

相位测量偏折术中高质量条纹的获取

岳慧敏, 李 绒, 潘志鹏, 陈红丽, 吴雨祥, 刘 永

电子科技大学光电信息学院, 四川 成都 610054

摘要 相位测量偏折术中的相位误差主要分为 CCD 相机的随机误差以及由结构光照明光源与 CCD 相机的非线性响应导致的非线性误差。从影响相位误差的根源分析,建立了条纹质量与相位误差、相机镜头光圈数、编码条纹的周期、调制度等因素的分析模型,并对该模型的可靠性与正确性进行仿真与实验验证。理论分析、仿真与实验结果表明:获取条纹的对比度与相机镜头光圈数、编码条纹的周期和调制度成正比,获取条纹的正弦性与相机镜头光圈数、编码条纹的周期及调制度成反比。根据该条纹质量分析模型优化系统参数,可以获得高质量的条纹。该条纹质量分析模型同样适用于面结构光三维测量等其他技术。

关键词 测量; 相位测量偏折术; 随机误差; 非线性误差; 高质量条纹

中图分类号 TH741 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.1112004

High Quality Fringe Patterns Captured from Phase Measuring Deflectometry

Yue Huimin, Li Rong, Pan Zhipeng, Chen Hongli, Wu Yuxiang, Liu Yong

College of Optoelectronic Information, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China

Abstract The random error introduced by CCD camera and the nonlinear error caused by the nonlinear response function of illuminant and CCD camera are two main errors in phase measuring deflectometry. Based on the analysis of the factors affecting the phase error, we establish the analysis model of fringe pattern quality and the factors such as phase error, F value of camera lens, the period of coded fringe pattern, and modulation. The reliability and correctness of the proposed model are verified by computer simulation and experiment. The results of theoretical analysis, simulation, and experimental results show that the contrast ratio of the obtained fringe pattern is proportional to F value of the camera lens and the period and the modulation of the fringe pattern. The sinusousness of fringe is inversely proportional to F value of the camera lens and the period and the modulation of the generated fringe pattern. According to the proposed fringe quality analysis model, high quality fringe pattern can be obtained by optimizing the system parameters. The proposed model can apply to other techniques, such as surface-structured light three-dimensional measurement.

Key words measurement; phase measuring deflectometry; random error; nonlinear error; high quality fringe pattern

OCIS codes 120.2650; 120.3940; 120.5050; 120.5700

1 引 言

近年来,随着信息化科技的不断发展,人们对产品质量的要求日益苛刻,快速、高精度地获取目标物体的三维信息已成为工程应用的关键问题。相位测量偏折术^[1-8](PMD)是一种能够对自由曲面的镜面物体进行高速、高精度、低成本和全场测量的三维测量技术^[9],而且该技术对测量环境不敏感。

在相位测量偏折术中,待测物体表面的相位是从 CCD 获取的变形正弦条纹图案中提取出来的,获取的

收稿日期: 2017-06-14; **收到修改稿日期:** 2017-07-07

基金项目: 国家自然科学基金(61327004,61421002)

作者简介: 李 绒(1991—),女,硕士研究生,主要从事光学三维测量方面的研究。E-mail: l1789_r@163.com

导师简介: 岳慧敏(1979—),女,博士,副教授,主要从事光学三维测量方面的研究。E-mail: yuehuimin@uestc.edu.cn

(通信联系人)

条纹质量对相位计算至关重要,而如何获取高质量的条纹是面结构光三维测量的关键步骤。目前,鲜有文献对如何获取高质量条纹进行深入研究。研究者在获取条纹后通常采用算法补偿的方式来降低测量误差。针对条纹投影系统的非线性问题,研究人员提出了不同的补偿方法,如罗奇光栅编码的结构光法^[10]、非线性 Gamma 值的标定法^[11-14]、LUT 查表法^[15-16]、光强补偿法^[17]与预先畸变条纹法^[18]等,这些方法同样适用于相位测量偏折术。此外,研究人员针对条纹投影中条纹强度量化引起的相位误差^[19-20]也提出了不同的补偿方法,如多周期相移测量法^[21]与去除波峰和波谷像素点的相位测量法^[22]等。

若能在测量时获取高质量的条纹,那么在测量过程中就可减少一些复杂繁琐的误差补偿步骤,实现高精度测量。针对如何获取高质量的条纹,本文通过分析相位测量偏折术中非线性误差与随机误差对相位精度的影响,对条纹质量与系统参数(编码条纹的调制度、周期以及相机镜头的光圈数)之间的关系进行定量研究,并在此基础上建立条纹质量分析模型;根据该模型优化系统参数,可以有效且快速地获取高质量条纹,使高精度测量变得更加高效、可靠。本文所建立的条纹质量分析模型同样适用于相位测量轮廓术。

2 相位测量偏折术的基本原理

相位测量偏折术系统示意图如图 1 所示。由计算机控制生成两个相互垂直的正弦条纹,正弦条纹经液晶显示器(LCD)投影到待测物体表面,再利用 CCD 相机获取经待测物体表面调制的 LCD 显示屏虚像。待测物体表面的反射光线相对于参考平面的反射光线偏转的角度即为其表面的梯度变化,梯度变化的大小可以通过计算对应光线在 LCD 显示屏坐标系中的偏转角度来确定。

理论上,待测物体表面的梯度分布与相位分布的关系可表示为

$$g_x = \frac{\Delta\varphi_x T_x}{4\pi L_y}, \quad (1)$$

$$g_y = \frac{\Delta\varphi_y T_y}{4\pi L_y}, \quad (2)$$

式中 T_x 、 T_y 分别为 x 、 y 方向的条纹周期, L_y 为 LCD 显示屏与待测物体表面之间的距离, $\Delta\varphi_x$ 、 $\Delta\varphi_y$ 分别为 x 、 y 方向的相位差。通过对两个相互垂直的梯度进行积分,可获得待测物体表面的三维面形分布。

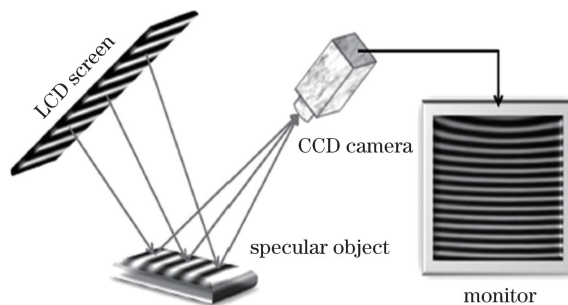


图 1 相位测量偏折术系统示意图

Fig. 1 Schematic of phase measuring deflectometry (PMD) system

3 条纹质量分析模型

3.1 相位误差分析

高质量的条纹具有高的信噪比,即在一定的系统条件下,条纹噪声较小。如图 2 所示,相位测量偏折术系统中的条纹噪声会导致相位测量中出现误差,这些误差可以分为随机误差与非线性误差^[23]。随机误差主要来源于电子噪声、暗电流噪声以及量化噪声等。电子噪声、暗电流噪声导致的随机噪声一般较小,可以通过多次平均的方法消除,一般不予考虑。量化噪声引起的相位误差是周期性的,不仅是随机误差的主要来源,还是条纹对比度的主要影响因素。当 CCD 相机的位数一定时,编码正弦条纹的对比度与量化误差有关,对比度越大,量化误差越小。非线性误差主要是由 CCD 相机与 LCD 显示屏的非线性响应导致的系统 γ 非线性误差。这些电子器件的非线性响应会导致 CCD 相机采集到的正弦条纹严重畸变,即条纹的正弦性变

差,从而降低了相位测量精度。在相位测量偏折术中,相位是从获取到的条纹中解调而来,因此条纹质量至关重要。而条纹的对比度、正弦性分别与系统的量化误差、非线性误差有关,因此,高质量的正弦条纹应具有较高的对比度与正弦性。

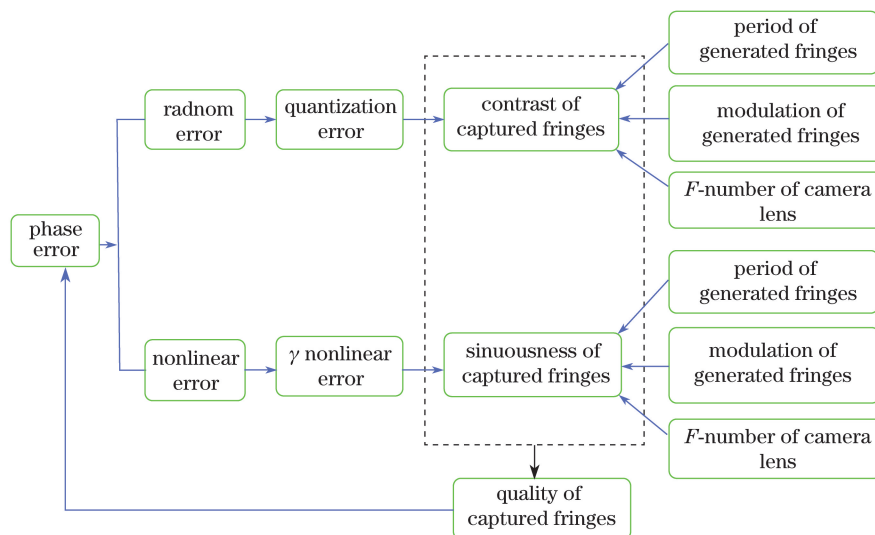


图 2 相位测量偏折术系统中的条纹质量分析模型

Fig. 2 Fringe quality analysis model in PMD system

3.1.1 随机误差分析

本研究讨论的随机误差主要为量化误差。相位测量偏折术系统采用 CCD 相机获取变形条纹,而 CCD 相机存在模数(A/D)转换过程,会对输入信号进行采样和量化。量化是将其舍入或截断为有限样本序列,因此会产生量化误差。A/D 转换器的量化效应一般采用信噪比(R_{SNR})来衡量:

$$R_{SNR} = \frac{P_1}{P_{qu}} = \frac{\sigma_1^2}{\sigma_{qu}^2} = \frac{\sigma_1^2}{q^2/12} = 12 \times 2^{2B} \times \sigma_1^2, \quad (3)$$

式中 P_1 、 P_{qu} 分别为输入信号功率与量化误差功率, σ_1 、 σ_{qu} 分别为输入信号与量化误差的均方差, B 为量化级数, q 为量化步阶。由(3)式可以看出,量化级数越高,量化误差越小。如 12 位相机的量化误差比 8 位相机的量化误差小。此外,当量化级数一定时,输入信号的功率越大,量化误差越小。因此,当 CCD 相机一定时,输入光强的动态范围越大,系统的信噪比越高,量化误差越小。

为了验证上述理论,对不同光强范围的正弦条纹与相位误差的关系进行仿真。仿真采用了 8 位量化级数,输入信号为仅包含量化误差的不同光强范围的标准正弦条纹,条纹周期为 40 pixel,采用三步相移算法求解相位。图 3 为条纹光强动态范围对相位精度的影响,可以看出:量化误差随着条纹对比度的增加而减小。

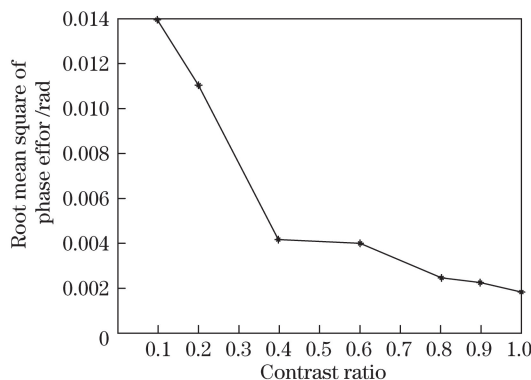


图 3 条纹光强动态范围对相位精度影响的仿真结果

Fig. 3 Simulation result for the influence of dynamic range of fringe intensity on phase accuracy

3.1.2 非线性误差分析

如图 1 所示,相位测量偏折术通过 LCD 显示屏将已编码的正弦条纹投影到待测物体表面,然后利用 CCD 相机采集含物体表面三维信息的变形条纹。CCD 相机采集到的光强为

$$I_o = F_c\{R(x,y)F_p[I_i(x,y)] + c(x,y)\}, \quad (4)$$

式中 I_i 为编码的正弦条纹, $c(x,y)$ 为由环境光引起的背景光的光强, $R(x,y)$ 为待测物体的反射率, $F_p[\cdot]$ 为 LCD 显示屏的实际响应函数, $F_c\{\cdot\}$ 为 CCD 相机的实际响应函数。在实际应用中, LCD 显示屏、CCD 相机的 γ 系数一般都大于 1。因此, LCD 显示屏和 CCD 相机的响应函数都是非线性函数, 如图 4 所示。

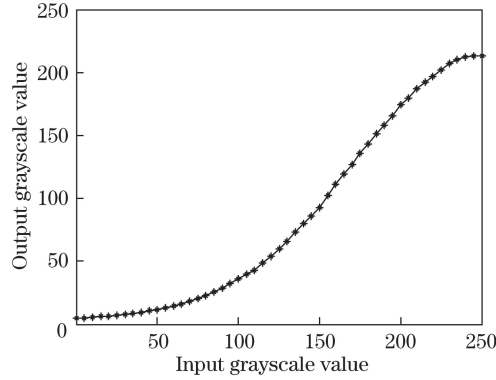


图 4 系统的实际响应曲线

Fig. 4 Measured response curve of system

系统的非线性表现为高次谐波的叠加,而理想的系统响应仅含一次谐波和零频分量,因此本研究采用基频幅值与二倍频幅值的比值(R_{FFA}/R_{FDA})评价条纹非线性的质量。如图 5 所示, R_{FFA}/R_{FDA} 越大,条纹的正弦性越好。非线性对相位精度影响的仿真结果如图 6 所示,可以看出,条纹的正弦性越好,相位误差越小。

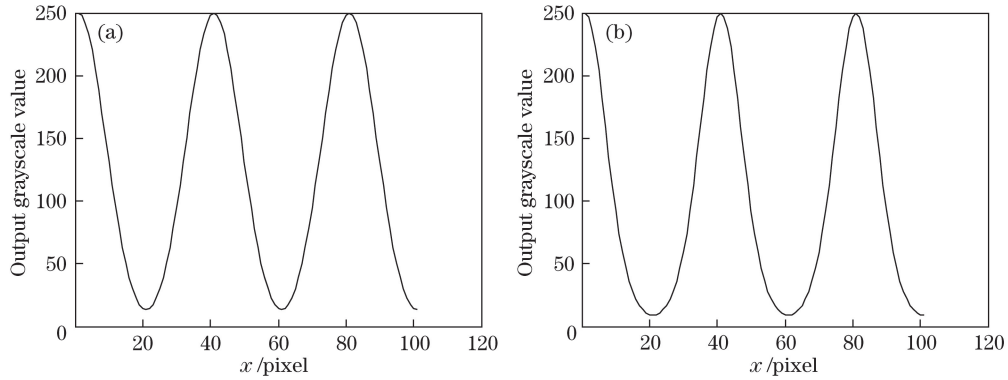


图 5 非线性与 R_{FFA}/R_{FDA} 直接关系的仿真结果。(a) $R_{FFA}/R_{FDA} = 12.24$; (b) $R_{FFA}/R_{FDA} = 4.23$

Fig. 5 Simulation results of direct relations between nonlinearity and R_{FFA}/R_{FDA} .

(a) $R_{FFA}/R_{FDA} = 12.24$; (b) $R_{FFA}/R_{FDA} = 4.23$

3.2 高质量条纹的影响因素分析

3.2.1 高对比度条纹的影响因素分析

假设编码的正弦条纹为

$$I_i(x,y) = a + b \cos[2\pi X(x,y)/T], \quad (5)$$

式中 a 为光强均值,一般情况下取 $a = 0.5$; b 为调制度; $X(x,y)$ 为像素坐标; T 为条纹周期。该正弦条纹经物体反射后可表示为

$$I_p(x,y) = RI_i(x,y) + c, \quad (6)$$

式中 R 为反射率, c 为背景光的光强。一般地,系统的响应为系统输入与系统点扩散函数(PSF)的卷积,因此 CCD 相机接收到的光强为

$$I_r(x,y) = I_p(x,y)h(x,y), \quad (7)$$

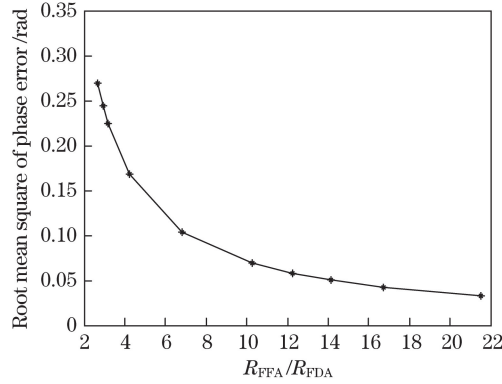


图 6 非线性对相位误差影响的仿真结果

Fig. 6 Simulation result for the effect of nonlinearity on phase error

式中 $h(x, y)$ 为系统的点扩散函数, 且

$$h(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right), \quad (x^2 + y^2 \leq R^2), \quad (8)$$

式中 $\sigma = AD$, A 为常数, D 为系统的入瞳直径, 且

$$D = f/F, \quad (9)$$

式中 F 为相机镜头的光圈数 (F 数), f 为相机镜头的焦距。以一维情况为例, 系统的响应为

$$I_r(x) = \mathfrak{F}^{-1}\{\mathfrak{F}[I_p(x)]\mathfrak{F}[h(x)]\}, \quad (10)$$

式中 $\mathfrak{F}[\cdot]$ 为傅里叶正变换, $\mathfrak{F}^{-1}[\cdot]$ 为傅里叶逆变换。因此 (10) 式可写为

$$I_r(x) = 2\pi R[a + b \exp(-\omega_0^2 \sigma^2 / 2) \cos(2\pi\omega_0 x)] + 2\pi c, \quad (11)$$

式中 ω_0 为圆频率。则对比度 C 为

$$C = \frac{I_r^{\max}(x) - I_r^{\min}(x)}{I_r^{\max}(x) + I_r^{\min}(x)} = Kb \exp(-\omega^2 \sigma^2 / 2), \quad (12)$$

式中 $K = R/(Ra + c)$, $\omega = 2\pi/T$ 。将 (9) 式代入 (12) 式, 可得对比度 C 为

$$C = \frac{I_r^{\max}(x) - I_r^{\min}(x)}{I_r^{\max}(x) + I_r^{\min}(x)} = Kb \exp\left(-\frac{A^2 f^2}{2T^2 F^2}\right). \quad (13)$$

从 (13) 式可以看出, CCD 相机获取正弦条纹的对比度由编码条纹的周期 T 、调制度 b 以及 CCD 相机镜头的 F 数决定。当调制度一定时, $T = D$ 时, 条纹对比度最小。

3.2.2 高正弦性条纹的影响因素分析

如图 4 所示, 系统的响应曲线由线性部分与畸变部分构成, 若相机采集到的光强处于线性区时, 则条纹的正弦性最好, 否则条纹严重畸变。因此当系统固定时, 可以通过调节参数使采集到的光强处于线性区, 以提高条纹的质量。考虑到系统的非线性, (7) 式可以改写为

$$I_r(x, y) = [I_{py}(x, y) * h(x, y)]^{\gamma_c}, \quad (14)$$

其中

$$I_{py}(x, y) = R [I_i(x, y)]^{\gamma_p} + c, \quad (15)$$

式中 $*$ 表示卷积, γ_p, γ_c 分别为 LCD 显示屏与 CCD 相机的非线性 γ 系数, R 为反射率。为了方便计算, 令 $\gamma_p = \gamma_c = 2$, 且考虑一维情况。设编码的面结构光为

$$I_i(x) = a + b \cos(\omega x), \quad (16)$$

则

$$I_{py}(x) * h(x) = \mathfrak{F}^{-1}\{\mathfrak{F}[I_{py}(x)]\mathfrak{F}[h(x)]\} = C + Ra^2 + Rb^2/2 + Rab \exp(-\omega_0^2 \sigma^2 / 2) \cos(\omega_0 x) + Rb^2/2 \cdot \exp(-2\omega_0^2 \sigma^2) \cos(2\omega_0 x). \quad (17)$$

将 (17) 式代入 (14) 式, 并对 (14) 式进行傅里叶变换, 即

$$\mathfrak{S}[I_r(x)] = \mathfrak{S}\{[I_{py}(x) * h(x)]^2\}. \quad (18)$$

化简后,基频幅值与二倍频幅值的比可表示为

$$\frac{R_{\text{FFA}}}{R_{\text{FDA}}} = \frac{k_4 b^2 + k_5 b^3 \exp(-2\sigma^2 \omega^2) + k_6}{(k_1 b^2 + k_2) b \exp(-1.5\sigma^2 \omega^2) + k_3 b \exp(-0.5\sigma^2 \omega^2)}, \quad (19)$$

式中 $k_1 \sim k_6$ 为常数,将 $\omega = 2\pi/T$ 、 $\sigma = AD$ 和 $D = f/F$ 代入(19)式,则正弦性 S 可以表示为

$$S = \left[k_4 b^2 + k_5 b^3 \exp\left(-\frac{2A^2 f^2}{T^2 F^2}\right) + k_6 \right] / \left[(k_1 b^2 + k_2) b \exp\left(-\frac{3A^2 f^2}{2T^2 F^2}\right) + k_3 b \exp\left(-\frac{A^2 f^2}{2T^2 F^2}\right) \right]. \quad (20)$$

由(20)式可以看出,CCD 相机采集到的条纹的正弦性由编码条纹的周期 T 、调制度 b 以及 CCD 相机镜头的光圈 F 数决定,通过优化上述参数可获得正弦性好的条纹,提高相位测量精度。

4 仿真与实验结果分析

4.1 仿真结果分析

由条纹质量模型可知,CCD 相机采集的条纹质量与编码条纹的调制度、周期以及相机镜头的 F 数有关。基于(13)式与(20)式对不同调制度、周期以及相机光圈 F 数的正弦条纹进行仿真计算,并分别求出这些条纹的对比度与正弦性。其中,(20)式中 $k_1 \sim k_6$ 分别取 1~6。仿真结果如图 7 与图 8 所示。其中,图 7 为系统参数与条纹对比度之间的关系,图 8 为系统参数与条纹正弦性的关系。

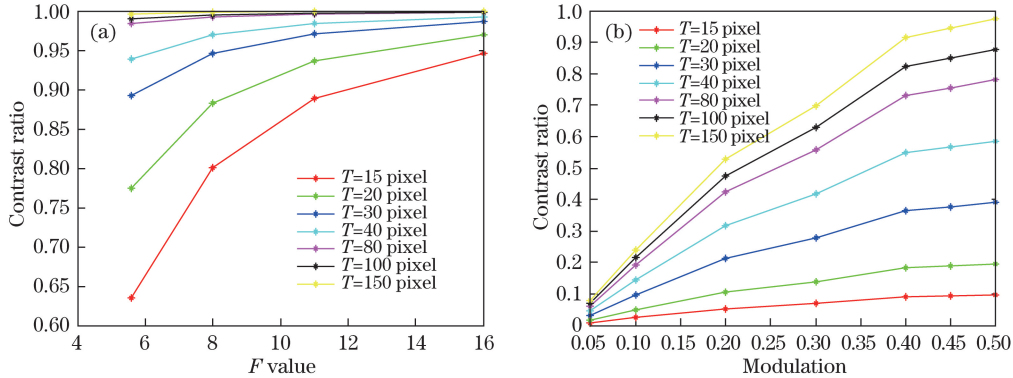


图 7 仿真得到的系统参数与条纹对比度的关系。(a) $b=0.40$ 时, F 数、条纹周期与条纹对比度的关系;

(b) 当 F 数一定时,条纹周期、调制度与条纹对比度的关系

Fig. 7 Relationships between system parameters and contrast ratio of fringe pattern obtained by simulation.

(a) Relationships between F value or fringe pattern period and contrast ratio of fringe pattern when b is 0.40;

(b) relationships between fringe pattern period or modulation and contrast ratio of fringe patten when F value is fixed at certain value

从图 7 可以看出:当编码条纹的调制度和周期一定时,对比度随着 F 数增大而增大;对比度随着周期增大而增大;编码条纹的调制度与条纹的对比度成正比。图 8 表明:条纹的正弦性与其周期、调制度以及相机镜头 F 数成反比,随着这些参数增大,正弦性变差。

4.2 实验结果分析

为了验证条纹质量分析模型,在不同的编码条纹周期、调制度以及 F 数下,对 CCD 相机采集条纹的对比度与正弦性进行实验分析。实验系统装置图如图 9 所示,系统由 CCD 相机(GT1660C,分辨率为 $1600 \text{ pixel} \times 1200 \text{ pixel}$,镜头焦距为 25 mm ,像素大小为 $5.5 \mu\text{m} \times 5.5 \mu\text{m}$)、LCD 显示屏($1920 \text{ pixel} \times 1080 \text{ pixel}$,像素大小为 $0.265 \text{ mm} \times 0.265 \text{ mm}$)以及计算机组成。实验中相机镜头的 F 数为 5.6、8.0、11.0 和 16.0。编码条纹的调制度 b 分别为 0.05、0.10、0.20、0.30、0.40、0.45 和 0.50,条纹周期 T 分别为 15, 20, 30, 40, 80, 100, 150 pixel,相机曝光时间为 150 ms。实验结果如图 10~12 所示。

从图 11 可以看出:当编码条纹的调制度与相机的 F 数一定时,随着条纹周期增大,对比度增大;当编码条纹的调制度与周期一定时,随着 F 数增大,小周期条纹的对比度增大,而大周期条纹的对比度则先减小后增大,即每个周期存在一个最佳的 F 数,使得对比度最大;当编码条纹的周期与相机 F 数一定时,随着调制度增大,条纹的对比度增大。图 11(a)与图 7(a)的仿真结果稍有偏差,这是由于在实际测量中,当光圈 F 数

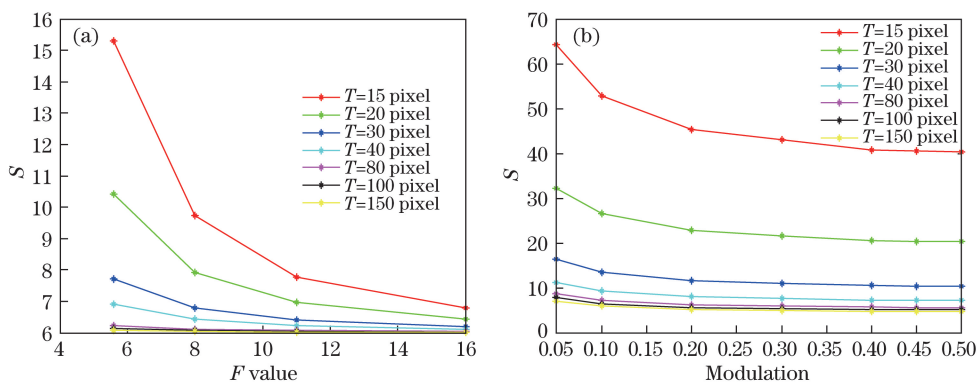


图 8 仿真得到的系统参数与条纹正弦性的关系。(a) $b=0.40$ 时, F 数、条纹周期与条纹正弦性的关系;
(b) 当 $F=11.0$ 时, 条纹周期、调制度与条纹正弦性的关系

Fig. 8 Relationships between system parameters and sinuousness of fringe pattern obtained by simulation.

(a) Relationships between F value or fringe pattern period and sinuousness of fringe pattern when b is 0.40;

(b) relationships between fringe pattern period or modulation and sinuousness of fringe pattern when F value is 11.0

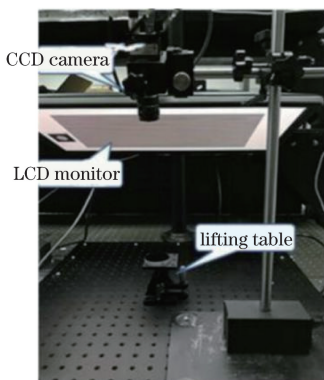


图 9 实验系统装置图

Fig. 9 Picture of experimental system

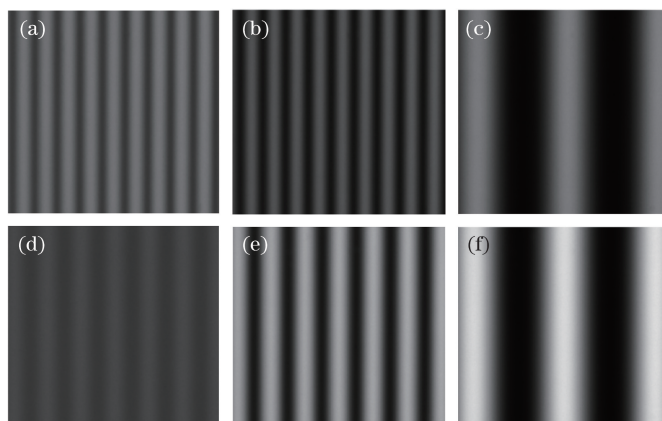


图 10 不同条件下相位测量偏折术中相机拍摄的条纹图。(a) $b=0.40$, $F=5.6$, $T=20$ pixel;
(b) $b=0.40$, $F=8.0$, $T=20$ pixel; (c) $b=0.40$, $F=8.0$, $T=80$ pixel; (d) $b=0.05$, $F=5.6$, $T=30$ pixel;
(e) $b=0.45$, $F=5.6$, $T=30$ pixel; (f) $b=0.45$, $F=5.6$, $T=80$ pixel

Fig. 10 Fringe patterns captured by CCD camera in PMD system under different conditions.

(a) $b=0.40$, $F=5.6$, $T=20$ pixel; (b) $b=0.40$, $F=8.0$, $T=20$ pixel; (c) $b=0.40$, $F=8.0$, $T=80$ pixel;
(d) $b=0.05$, $F=5.6$, $T=30$ pixel; (e) $b=0.45$, $F=5.6$, $T=30$ pixel; (f) $b=0.45$, $F=5.6$, $T=80$ pixel

较大时,相机的光照度很小,此时相机中的电子噪声、暗电流噪声对随机误差的影响较大(相对于光圈 F 数较小时),因此会导致对比度的计算稍有偏差。其他结果和前面的仿真结果相吻合。因此,要想获取高对比

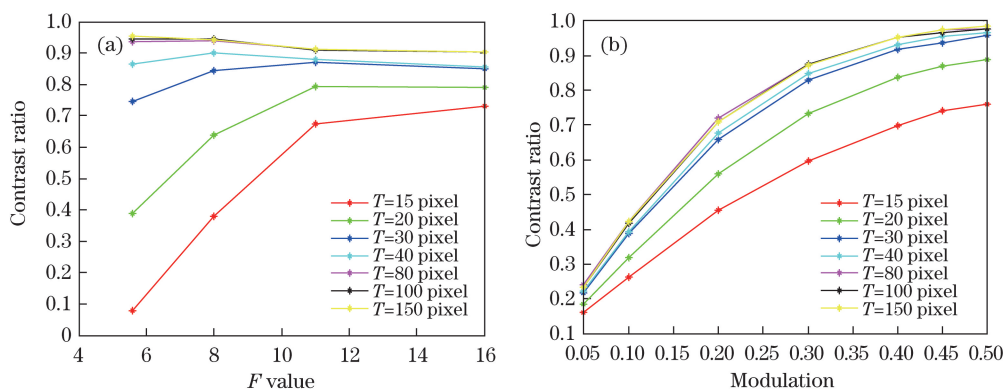


图 11 相位测量偏折术系统中系统参数与条纹对比度的关系。(a) $b=0.40$ 时, F 数、条纹周期与条纹对比度的关系;
(b) $F=5.6$ 时, 条纹周期、调制度与条纹对比度的关系

Fig. 11 Relationships between system parameters and contrast ratio of fringe pattern in PMD system.

(a) Relationships between F value or fringe pattern period and contrast ratio of fringe pattern when b is 0.40;

(b) relationships between fringe pattern period or modulation and contrast ratio of fringe pattern when F value is 5.6

度的条纹,可以编码调制度高且周期与相机 F 数相匹配(周期大小等于入瞳直径的 2 倍)的正弦条纹。比如条纹周期为 20 pixel 时,相机 F 数设置为 11.0,采集到的条纹的对比度最高。

从图 12 可以看出:当编码条纹的调制度与相机的 F 数一定时,随着条纹周期增大,正弦性逐渐减小;当编码条纹的调制度与周期一定时,随着 F 数增大,正弦性逐渐减小;当编码条纹的周期与相机 F 数一定时,随着调制度增大,正弦性逐渐减小。这和 4.1 节的仿真结果吻合得较好。当编码周期为 15 pixel、调制度为 0.1 以及相机镜头 F 数为 5.6 时,可获得正弦性最佳的条纹。

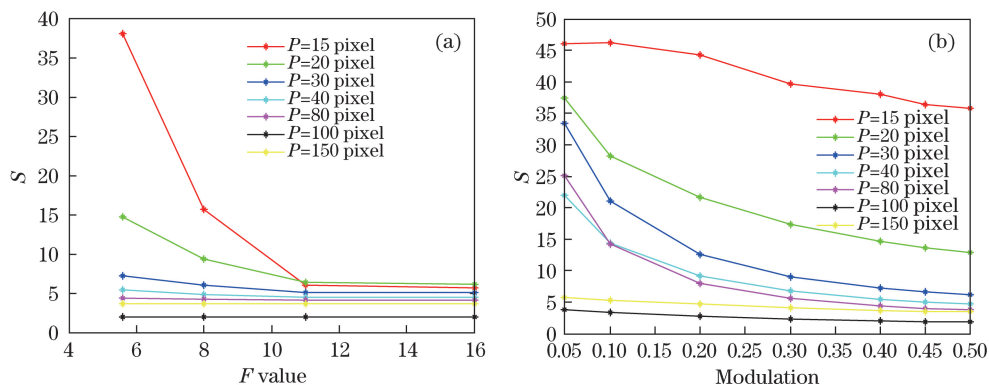


图 12 相位测量偏折术系统中系统参数与条纹正弦性的关系。(a) $b=0.40$ 时, F 数、条纹周期与条纹正弦性的关系;
(b) $F=5.6$ 时, 条纹周期、调制度与条纹正弦性的关系

Fig. 12 Relationships between system parameters and sinuousness of fringe pattern in PMD system.

(a) Relationships between F value or fringe pattern period and sinuousness of fringe pattern when b is 0.40;

(b) relationships between fringe pattern period or modulation and sinuousness of fringe pattern when F value is 5.6

在实验条件下,当编码结构光的周期为 30~80 pixel、调制度为 0.25~0.40 以及相机镜头 F 数为 8.0~11.0 时,可以获取高质量的条纹。在实际应用当中,可以按照上述模型与方法对相位测量偏折术系统的条纹质量进行分析,获得优化的编码条纹的周期、调制度以及相机镜头 F 数,以获取高质量的条纹,实现高精度测量。

5 结 论

相位测量偏折术系统中待测物体的相位是从获取的条纹中解调而来的,条纹质量至关重要。对高质量条纹的获取进行了探究与分析,建立了条纹质量分析模型。当编码条纹的调制度与周期一定时,获取条纹的对比度随相机镜头 F 数增大而增大,获取条纹的正弦性随 F 数增大而变差;当编码条纹的调制度与周期一

定时,获取条纹的对比度随着周期增大而增大,获取条纹的正弦性随周期增大而变差;当编码条纹的调制度与 F 数一定时,获取条纹的对比度随调制度增大而增大,获取条纹的正弦性随着调制度增大而变差。实验结果与仿真分析结果吻合得较好。在实验系统条件下,当设置编码条纹的周期为 30 pixel,调制度为 0.35 以及相机镜头 F 数为 8 时,获取的条纹质量较高。建立的条纹质量分析模型不仅可以用于相位测量偏折术,还可以用于面结构光三维测量等其他技术。

参 考 文 献

- [1] Knauer M C, Kaminski J, Hausler G. Phase measuring deflectometry: a new approach to measure specular free-form surfaces[C]. SPIE, 2004, 5457: 366-376.
- [2] Xiao Yongliang, Su Xianyu, Chen Wenjing. Specular shape measurement with phase measuring deflectometry based on bundle adjustment[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(12): 1212007.
肖永亮, 苏显渝, 陈文静. 基于光束法平差的相位测量偏折术镜面面形测量[J]. 光学学报, 2011, 31(12): 1212007.
- [3] Wu Zhiyun. Carrier removal method in fringe projection profilometry using Zernike polynomials[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(4): 0412011.
吴志云. 用泽尼克多项式消除三维轮廓术中的条纹载频[J]. 光学学报, 2011, 31(4): 0412011.
- [4] Song L, Yue H M, Kim H, *et al.* A study on carrier phase distortion in phase measuring deflectometry with non-telecentric imaging[J]. Optics Express, 2012, 20(22): 24505-24515.
- [5] Wu Y X, Yue H M, Li M Y, *et al.* Dynamic specular surface measurement based on color-encoded fringe reflection technique[J]. Optical Engineering, 2016, 55(2): 024104.
- [6] Yue H M, Wu Y X, Zhao B Y, *et al.* A carrier removal method in phase measuring deflectometry based on the analytical carrier phase description[J]. Optics Express, 2013, 21(19): 21756-21765.
- [7] Song L, Yue H M, Liu Y, *et al.* Phase unwrapping method based on reliability and digital point array[J]. Optical Engineering, 2011, 50(4): 43605.
- [8] Wu Y X, Yue H M, Yi J Y, *et al.* Single-shot three-dimensional shape measurement of specular surfaces by orthogonal color fringe pattern reflection technique[C]. SPIE, 2014, 9276: 927603.
- [9] Song Lei. Three-dimensional morphology measurement based on fringe projection and fringe reflectance[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2012.
宋雷. 基于条纹投影和条纹反射的三维形貌测量[D]. 成都: 电子科技大学, 2012.
- [10] Su X Y, Zhou W S, von Bally G, *et al.* Automated phase-measuring profilometry using defocused projection of a Ronchi grating[J]. Optics Communications, 1992, 94(6): 561-573.
- [11] Guo H W, Zhao Z. Nonlinearity correction in digital fringe projection profilometry by using histogram matching technique[C]. SPIE, 2007, 6616: 661621.
- [12] Xiao Yanshan, Cao Yiping, Wu Yingchun, *et al.* Gamma nonlinearity correction based on Fourier spectrum analysis for phase measuring profilometry[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(12): 1212004.
肖焱山, 曹益平, 武迎春, 等. 基于傅里叶频谱分析的相位测量轮廓术系统 Gamma 非线性校正方法[J]. 光学学报, 2012, 32(12): 1212004.
- [13] Liu K, Wang Y C, Lau D L, *et al.* Gamma model and its analysis for phase measuring profilometry[J]. Journal of the Optical Society of American, 2010, 27(3): 553-562.
- [14] Hoang T, Pan B, Nguyen D, *et al.* Generic gamma correction for accuracy enhancement in fringe-projection profilometry[J]. Optics Letters, 2010, 35(12): 1992-1994.
- [15] Zhou Ping, Zhu Tongjing, Liu Xinran, *et al.* Correction of phase error overcompensation and under-compensation in structured light measurement[J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(1): 56-62.
周平, 朱统晶, 刘欣冉, 等. 结构光测量中相位误差的过补偿与欠补偿校正[J]. 光学精密工程, 2015, 23(1): 56-62.
- [16] Zhang S, Huang P S. Phase error compensation for a 3-D shape measurement system based on the phase-shifting method[J]. Optical Engineering, 2007, 46(6): 063601.
- [17] Peng J Z, Ouyang H K, Yu Q, *et al.* Phase error correction for fringe projection profilometry by using constrained cubic spline[J]. Advances in Manufacturing, 2014, 2(1): 39-47.
- [18] Zhang S. Active versus passive projector nonlinear gamma compensation method for high-quality fringe pattern generation[C]. SPIE, 2014, 9110: 911002.
- [19] Zhao Bing, Guo Bin, Fang Ruhua, *et al.* Effect of quantization error on the computed of phase shifting measurement

- [J]. Acta Optica Sinica, 1996, 16(12): 1767-1772.
- 赵兵, 郭彬, 方如华, 等. 相位移法中的量化误差效应[J]. 光学学报, 1996, 16(12): 1767-1772.
- [20] Li Yong. Study on key technology and application of phase measurement profilometry[D]. Chengdu: Sichuan University, 2006.
- 李勇. 相位测量轮廓术关键技术及应用研究[D]. 成都: 四川大学, 2006.
- [21] Zhang Kexiong, Cao Yiping, Huang Qianghui. A method of restraining the digitalized error in phase measurement profilometry[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 20(2): 221-224.
- 张可雄, 曹益平, 黄强辉. 一种抑制相位测量轮廓术数字化误差的方法[J]. 光电子 • 激光, 2009, 20(2): 221-224.
- [22] Hu E, Hu Y, Fang H F. A novel phase-recovering algorithm for the intensity quantization error in the digital grating phase-shifting profilometry[J]. Optik, 2011, 122: 2227-2229.
- [23] Wu Y X, Yue H M, Yi J Y, *et al.* Phase error analysis and reduction in phase measuring deflectometry[J]. Optical Engineering, 2015, 54(6): 064103.