对摄像机进行调焦,保持其处于清晰成像状态.

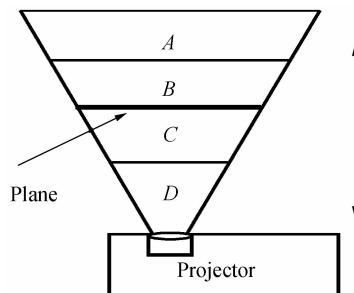


图5 投影仪通过焦平面位置的变化进行离焦
Fig. 5 Projector defocusing with changing of focal plane

从图6可看出,二值条纹投影离焦时,随着离焦程度增大,条纹正弦性提高,但其对比度下降.相同的离焦程度,OPWM测量误差最小.在离焦较小时,SPWM

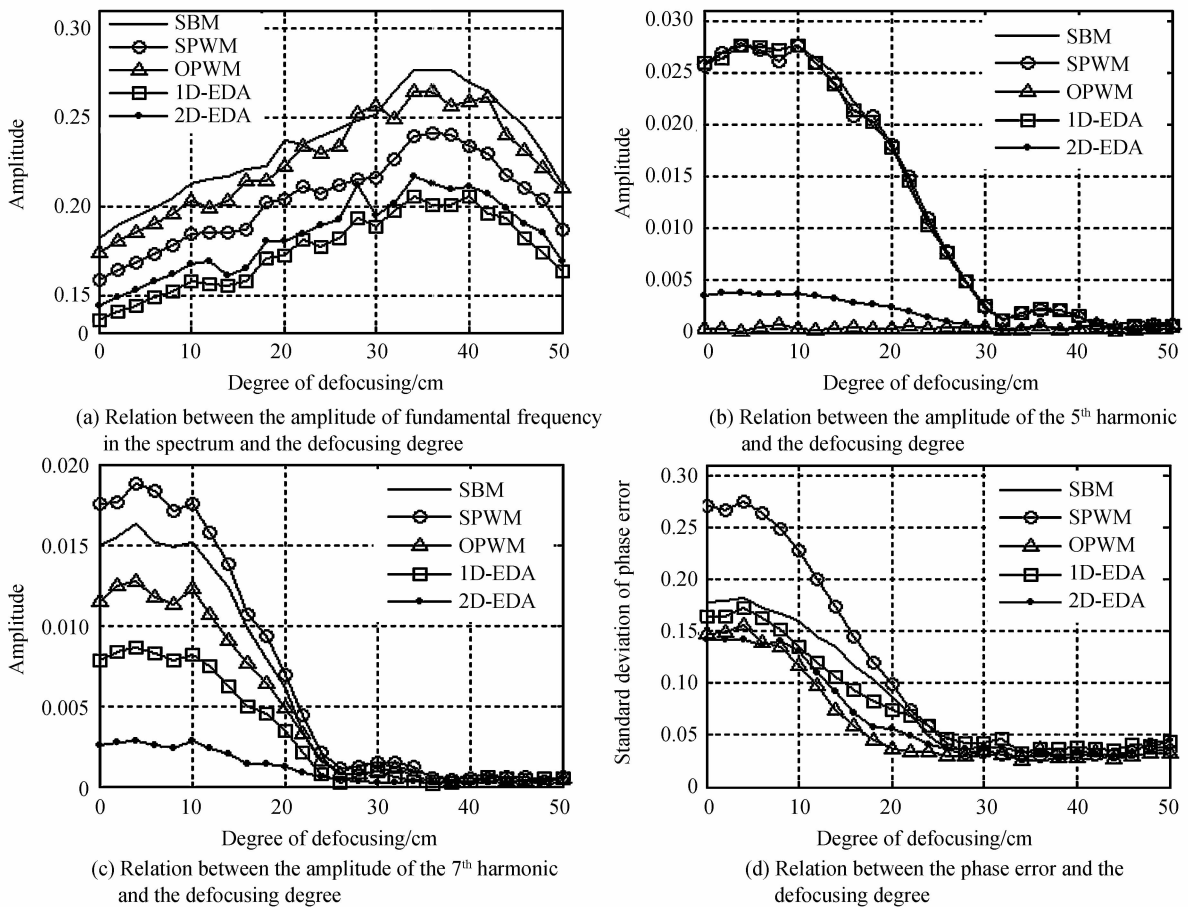


图 6 5 种方法生成的条纹离焦投影测量的结果

Fig. 6 Measurement result with five methods' fringes obtained under defocusing projection

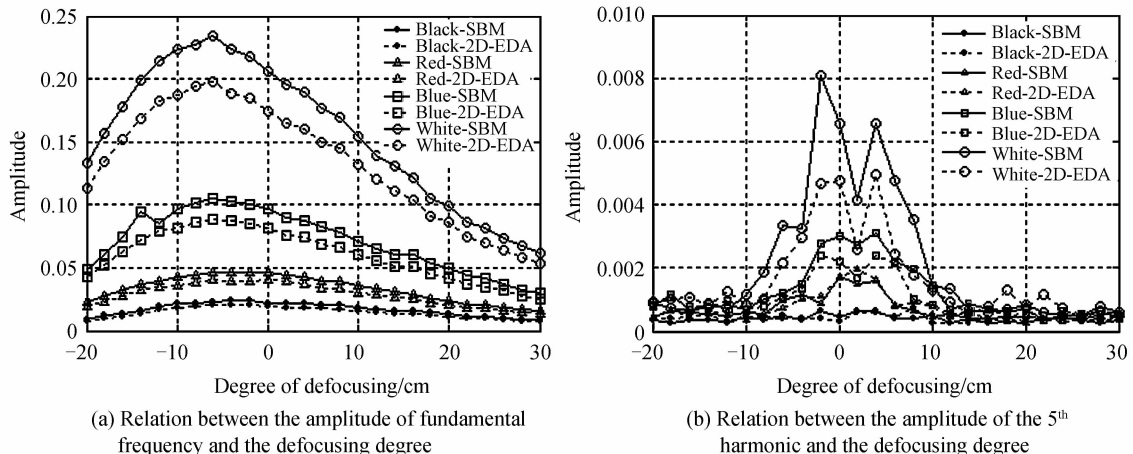
测量误差最大, 误差扩散算法条纹的测量误差介于 SBM 和 OPWM 之间. 离焦大到一定程度时, 各种条纹的测量误差趋于接近.

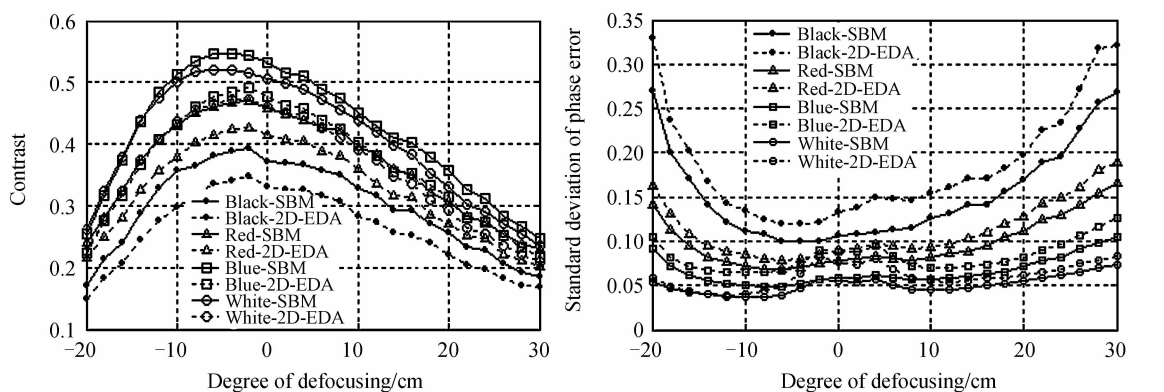
2.3 小周期条纹性能实验

由图 3 可知, 条纹每周期采样点数较少时, SPWM, OPWM 和一维误差扩散法不能起到优化的作用. 因此, 小周期条纹离焦实验不考虑这三种方法, 选择黑、红、蓝和白色 4 种颜色不同的纸张进行实验, 纸张表面粗糙程度接近. 用 SBM 和二维误差扩散方法生

成每周期采样点数为 12 的二值条纹进行离焦测量, 被测平面向投影仪方向移动最大距离为 20 cm, 向远离投影仪方向移动最大距离为 30 cm, 得到不同颜色表面的相位分布.

实验结果如图 7, 图中横坐标 0 为投影仪聚焦位置, 横坐标为负代表平面靠近投影仪移动, 横坐标为正代表平面远离投影仪移动, SBM 代表 SBM 条纹, 2D-EDA 代表二维误差扩散条纹. 对于黑白摄像机, 不同颜色表面相当于其对光的反射率不同. 从图中可看出





(c) Relation between the fringe contrast and the defocusing degree (d) Relation between the phase error and the defocusing degree

图 7 4 种不同颜色纸张进行实验的结果

Fig. 7 Experimental results of 4 kinds of color paper

物体表面反射率不同时,拍摄回条纹的对比度、基频和高次谐波能量也不同.条纹中基频幅值的关系为:白纸 > 蓝纸 > 红纸 > 黑纸;5 次谐波幅值的关系为:黑纸 > 红纸 > 蓝纸 > 白纸;条纹对比度的关系为:蓝纸 > 白纸 > 红纸 > 黑纸;测量相位误差有如下关系:黑纸 > 红纸 > 蓝纸 > 白纸.物体表面反射率高,拍摄回条纹的对比度较高,条纹中基频能量较大,高次谐波能量较小,测量误差小. SBM 条纹的对比度、基频和 5 次谐波幅值高于二维误差扩散算法的条纹.使用 SBM 条纹测量的

相位误差小于二维误差扩散条纹.从图中还可以看出,离焦大到一定程度时,测量误差反而会增加.这是由于基频被削弱太多,条纹对比度低,噪音影响了测量准确度.

2.4 复杂面形测量结果

选用 SBM 和二维误差扩散法生成相移量为 $2\pi/3$ 的三帧二值条纹,条纹周期为 12 像素.合适的离焦距离测量石膏像,通过解相位程序计算出石膏像的相位分布,分析相位测量噪音情况.图 8 为测量结果,从图 8

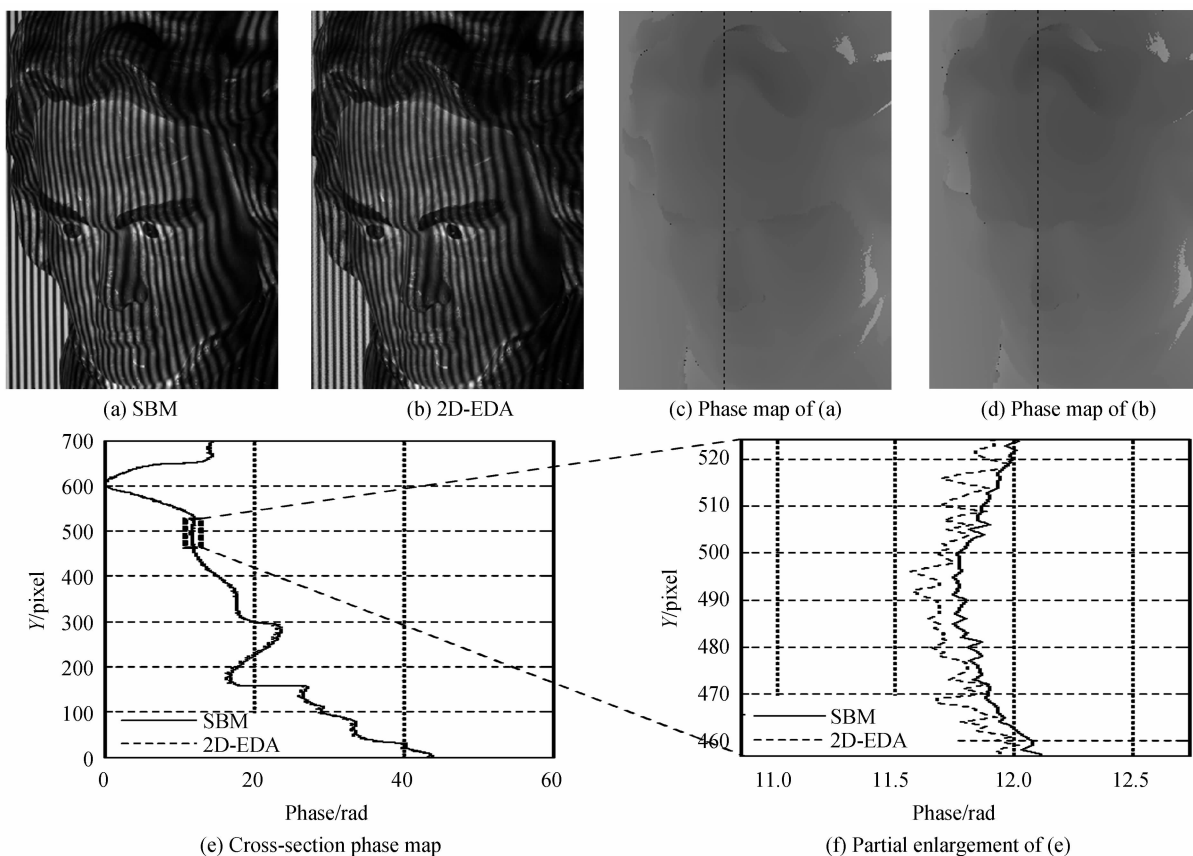


图 8 两种条纹测量结果的比较

Fig. 8 The comparison of measurement result

(a)和(b)看出离焦后两种条纹图案人眼观察相差无几,但测量结果差别较大.图8(e)为图8(c)和8(d)中虚线位置的截面图.图8(f)为图8(e)虚线框的局部放大图,从图8(f)可以看出,采用SBM条纹测得的相位较光滑,噪音较小.

3 结论

通过分析投影系统频域特性及数字投影中常用的5种二值条纹频谱特点,得出采用适当的二值条纹结合相应的相移算法,可以实现高准确度的相位测量.通过分析条纹频谱与周期的关系可得:1)采用满周期等间隔奇数次相移获得的测量准确度高;2)条纹周期较大(如大于20像素)时,OPWM的二值条纹测量准确度高,SPWM次之,SBM最低,误差扩散算法的离焦程度介于SBM和OPWM之间;3)条纹周期较小(如小于20像素)时,使用SBM条纹测量得到的相位误差比二维误差扩散算法小.

参考文献

- [1] GORTHI S S, RASTOGI P. Fringe projection techniques: Whither we are[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2010, **48**(2): 133-140.
- [2] SU Xian-yu, ZHANG Qi-qian. Dynamic 3D shape measurement method: A review [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2010, **48**(2): 191-204.
- [3] XUE Kang, LI Yong. Redundancy encoding method for three-dimensional shape measurement based on binary spatiotemporal encoded illumination [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(12): 2163-2167.
薛康,李勇. 二值时空编码照明三维测量中的冗余编码方法 [J]. *光子学报*, 2010, **39**(12): 2163-2167.
- [4] SU Xian-yu, ZHOU Wen-sheng *et al.* Automated phase-measuring profilometry using defocused projection of a Ronchi grating [J]. *Optics Communication*, 1992, **94**(6): 561-573.
- [5] LEI Shuang-yan, ZHANG Song. Flexible 3D shape measurement using projector defocusing [J]. *Optics Letters*, 2009, **34**(20): 3080-3082.
- [6] SU Wei-hung, KUO Cho-you, YIN Shi-zhu. Design and fabrication of various digital fringe patterns for projected fringe profilometry [C]. Washington DC: SPIE, 2004: 193-203.
- [7] SU Wei-hung, LIU Hong-yu, REICHARD K, *et al.* Fabrication of digital sinusoidal grating and precisely controlled diffusive flats and their application to highly accurate projected fringe profilometry [J]. *Optical Engineering*, 2003, **42**(6): 1730-1740.
- [8] LI Ping-ping, ZHANG Qi-qian. New method of sinusoidal grating generation based on area encoding [J]. *Optical & Optoelectronic Technology*, 2011, **9**(1): 36-41.
李平平,张启灿. 产生正弦光栅的二值化面积编码新方法 [J]. *光学与光电子技术*, 2011, **9**(1): 36-41.
- [9] XIAN Tao, SU Xian-yu. Area modulation grating for sinusoidal structure illumination on phase-measuring profilometry [J]. *Applied Optics*, 1999, **40**(8): 1153-1158.
- [10] GASTON A A, JAIME A A, J MATIAS D M, *et al.* Pulse-width modulation in defocused 3-D fringe projection [J]. *Optics Letters*, 2010, **35**(21): 3682-3684.
- [11] WANG Yan-jun, ZHANG Song. Optimum pulse width modulation for 3-D shape measurement with projector defocusing [J]. *Optics Letters*, 2010, **35**(24): 4121-4123.
- [12] LOHRY W, ZHANG Song. 3D shape measurement with 2D area modulated binary patterns [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2012, **50**(7): 917-921.
- [13] WANG Ya-jun, ZHANG Song. Comparison of the squared binary, sinusoidal pulse width modulation, and optimal pulse width modulation methods for three-dimensional shape measurement with projector defocusing [J]. *Applied Optics*, 2012, **51**(7): 861-872.
- [14] CHENG Ju, SU Xian-yu. Study on error diffusion algorithm of binary encode grating [J]. *Laser Technology*, 2007, **31**(3): 322-325.
程菊,苏显渝. 二元编码光栅的误差扩散算法研究 [J]. *激光技术*, 2007, **31**(3): 322-325.
- [15] SU Xian-yu, ZHOU Wen-sheng. Phase-measuring profilometry using defocused projection of Ronchi grating [J]. *Opto-electronic Engineering*, 1993, **20**(4): 8-16.
苏显渝,周文胜. 采用罗奇光栅离焦技术的相位测量轮廓术 [J]. *光电工程*, 1993, **20**(4): 8-16.
- [16] ASIF M, MALIK A S, TAE-SUN CHOI. 3D shape recovery from image defocus using wavelet analysis [C]. Piscataway, N. J.: IEEE Operations Center, 2005: 1025-1028.
- [17] WANG Zi-wei, YANG Ying-yun. Depth information extraction of the image defocus area based on frequency domain [C]. Piscataway, N. J.: IEEE Operations Center, 2012: 425-428.