

doi: 103969/j.issn.0490-6756.2017.03.017

基于频率调制二元编码光栅相位测量剖面术

郭禹璠, 陈文静, 苏显渝

(四川大学电子信息学院光电系, 成都 610064)

摘要: 分析传统的频率调制正弦光栅用于3步相移相位测量剖面术时,系统非线性对测量精度的影响,提出采用二元频率调制光栅,提高3步相移相位测量剖面术计算绝对相位测量精度的方法.完成了分别采用传统正弦频率调制光栅投影和基于Floyd-Steinberg二元编码频率调制光栅投影的相移剖面术的绝对相位计算结果对比.结果表明,采用正弦频率调制光栅模板的3步相移算法对系统的非线性敏感,而二元编码频率调制光栅模板既保持了利用单组条纹投影就可计算条纹绝对相位的优点,又不受系统非线性的影响,大大提高了基于频率调制光栅的相移剖面术的测量精度.计算机模拟和实验验证了所提方法的有效性.

关键词: 相位测量剖面术; 二元频率调制光栅; 二元编码光栅模板; 绝对相位

中图分类号: 0438 **文献标识码:** A **文章编号:** 0490-6756(2017)02-0321-09

Phase measuring profilometry based on binary encoded frequency modulation grating projection

GUO Yu-Fan, CHEN Wen-Jing, SU Xian-Yu

(Opto-Electronic Department, College of Electronics & Information Engineering,
Sichuan University, Chengdu 610064, China)

Abstract: The impact of the system nonlinear on measuring accuracy of three-step phase-shifting measuring profilometry with the traditional sinusoidal frequency modulated grating projection is discussed. A binary encoded sinusoidal frequency modulated grating is used to improve the accuracy of absolute phase calculation in three-step phase-shifting phase measuring algorithm. A comparison of accuracy of absolute phase in phase-shifting measuring profilometry with the traditional frequency modulated grating projection and with binary encoded frequency modulated grating projection based on Floyd-Steinberg is completed as well. These results show that the three-step phase-shifting algorithm based on sinusoidal frequency modulated grating template is sensitive to the nonlinear of the measuring system, however, the application of the binary encoded frequency modulated grating template not only maintains the advantage of calculating absolute phase from a single set of fringe patterns, but also avoids the impact from the nonlinear of the system. The new method greatly improves the measurement accuracy of phase-shifting measuring profilometry based on frequency modulated grating projection. Computer simulation and experiment verified the effectiveness of the proposed method.

Keywords: Phase measuring profilometry; Binary frequency modulated grating; Binary encoded grating template; Absolute phase

收稿日期: 2016-04-20

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项(2013YQ49087901); 四川省人才基金([2015] 100-12)

作者简介: 郭禹璠(1991-),女,山西大同人,硕士,主要从事光学三维传感方面的研究. E-mail: 1632192927@qq.com

通讯作者: 陈文静. E-mail: chenwj0409@scu.edu.cn

1 引言

相位测量剖面术利用多帧具有一定相移量的正弦光栅投影,采用点对点算法从携带被测物体三维面形信息的条纹中解算相位,重建物体三维面形,具有非接触和测量精度高的优点.由于算法中采用了反正切函数计算,所以只能得到 $[-\pi, \pi]$ 范围内的相位主值,称为截断相位^[1].必须采用相位展开技术将截断相位恢复成连续相位,才能得到被测物体的高度信息.常用的相位展开方法包括:空间相位展开和时间相位展开^[1,2].空间相位展开利用一帧截断相位图,比较展开路径上相邻像素点之间的相位差,通过加减 2π 的操作得到连续相位.在实际测量时,条纹中的噪声、局部阴影、断裂、非线性等因素使得空间相位展开变得十分复杂而困难,并且相位计算中出现的错误会沿着展开路径扩散,影响到正确三维面形重建.时间相位展开通过投影多组不同频率的相移条纹图,得到三维截断相位场,然后将同名像素点的相位沿时间序列独立进行展开^[3].常用的时间相位展开算法包括:指数和负指数时间相位展开方法^[4],三频时间相位展开方法^[5],三频外差时间相位展开方法^[6].此外采用基于格雷编码的相位展开^[7]也需要投影多组不同结构的条纹图(格雷码图像和相移条纹图像),并且在格雷解码计算展开级次时,格雷码边缘跳变处容易出现解码错误.随着数字光投影仪(DLP)的出现、发展和性能提高^[8],方便了人们设计结构光栅.可以投影一组具有频率调制结构的正弦光栅,通过控制相移步长,利用相移解相位算法分别得到不同频率条纹各自对应的截断相位,再通过各相位之间关系得到绝对相位^[9].但该方法对投影条纹的非线性影响非常敏感.为了符合人眼对图像感受特点,商用数字投影仪的输入和输出响应并不是线性关系,而是呈指数函数响应关系(称为 Gamma 非线性失真),使得投出去的正弦光栅投影条纹包含了其它的谐波成分,随之带来解相位误差,影响测量精度.虽然可以通过 Gamma 系数预标定技术^[10]来消除条纹的非线性带来的测量误差,但预标定过程耗时耗力.光栅二元化技术通过将投影光栅二值化和归一化使得投影光栅的灰度分布只有 0 和 1,抑制了 DLP 光栅投影设备的 Gamma 响应对输出光场的影响.常用的光栅二元化技术包括:二值光栅散焦技术^[11],脉冲宽度调制(PMW)^[12],误差扩散二元投影模板^[13,14]等.其中,投影由误差扩散法得到的

二元模板时,由于二值化带来的谐波分量被远离基频,利用光学系统本身的低通滤波特性,成像装置将获得高精度的正弦光场.

论文针对投影正弦频率调制光栅计算绝对相位时存在非线性敏感的问题,设计频率调制二元编码光栅,抑制了非线性对采用频率调制光栅投影的相移轮廓术相位计算的影响.针对商用投影仪分辨率受限(1024×768 像素),为了进一步提高频率调制二元编码光栅经光学系统低通滤波后的正弦性,在投影光路上添加柱透镜来在栅线方向上对二元光栅进行高斯平滑,提高了基于频率调制光栅投影的相位测量剖面术的测量精度.论文分别通过计算机模拟和实验,对采用频率调制正弦光栅投影和频率调制二元编码光栅投影的相位测量剖面术重建结果进行了对比,验证了所提方法的有效性.

2 基本原理

2.1 频率调制相位测量剖面术(PMP)原理

相位测量剖面术(PMP)的原理如图 1 所示,图中频率调制光栅(frequency modulated grating)经投影设备 projector 被投影到被测物体 object 表面,成像设备 camera 记录经物体高度调制后的变形光栅条纹图.图中 J_1 、 J_2 和 I_1 、 I_2 分别是投影设备和成像设备对应的入瞳和出瞳. h 表示被测物体的高度,参考平面 reference 位于 x - y 平面.因为被测物体的高度信息被编码在变形光栅条纹图中,为了适应快速测量的需求,可采用 3 步相移技术解调条纹中的相位信息,得到物体的高度分布^[1].

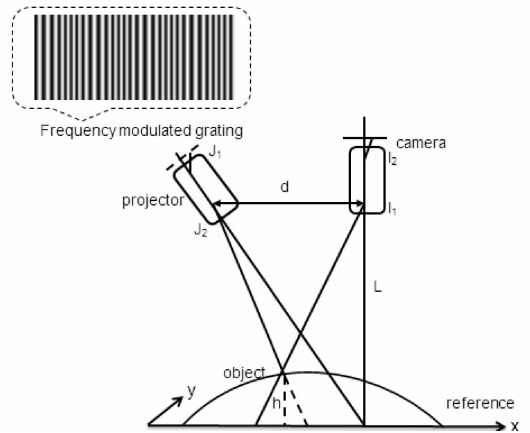


图 1 PMP 原理光路图

Fig. 1 Light path diagram of PMP principle

2.1.1 频率调制正弦光栅模板 投影如图 1 中所示的频率调制正弦光栅模板到被测物体表面,则物体表面某一点 (i, j) 的光强 $I(\alpha, i, j)$ 表示为:

$$I(\alpha, i, j) = a(i, j) + b(i, j) \cos\left\{\frac{2\pi}{P_1}\alpha + \theta_1(i, j) + M \cos\left[\frac{2\pi}{P_2}\alpha + \theta_2(i, j)\right]\right\} \quad (1)$$

其中 $a(i, j)$ 表示背景光强, $b(i, j)$ 表示对比度, α 表示相移的步数, θ_1, θ_2 分别表示被测物体高度变化引起的调频变形光栅条纹中的相位变化量. $2\pi/P_1\alpha + \theta_1$ 称为线性频率项, $M \cos(2\pi/P_2\alpha + \theta_2)$ 称为频率调制项, 其中, M 是频率调制项的放大率, P_1, P_2 分别代表线性频率项和的频率调制项的周期, 满足如下关系:

$$P_1 : P_2 = 3 : 3n + 1 \quad (2)$$

其中 n 是任意整数, 决定着相位展开范围 $[0, 2\pi(3n + 1)]$. 采用三步相移技术, 当 α 以 $P_2/3$ 等间隔地增加时, 公式(1)表示为:

$$I_k = a + b \cos\left\{2\pi \frac{P_2}{3P_1}k + \theta_1 + M \cos\left[\frac{2\pi}{3}k + \theta_2\right]\right\} \quad (3)$$

k 代表图片的序号. 当 k 分别取 $0, 1, 2, \dots, 8$ 时, 得到 $I_0 \sim I_8$ 9 帧相移条纹图, 分别表示为:

$$I_0 = a + b \cos\{\theta_1 + M \cos\theta_2\} \quad (4)$$

$$I_1 = a + b \cos\left\{\theta_1 + 2\pi \frac{P_2}{3P_1} + M \cos\left[\theta_2 + \frac{2\pi}{3}\right]\right\} \quad (5)$$

$$I_2 = a + b \cos\left\{\theta_1 + 2\pi \frac{2P_2}{3P_1} + M \cos\left[\theta_2 + \frac{4\pi}{3}\right]\right\} \quad (6)$$

$$I_3 = a + b \cos\left\{\theta_1 + \frac{2\pi}{3} + M \cos\theta_2\right\} \quad (7)$$

$$I_4 = a + b \cos\left\{\theta_1 + 2\pi \frac{P_2}{3P_1} + \frac{2\pi}{3} + M \cos\left[\theta_2 + \frac{2\pi}{3}\right]\right\} \quad (8)$$

$$I_5 = a + b \cos\left\{\theta_1 + 2\pi \frac{2P_2}{3P_1} + \frac{2\pi}{3} + M \cos\left[\theta_2 + \frac{4\pi}{3}\right]\right\} \quad (9)$$

$$I_6 = a + b \cos\left\{\theta_1 + \frac{4\pi}{3} + M \cos\theta_2\right\} \quad (10)$$

$$I_7 = a + b \cos\left\{\theta_1 + 2\pi \frac{P_2}{3P_1} + \frac{4\pi}{3} + M \cos\left[\theta_2 + \frac{2\pi}{3}\right]\right\} \quad (11)$$

$$I_8 = a + b \cos\left\{\theta_1 + 2\pi \frac{2P_2}{3P_1} + \frac{4\pi}{3} + M \cos\left[\theta_2 + \frac{4\pi}{3}\right]\right\} \quad (12)$$

2.1.2 相位计算及展开 上文得到的 9 帧条纹图中的 $I_0, I_3, I_6, I_1, I_4, I_7, I_2, I_5, I_8$ 可看作三组分别具有 $\frac{2\pi}{3}$ 相移增量的等间距三步相移条纹图, 利用三步相移解相位算法分别得到:

$$\arctan \frac{\sqrt{3}(I_6 - I_3)}{2I_0 - I_3 - I_6} = \theta_1 + M \cos\theta_2 \equiv \Theta_0 \quad (13)$$

$$\arctan \frac{\sqrt{3}(I_7 - I_4)}{2I_1 - I_4 - I_7} = \theta_1 + 2\pi \frac{P_2}{3P_1} + M \cos\left(\frac{2\pi}{3} + \theta_2\right) \equiv \Theta_1 \quad (14)$$

$$\arctan \frac{\sqrt{3}(I_8 - I_5)}{2I_2 - I_5 - I_8} = \theta_1 + 2\pi \frac{2P_2}{3P_1} + M \cos\left(\frac{4\pi}{3} + \theta_2\right) \equiv \Theta_2 \quad (15)$$

从公式(13)~(15)中可以得到一组等间距三步相移条纹图, 表示为:

$$\text{wrap}\left[\Theta_2 - \Theta_1 - 2\pi \frac{P_2}{3P_1}\right] = \sqrt{3}M \sin\theta_2 \equiv \varphi_0 \quad (16)$$

$$\text{wrap}\left[\Theta_1 - \Theta_0 - 2\pi \frac{P_2}{3P_1}\right] = \sqrt{3}M \sin\left(\theta_2 + \frac{4\pi}{3}\right) \equiv \varphi_1 \quad (17)$$

$$\text{wrap}\left[\Theta_0 - \Theta_2 + 2\pi \frac{2P_2}{3P_1}\right] = \sqrt{3}M \sin\left(\theta_2 + \frac{2\pi}{3}\right) \equiv \varphi_2 \quad (18)$$

wrap 表示包裹相位, 从公式(16)~(18)可以计算出 θ_2 , 再利用公式(13)可算出 θ_1 :

$$\theta_2 = \frac{\pi}{2} - \arctan \frac{\sqrt{3}(\varphi_2 - \varphi_1)}{2\varphi_0 - \varphi_1 - \varphi_2} \quad (19)$$

$$\theta_1 = \text{wrap}\left[\Theta_0 - M \cos\theta_2\right] \quad (20)$$

相位 θ_1 和 θ_2 均被截断在 $[-\pi, \pi]$ 之间. θ_1 和 θ_2 对应的展开相位 φ_1 和 φ_2 以及它们之间的关系表示为:

$$\frac{\varphi_1}{\varphi_2} = \frac{\theta_1 + 2\pi k_1}{\theta_2 + 2\pi k_2} = \frac{P_2}{P_1} \quad (21)$$

未知整数 k_1 和 k_2 分别是两个展开相位对应的级次分布, 则有:

$$\frac{P_2}{P_1}\theta_2 - \theta_1 = \frac{P_2}{P_1}\varphi_2 - \varphi_1 - 2\pi\left(\frac{P_2}{P_1}k_2 - k_1\right) = \frac{2\pi}{3}\{3k_1 - (3n + 1)k_2\} \equiv \frac{2\pi}{3}U \quad (22)$$

理论上 U 为 (k_1, k_2) 决定的整数,但实际通过 θ_1 和 θ_2 算出的 U 通常并不是整数,所以由 U 确定 k_1 时,存在取整操作, k_1 表示为:

$$k_1 = \begin{cases} \left[\frac{U}{3} \right] - n \bmod(U, 3) + 3n + 1, [\bmod(U, 3) \neq 0] \\ \left[\frac{U}{3} \right], [\bmod(U, 3) = 0] \end{cases} \quad (23)$$

$\left[U/3 \right]$ 表示不大于 $U/3$ 的最大的整数, $\bmod(U, 3)$ 表示 $U/3$ 对应的余数,而 k_1 的取值范围为 $[0, 3n + 1]$.

2.2 误差扩散方法生成频率调制二元光栅模板

采用正弦频率调制光栅投影的 PMP 方法,利用三步相移算法可从投影的 9 帧相移条纹图中解算出两组不同频率对应的截断相位图 θ_1 和 θ_2 ,再利用由 P_1 和 P_2 之间量化关系确定的 φ_1 和 φ_2 之间的关系,可以得到包含物体高度信息的连续相位分布图.正如 2.1 节公式推导所示, θ_1 和 θ_2 的计算基于频率调制光栅是正弦分布这个前提.而投影仪的非线性降低了投影条纹的正弦性,所以该方法对投影仪的非线性响应非常敏感.基于误差扩散原理的光栅二元化技术将投影光栅二元化和归一化后,使得投影光栅的灰度分布只有 0 和 1 值,抑制了光栅投影设备的 Gamma 响应对输出光场的影响,可以得到正弦性好的投影条纹,提高该方法的测量精度.

误差扩散原理就是根据设定的阈值将当前图像像素归一化值量化为 0 或 1 值,然后将当前像素值的量化误差按一定比例扩散至相邻未处理的像素中,以减少整个编码的量化误差,最终得到二元

编码图像,公式(24)是误差扩散的数学描述:

$$\tilde{I}(i, j) = I(i, j) + \sum_{k, l \in S} h(k, l) e(i - k, j - l) \quad (24)$$

式中 $I(i, j)$ 为原图像在 (i, j) 处的灰度值, $\tilde{I}(i, j)$ 为 $I(i, j)$ 加上周围像素扩散的量化误差后的灰度值, (i, j) 处像素的量化误差 $e(i, j)$ 通过一个二维权重函数 $h(k, l)$ (也叫误差扩散核函数)扩散至相邻未处理的像素, S 代表未处理的像素扩散区域.然后根据设定的阈值 T 把 $\tilde{I}(i, j)$ 处像素进行二值化,得到二值化输出图像在 (i, j) 处的值 $D(i, j)$, 即:

$$D(i, j) = \begin{cases} 1, \tilde{I}(i, j) \geq T \\ 0, \tilde{I}(i, j) < T \end{cases} \quad (25)$$

归一化情况下, T 一般取 0.5. 而量化误差 $e(i, j)$ 为 $\tilde{I}(i, j)$ 与 $D(i, j)$ 之差:

$$e(i, j) = \tilde{I}(i, j) - D(i, j) \quad (26)$$

上述步骤遍历整幅图像,最终得到二元编码光栅图像.

采用不同的误差扩散核函数 $h(k, l)$ 得到不同的二元编码图像.在 PMP 测量中,最常用的误差扩散算法为 Floyd-Steinberg 距离加权算法与“蛇”形扫描 Sierra-Lite 算法^[13,14].这里选择 Floyd-Steinberg 误差扩散算法得到二元频率调制光栅模板,如图 2(a)所示.图 2(a)矩形区域内的分布如图 2(b)所示.为了得到正弦度好的投影条纹图,利用柱透镜一维散焦作用结合成像系统的低通滤波特性,实现对频率调制二元编码光栅的椭圆低通滤波,图 2(c)是图 2(b)滤波后的结果.

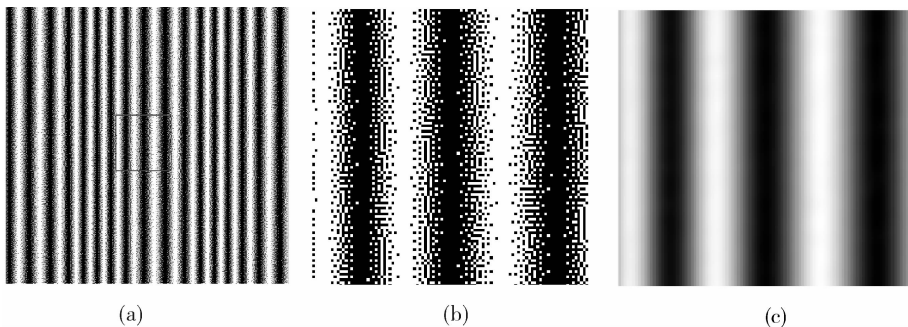


图 2 二元频率调制正弦光栅模板

(a) 二元频率调制光栅; (b) 二元频率调制光栅局部放大图; (c) 椭圆滤波后二元频率调制光栅局部放大图.

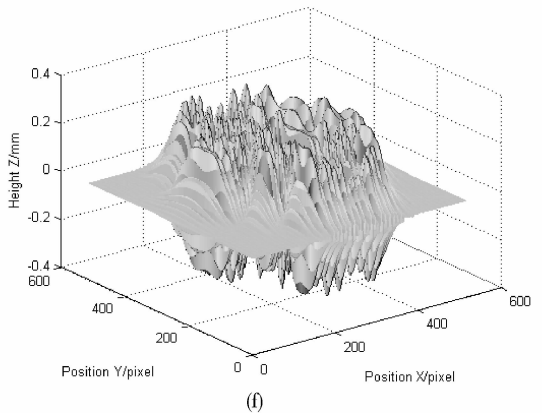
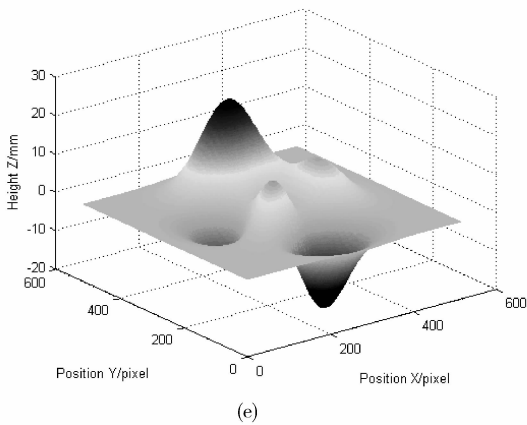
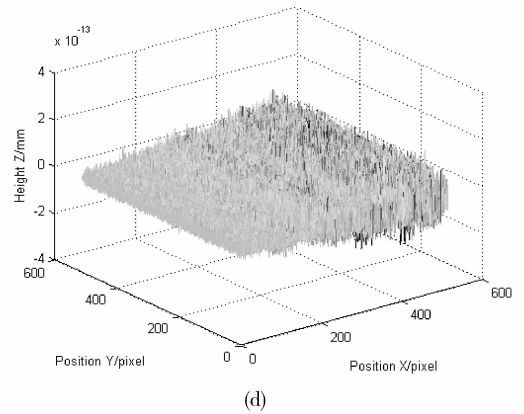
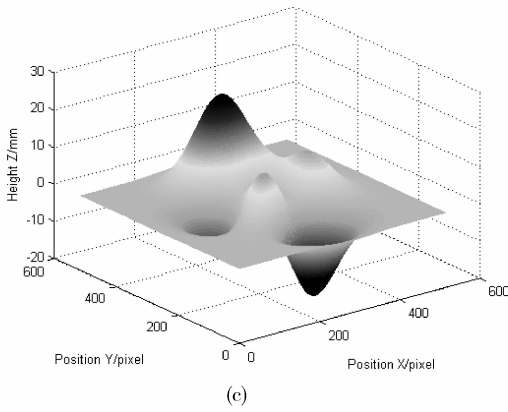
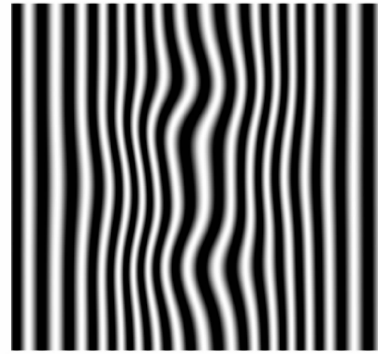
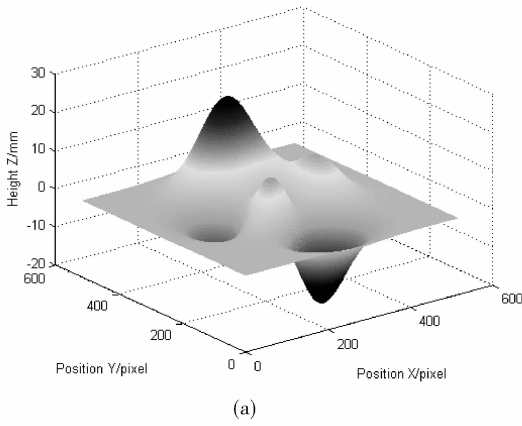
Fig. 2 Binary frequency modulated sinusoidal grating template

(a) Binary frequency modulated grating; (b) Local binary frequency modulated grating; (c) Local binary frequency modulated grating after elliptic filter.

3 计算机仿真

首先模拟非线性对频率调制正弦光栅投影 PMP 方法相位计算精度的影响. 数字商用投影仪非线性指数 Γ , 记作 γ , 通常大于 1. 为了讨论非线性的影响, 模拟了 γ 取大于等于 1 的不同值时, 三维面形的重建结果. 如图 3(a) 为 $3 \times$ peaks 函数描述的模拟被测物体, 当公式(2)中 $n = 7, P_1 = 30, P_2 = 220$, 公式(3)中 $a = b = 0.5, M = 1$.

7 时, 将其对应频率调制正弦光栅条纹投影到如图 3(a)所示模拟被测物体表面, 得到的变形条纹如图 3(b)所示. 非线性指数 γ 分别取 1、1.1 和 1.55 时, 三维重建结果和对应的误差分布如图 3(c), 3(d), 3(e), 3(f), 3(g) 和 3(h)所示. 采用 Floyd-Steinberg 误差扩散方法^[14]对频率调制正弦光栅进行二值化后投影到模拟被测物体表面对应重建结果和误差分布如图 3(i)和 3(j)所示.



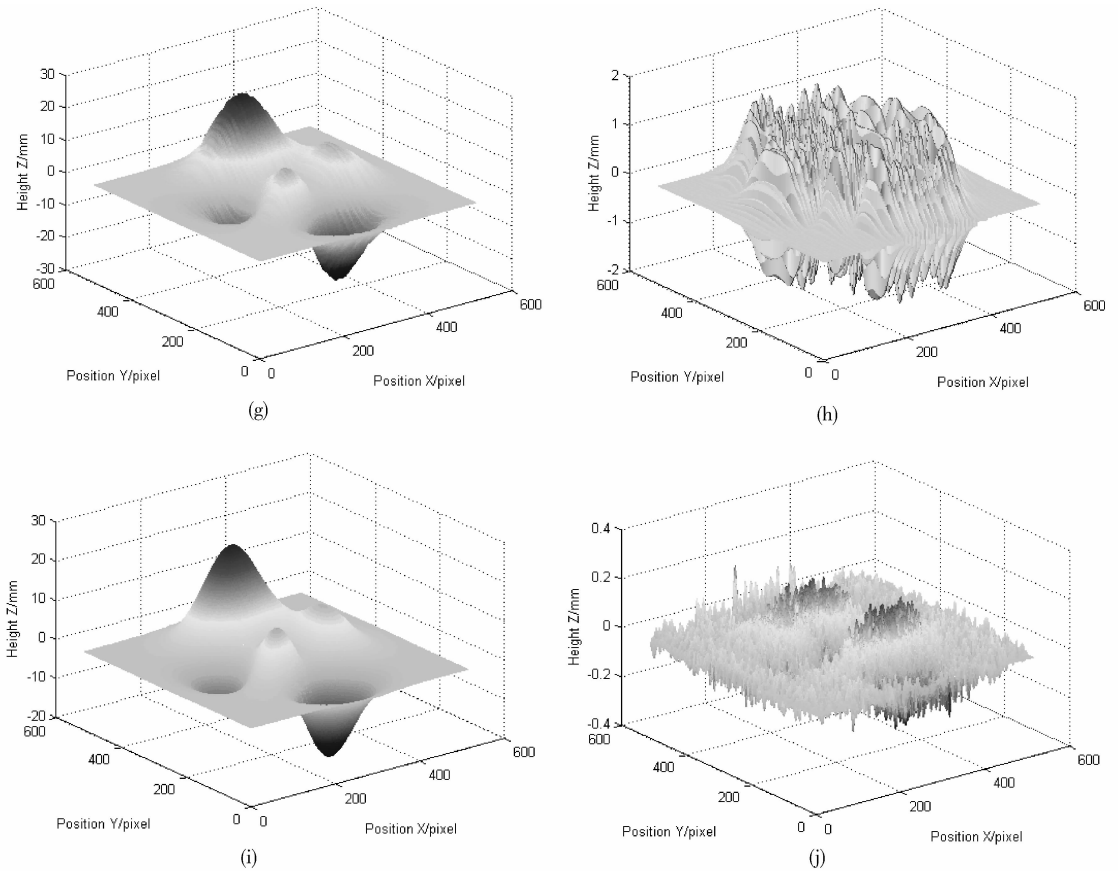


图 3 不同 γ 值对应的正弦频率调制光栅和二元编码频率调制光栅重建结果和误差分布

(a) 模拟物体; (b) 其中一幅变形条纹图; (c) $\gamma = 1$ 时重建结果; (d) $\gamma = 1$ 时重建误差分布; (e) $\gamma = 1.1$ 时重建结果; (f) $\gamma = 1.1$ 时重建误差分布; (g) $\gamma = 1.55$ 时重建结果; (h) $\gamma = 1.55$ 时重建误差分布; (i) 投影二元编码频率调制光栅重建结果; (j) 投影二元编码频率调制光栅重建误差分布。

Fig 3 Reconstruction results and error distributions of sinusoidal and binary frequency modulated gratings corresponding to different values of γ .

(a) Simulated object; (b) One of the deformed fringe pattern; (c) reconstruction when $\gamma = 1$; (d) Error distribution when $\gamma = 1$; (e) Reconstruction when $\gamma = 1.1$; (f) Error distribution when $\gamma = 1.1$; (g) Reconstruction when $\gamma = 1.55$; (h) Error distribution when $\gamma = 1.55$; (i) Reconstruction from the binary encoded frequency modulated grating; (j) Error distribution from the binary encoded frequency modulated grating.

表 1 给出了不同的 γ 值对应的频率调制正弦光栅投影和频率调制二元编码光栅投影的重建误差值的对比。

表 1 不同 γ 值对应的正弦频率调制光栅和二元编码频率调制光栅的重建误差值

Tab. 1 The values of reconstruction error by projecting sinusoidal frequency modulated gratings with different γ and by projecting the binary encoded frequency modulated grating

Gamma γ	1	1.1	1.3	1.5	1.55	1.56	Binary encoded grating
Standard error/mm	3.8194×10^{-14}	0.086114	0.25089	0.40422	0.44064	21.19915 (fail)	0.057764
Maximum error/mm	2.0078×10^{-13}	0.31403	0.91637	1.4796	1.6137	330.6204 (fail)	0.26473

可见,当 $\gamma = 1$ 时,正弦频率调制光栅的重建精度很高,重建物体和被测物体之间的标准误差和最大误差都很小;但随着非线性指数的增大,正弦频率调制光栅的重建精度大大降低.模拟结果显示,当 $\gamma > 1.55$ 时,重建失败.而采用二元编码频率调制光栅投影,由于抑制了投影仪的非线性响

应,可以得到满意的重建结果.

4 实验

4.1 实验装置

实验装置如图 4 所示,通过 PointGray (Fly Capture2 2.6.3.2) 相机采集 PDC03 投影仪投影的相移频率调制变形光栅条纹图,利用该装置对平

面和心形物体分别进行了测量。

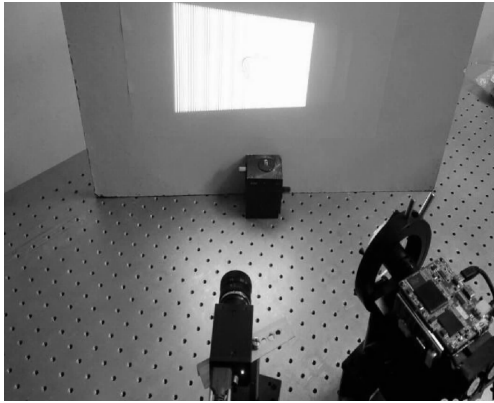


图 4 实验装置
Fig. 4 Experimental setup

4.2 实验过程及结果

分别投影正弦频率调制光栅和二元编码频率调制光栅到被测平面表面,从成像装置采集的条纹图中截取 300×250 像素区域用于分析,图 5(a)为正弦频率调制光栅图,5(b)为二元编码频率调制光栅图. 为了清楚起见,画出了从二元频率调制光栅条纹中解算出的截断相位 θ_1 、 θ_2 分布图以及利用 P_1 和 P_2 之间关系计算得到的级次 k_1 的分布(第 132 行)如图 5(c)和图 5(d)所示,从正弦频率调制光栅条纹中得到的截断相位和级次有类似的分布. 从图 5(a),图 5(b)重建的平面误差分布分别如图 5(e)和图 5(f)所示,其对应误差最大值分别为 0.200 99 和 0.089 208,对应误差标准值分别为 0.069 267 和 0.021 379.

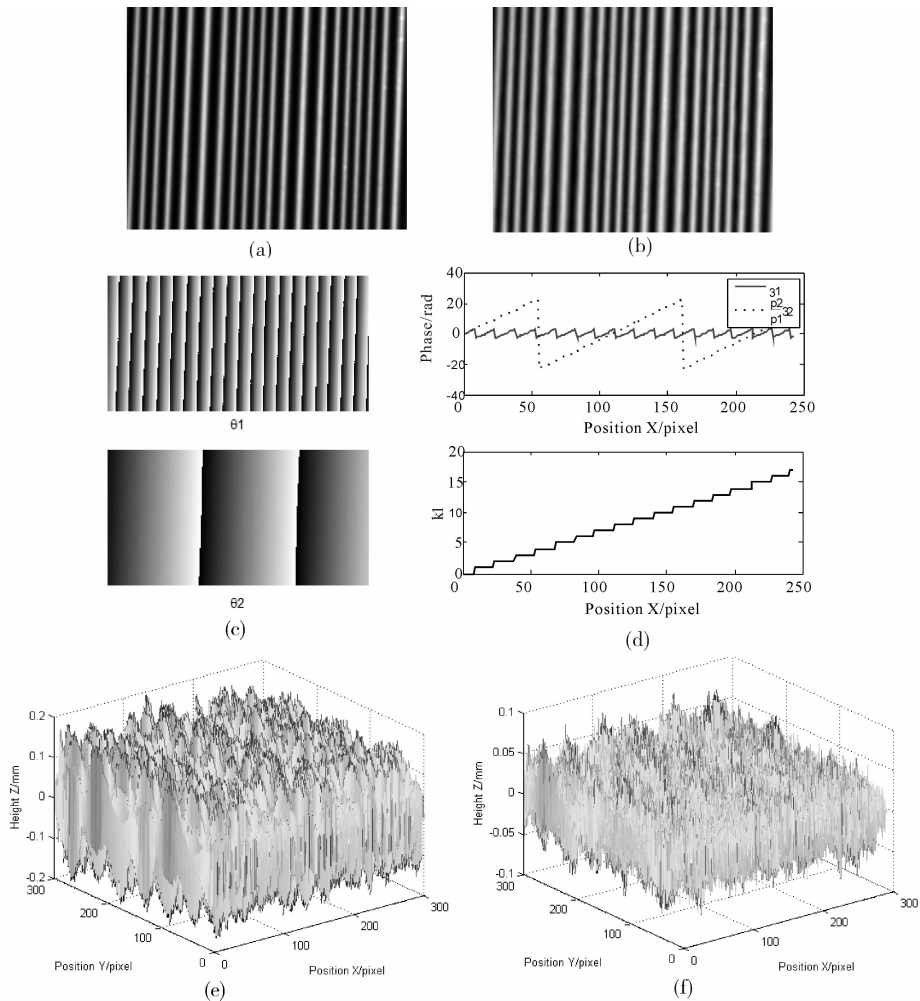


图 5 分别投影正弦频率调制光栅和二元编码频率调制光栅重建被测平面的误差分布

(a) 一幅采集的正弦频率调制光栅条纹图; (b) 一幅采集的二元编码频率调制光栅条纹图; (c) 从图 5(b)中计算得到的 θ_1 、 θ_2 ; (d) 利用 θ_1 、 θ_2 得到的 k_1 分布; (e) 正弦频率调制光栅重建平面误差分布; (f) 二元频率调制光栅重建平面误差分布。
Fig. 5 Error distributions of the measured plane by the sinusoidal frequency modulated grating projecting and the binary encoded frequency modulated grating projecting
(a) One of the sinusoidal frequency modulated grating fringe; (b) One of the binary encoded frequency modulated grating fringe; (c) θ_1 、 θ_2 calculated from the figure 5 (b); (d) The distribution of k_1 obtained from θ_1 、 θ_2 ; (e) Reconstruction error distribution of the plane from the sinusoidal frequency modulated grating; (f) Reconstruction error distribution of the plane from the binary encoded frequency modulated grating.

分别投影正弦频率调制光栅和二元编码频率调制光栅到被测心形物体表面,采集的变形条纹图分别如图 6(a)和 6(b)所示。从二元编码频率调制光栅条纹中解算出的截断相位 θ_1 、 θ_2 和级次 k_1

(第 132 行)分布分别如图 6(c)和图 6(d)所示。由图 6(a)和图 6(b)重建的心形面形分别如图 6(e)和图 6(f)所示。

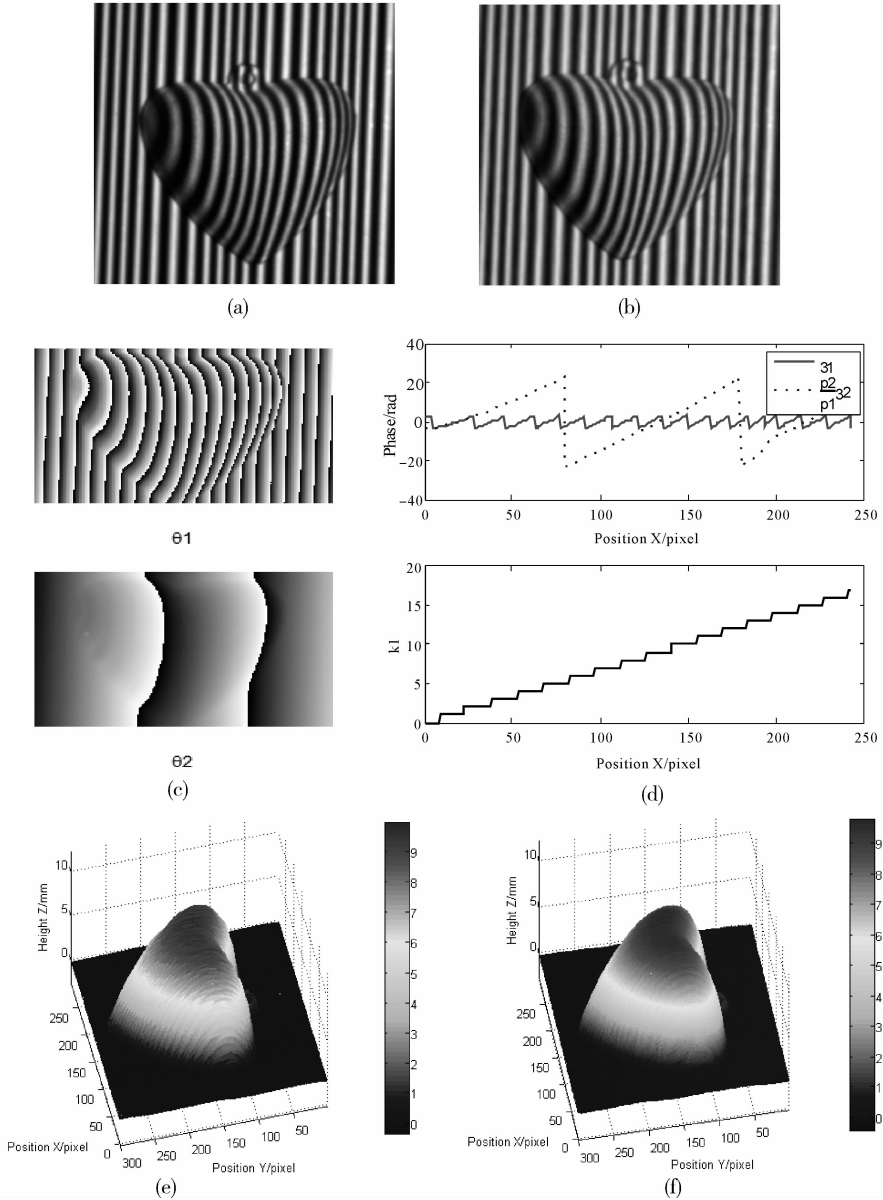


图 6 分别投影正弦频率调制光栅和二元编码频率调制光栅重建的心形物体

(a) 一幅采集的变形正弦频率调制光栅条纹图; (b) 一幅采集的变形二元频率调制光栅条纹图; (c) 从图 6(b)中计算得到的 θ_1 、 θ_2 ; (d) 利用 θ_1 、 θ_2 得到 k_1 的分布; (e) 正弦频率调制光栅重建心形物体; (f) 二元编码频率调制光栅重建心形物体。

Fig. 6 Reconstruction results of the heart-shaped object by sinusoidal frequency modulated grating projecting and binary encoded frequency modulated grating projecting

(a) One of the deformed sinusoidal frequency modulated grating fringe; (b) One of the deformed binary frequency modulated grating fringe; (c) θ_1 、 θ_2 calculated from the figure 6 (b); (d) The distribution of k_1 obtained by θ_1 、 θ_2 ; (e) Reconstruction of the heart-shaped object by sinusoidal frequency modulated grating projecting; (f) Reconstruction of the heart-shaped object by binary frequency modulated grating projecting.

实验结果表明,采用二元编码频率调制光栅投影方法得到的被测物体的重建结果明显好于采用

正弦频率调制光栅投影的重建结果。

5 结 论

论文对基于频率调制光栅的相位测量轮廓术进行了深入研究. 针对该方法对系统非线性非常敏感的问题, 提出通过误差扩散二元编码方式生成二元编码频率调制光栅, 结合光学系统的低通滤波特性以及柱透镜的点扩散函数特点来提高频率调制光栅的三维重建精度. 计算机模拟和实际测量结果均表明, 二元编码光栅由于不受非线性影响, 既保持了基于频率调制光栅投影的 3 步相移测量轮廓术只需要投影一组条纹就可以得到绝对相位的特点, 又避免了该方法对非线性敏感而导致的实际测量精度低的问题.

参考文献:

- [1] 苏显渝, 李继陶. 信息光学[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [2] Su X, Chen W. Reliability-guided phase unwrapping algorithm: a review [J]. *Opt Laser Eng*, 2004, 42(3): 245.
- [3] Huntley J M, Saldner H. Temporal phase-unwrapping algorithm for automated interferogram analysis [J]. *Appl Opt*, 1993, 32(17): 3047.
- [4] Huntley J M, Saldner H O. Error-reduction methods for shape measurement by temporal phase unwrapping [J]. *J Opt Soc Am A*, 1997, 14(12): 3188.
- [5] 赵文静, 陈文静, 苏显渝. 几种时间相位展开方法的比较[J]. *四川大学学报: 自然科学版*, 2016, 53(1): 110.
- [6] 李璐璐, 苏显渝, 窦蕴甫, 等. 时间相位展开的误差分析与算法设计[J]. *四川大学学报: 自然科学版*, 2012, 49(1): 102.
- [7] 宋倩, 陈一悦, 朱荣刚, 等. 基于格雷编码投影的三维测量技术研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(3): 111.
- [8] Gong Y, Zhang S. Ultrafast 3-D shape measurement with an off-the-shelf DLP projector [J]. *Opt Express*, 2010, 18(19): 19743.
- [9] Ikeda Y, Yoneyama S, Fujigaki M, *et al.* Absolute phase analysis method for three-dimensional surface profilometry using frequency-modulated grating [J]. *Opt Eng*, 2003, 42(5): 1249.
- [10] 崔艳军, 张文峰, 李建欣, 等. 条纹投影三维测量的 Gamma 畸变校正方法[J]. *光学学报*, 2015, 35(1): 153.
- [11] Lei S, Zhang S. Flexible 3-D shape measurement using projector defocusing [J]. *Opt Lett*, 2009, 34(20): 3080.
- [12] Wang Y, Zhang S. Comparison of the squared binary, sinusoidal pulse width modulation, and optimal pulse width modulation methods for three-dimensional shape measurement with projector defocusing [J]. *Appl Opt*, 2012, 51(7): 861.
- [13] 田紫霞, 陈文静, 苏显渝. 采用二元编码的正弦光栅提高 PMP 测量速度和精度的方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(12): 125.
- [14] 吕江昭, 达飞鹏, 郑东亮. 基于 Sierra Lite 抖动算法的散焦投影光栅测量[J]. *光学学报*, 2014(3): 127.