

文章编号: 1005-5630(2013)01-0006-06

数字相移测量中的高精度相位误差补偿*

褚利文¹, 张 旭², 朱利民¹

(1. 上海交通大学 机械与动力工程学院, 上海 200240;

2. 上海大学 机电工程与自动化学院, 上海 200072)

摘要: 数字相移测量的主要误差来源于由数字投影机引入的 Gamma(γ)畸变。投影范围内的 γ 非一致性使得基于单一 γ 的校正技术和相位误差补偿技术存在较大残余误差。在分析 γ 非均匀分布的基础上, 提出了基于像素的相位误差查找表补偿方法。该方法根据像素自身的 γ , 动态地建立相应的相位误差查找表, 进行相位误差补偿, 有效提高了补偿精度。对实际测量结果做了分析与基于单一 γ 的方法进行了比较, 证明了基于像素的相位误差查找表补偿方法能够获得更高的精度。

关键词: 相移; γ 标定; 相位误差

中图分类号: TN 206 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1005-5630.2013.01.002

High accuracy phase error compensation for digital fringe projection profilometry

CHU Liwen¹, ZHANG Xu², ZHU Limin¹

(1. School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: The Gamma (γ) distortion caused by digital video projector contributes most for phase error in digital fringe projection profilometry. The residue phase error is still non-negligible after γ correction and phase error compensation based on single γ value. By analyzing the non-uniform distribution of γ , a novel phase error compensation technique, which dynamically constructs the phase error look-up-table (LUT) regarding to the γ value of the specific pixel, is introduced and it effectively improves the accuracy of phase error compensation. The measured results are analyzed and compared and it shows that higher accuracy could be achieved with this method.

Key words: phase shifting; γ calibration; phase error

引 言

相位轮廓术(phase measurement profilometry, PMP)是一种以相移为基础的结构光测量方法,它能够很好地抑制被测对象表面的颜色、反射率以及环境光的干扰^[1]。通过分析多幅有一定相位差的光栅条

* 收稿日期: 2012-05-11

基金项目: 国家 973 重点基础研究项目(2011CB706804); 上海市基础研究重点项目(10JC1408000)

作者简介: 褚利文(1986-), 男, 山西太原人, 硕士研究生, 主要从事结构光三维测量方面的研究。

纹图像,PMP能够计算图像中像素的相位值,进而求解出观察点的深度信息^[2-3]。投影机和摄像机的非线性所导致的 γ 畸变是数字PMP测量的主要误差来源^[4-11]。Huang P S^[4-8]等学者都先后从不同角度对 γ 畸变模型进行了深入研究,得出 γ 畸变引入的高次谐波项是相位误差的主要来源,因此相位误差具有一定的规律^[8]。Huang P S^[9-11]等提出了多种办法补偿相位误差。

γ 校正法和相位误差补偿法能够有效提高相位精度,但均忽略了 γ 非均匀分布的多特点,仅采用单一 γ 对整个图像进行校正而导致的参与误差在高精度检测应用场景中是无法忽略的。文章对数字投影机的亮度非均匀分布和 γ 非均匀分布的规律进行研究,通过理论分析和实验验证相位残余误差,提出一种基于像素的相位误差查找表,根据 γ 的分布规律进行相位误差补偿,有效提高了相位精度并最大限度优化了算法的空间和时间效率。

1 相移原理

在相移法中,相移条图案中的任意点亮度可表示为:

$$I_n = A + B \cos\left(2\pi fx - \frac{2\pi n}{N}\right) \quad (1)$$

其中, x 为横坐标, I_n 为亮度, A 和 B 均为常数, f 为正弦曲线的频率, n 为当前相移步数, N 为相移总步数。在不考虑 γ 的情况下,该点在摄像机拍摄到的图像中对应点的亮度为:

$$I'_n = A' + B' \cos\left(\varphi - \frac{2\pi n}{N}\right) \quad (2)$$

其中, A' 为该像素在各步相移中亮度的平均值,可以表示为:

$$A' = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} I'_n \quad (3)$$

该点亮度在相移过程中的变化量可表示为:

$$B' = \frac{2}{N} \left\{ \left[\sum_{n=0}^{N-1} I'_n \sin\left(\frac{2\pi n}{N}\right) \right]^2 + \left[\sum_{n=0}^{N-1} I'_n \cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right) \right]^2 \right\}^{1/2} \quad (4)$$

该像素的相位值 φ 可表示为:

$$\varphi = \arctan \left[\frac{\sum_{n=0}^{N-1} I'_n \sin\left(\frac{2\pi n}{N}\right)}{\sum_{n=0}^{N-1} I'_n \cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right)} \right] \quad (5)$$

由于 $\varphi = 2\pi fx \pmod{2\pi}$ 在 $0 \sim 2\pi$ 之间,因此称为相对相位。通过相位解卷绕进而可以确定绝对相位,求解出深度信息。

2 γ 畸变

结构光测量系统中的亮度传递函数是非线性的,系统投射出的正弦条纹图案包含了高次谐波项。如图1所示,其中二次、三次谐波项都由 γ 畸变导致的。 γ 畸变导致的相位误差,如图2所示。

3 投影机的 γ 非均匀性

数字投影机的投影范围某一点的实际输出亮度与位置有关。图3所示为不同位置点的亮度传递函数,可表示为:

$$I_{\text{out}} = f(I_{\text{in}}, x, y) \quad (6)$$

任意点的 γ 可以表示为:

$$\gamma = g(x, y) \quad (7)$$

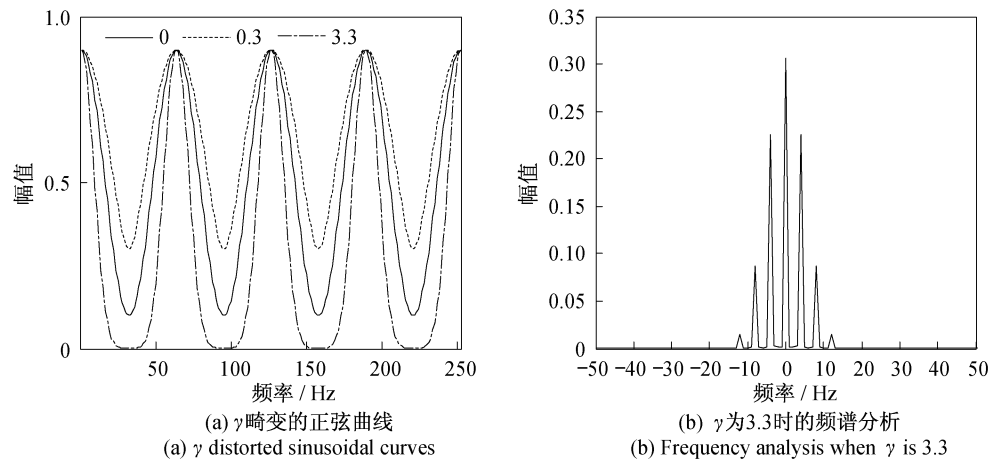


图 1 γ 畸变正弦曲线及频谱分析
Fig. 1 γ distorted sinusoidal curves and frequency analysis

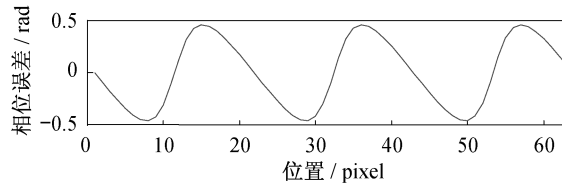


图 2 γ 为 3.3 时的相位误差
Fig. 2 Phase error when γ is 3.3

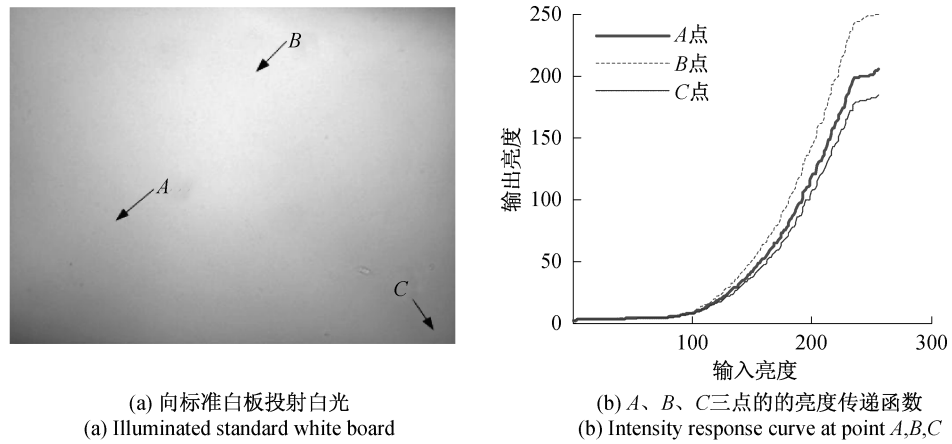


图 3 不同点的亮度传递函数对比
Fig. 3 Comparison of intensity response curve at different points

因此可以得出如下关系^[8]：

$$\Delta\varphi = \arctan \left(\frac{\sum_{m=1}^{\infty} (B_{mN-1} - B_{mN+1}) \sin(mN\varphi)}{B_1 + \sum_{m=1}^{\infty} (B_{mN-1} + B_{mN+1}) \cos(mN\varphi)} \right) \quad (8)$$

其中

$$B_i = \alpha \alpha_p (1 - \beta)^\gamma \sum_{m=0}^{\infty} b_{i,m}$$

$$b_{i,m} = \binom{\gamma}{2m+i} \left(\frac{\beta}{2-2\beta} \right)^{2m+i} \binom{2m+i}{m}$$

当 γ 在 1~5 之间时, γ 与最大相位误差之间的关系如图 4 所示。

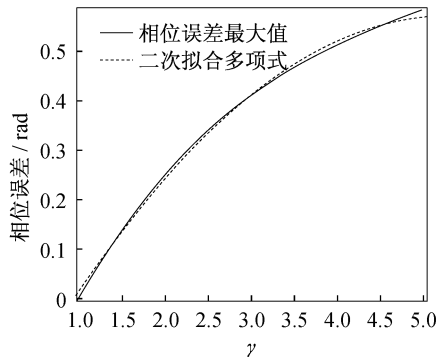


图 4 相位误差最大值与 γ 的关系

Fig. 4 Relationship between γ and maximum phase error

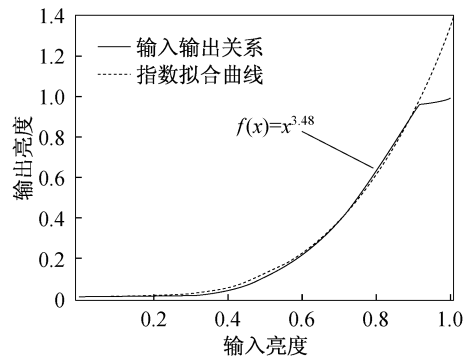


图 5 亮度输入输出指数拟合

Fig. 5 Curve fitting of intensity response using power function

γ 和最大误差的关系可拟合为:

$$\Delta\varphi_{\max} = f(\gamma) = -0.03\gamma^2 + 0.32\gamma - 0.27 \quad (9)$$

对式(9)两边同时求一阶导数:

$$\frac{d\Delta\varphi_{\max}}{d\gamma} = -0.06\gamma + 0.32 \quad (10)$$

由式(10)得出,当 γ 变化 0.01 时,最大相位误差改变了 0.003 2。该误差对于高精度测量是不能忽略的。事实上, γ 服从正态分布^[8],并且标准差大于 0.02。因此 γ 的非均匀分布特性在进行相位误差补偿时必须加以考虑。

4 相位误差校正

γ 可以通过 ([10]) 方法进行标定:首先调节投影机至聚焦状态,然后向标准白板投射白光,亮度从 0~255 依次递增。根据 γ 所服从的幂律定律,由式(6)和式(7)可得式(11),任意点的亮度输入输出关系都服从式(12)的关系函数,并且该点的 $\gamma = g(x, y)$,进而得到 γ 矩阵 $\mathbf{G}_{m \times n}$ 。其中, m 和 n 分别为图像的宽和高。

$$I_{\text{out}} = f(I_{\text{in}}, x, y) = (I_{\text{in}})^{g(x, y)} \quad (11)$$

$$I_{\text{in}} = f^{-1}(I_{\text{out}}, x, y) = (I_{\text{out}})^{1/g(x, y)} \quad (12)$$

根据 γ 矩阵,可以在相位误差查找表(look up table, LUT)^[11]的基础上,基于单个像素建立二维相位误差查找表:

第一步:在 γ 的最大值和最小值之间取均匀间隔 d ,根据 γ 标定实验结果的有效数字,间隔 $d=0.01$ 时能够获得较高精度。

第二步:用查找表存储理论相位与实际相位之间的相位差。

第三步:将相位误差查找表与相应的 γ 关联起来,并存储在查找表中,见图 6(a)。

测量中对任意点都可以使用相位误差查找表进行相位误差补偿。首先根据 γ 矩阵确定该点的 $\gamma = G(x, y)$;其次根据 γ 确定相应的相位误差查找表,对介于表中两个值之间的 γ 可通过线性插值来计算相应的相位误差查找表,见图 6(b);最后进行相位误差补偿。

对于特定的系统,只需事先进行一次标定便可建立基于像素的相位误差查找表,不会影响实际测量过程。任意 γ 对应的相位误差查找表通过线性插值动态生成,具有良好空间效率和时间效率。

3.31	-0.090 4	-0.170 2	-0.262 4	...
3.32	-0.091 2	-0.175 2	-0.270 5	...
3.33	-0.092 4	-0.178 3	-0.272 4	...
...				

3.31	-0.090 4	-0.170 2	-0.262 4	...
3.317	-0.090 6	-0.173 7	-0.26 81	...
3.32	-0.092 4	-0.178 3	-0.272 4	...

(a) 基于像素的相位误差查找表
(a) Pixel based phase error look-up table

(b) γ 为3.317时的相位误差查找表
(b) Phase error look-up table when γ is 3.317

图 6 基于像素的相位误差查找表及插值方法

Fig. 6 Pixel based phase error look-up table and interpolation method

5 实验与分析

通过标准白板和复杂自由曲面对象测量实验进一步验证了方法的有效性,并将结果与现有方法进行对比。图 7 为实验系统设备。实验使用的结构光测量系统由一台联想 T160 DLP 投影机(分辨率 1 024 × 768)和一个 Adimec 1000c(分辨率 1 024 × 1 024)工业相机组成,见图 7(a)。图 7(b)和图 7(c)分别为实验用标准白板和复杂曲面对象。

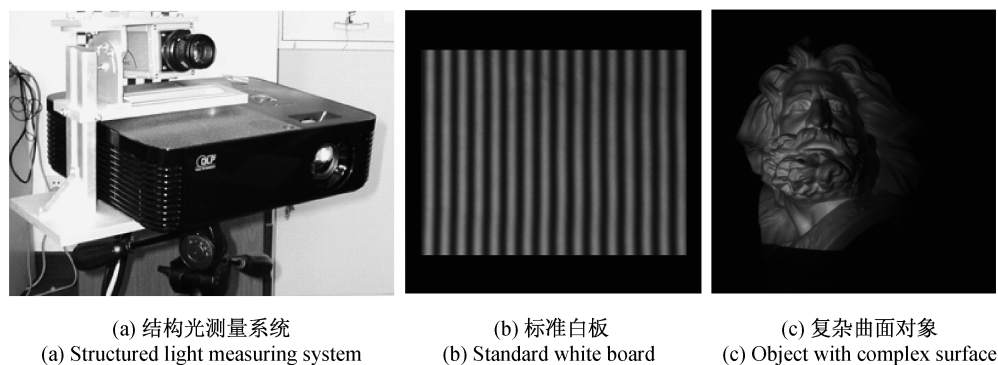


图 7 实验系统设备

Fig. 7 Measuring system and devices

图 8 所示为系统标定所得的伽玛矩阵。 γ 的分布具有明显的区域性和非线性。图中 γ 的平均值为 3.44,标准差为 0.04。

通过以下 3 种方法分别对标准白板进行测量并获得相位值:

- (1) 单一 γ 校正技术^[8-9];
- (2) 基于固定相位误差查找表的相位误差补偿^[11];
- (3) 基于像素相位误差查找的相位误差补偿。

对三组结果分别选取第 100 行、450 行和 800 行进行横截面相位分析,每个横截面选取 650 个数据点,实验结果如表 1 所示。第一列为单一 γ 校正技术结果,存在明显的残余误差;第二列为固定相位查找表补偿结果,图像中心区域的第 450 行补偿效果良好;但位于图像边缘处的第 100 行和第 800 行仍存在明显残余误差;第三列为基于像素的相位误差查找表补偿结果,整

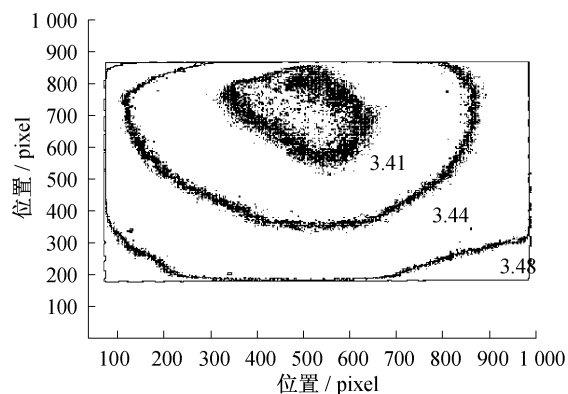


图 8 γ 分布图

Fig. 8 γ distribution

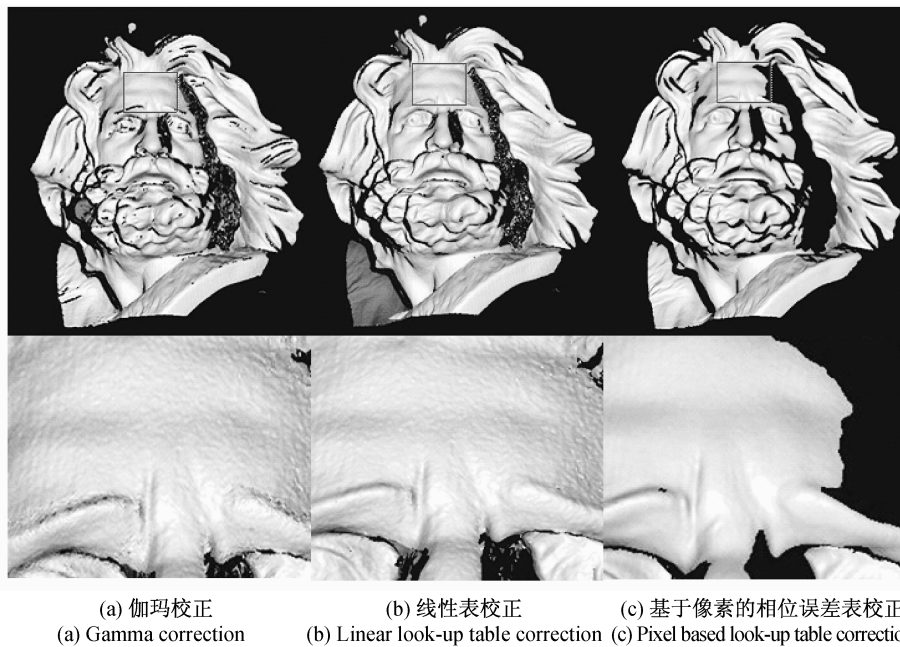
个图像区域内具有良好的补偿效果。与前两列相比,相位误差的均值和标准差分别减小了25%和10%,说明该方法能够有效地提高相位误差补偿的精度。

对于表面复杂白色石膏雕像同样依次进行了上述三组实验,并且在此基础上进行了相位解卷绕与三维曲面重构,结果如图9所示。图9(a)只进行 γ 校正,曲面仍存在水波纹;图9(b)进行线性表校正后,中心区域的水波纹得到了明显的抑制,但是边缘区域仍不够光滑;图9(c)进行了基于像素的相位误差表校正,图整个区域内都得到了光滑的曲面,有效提高了曲面质量。

表1 标准白板实验结果

Tab. 1 Standard white board experiment results

行数		单一 γ 值 校正	固定相位误差 查找表补偿	基于像素的相位 误差表补偿
100	均值	0.111 5	0.063 4	0.047 5
	标准差	0.143 7	0.100 9	0.094 8
450	均值	0.082 6	0.046 9	0.046 9
	标准差	0.136 8	0.092 4	0.099 8
800	均值	0.094 2	0.054 7	0.047 1
	标准差	0.142 8	0.102 8	0.092 4



(a) 伽玛校正 (a) Gamma correction (b) 线性表校正 (b) Linear look-up table correction (c) 基于像素的相位误差表校正 (c) Pixel based look-up table correction

图9 复杂曲面对象实验

Fig. 9 Complex surface object experiment results

6 结论

γ 畸变导致相移条纹包含高次谐波项,条纹实际亮度变化呈非正弦化,计算求解出的相位结果包含相位误差。针对数字投影机结构特点,通过实验分析研究数字投影机亮度值和 γ 值非均匀分布的特性,推导出 γ 波动产生的相位误差波动,指出测量结果中的残余误差对于高精度测量是无法忽略的。在此基础上,通过标定得出 γ 矩阵,提出了基于像素的二维相位误差查找表,改进了基于单一 γ 的查找表补偿方法相位测量。通过多组实验,对比了现有校正方法及文中提出的方法。实验结果表明,提出的方法比现有校正方法误差减小了。

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.

(下转第17页)

- [8] KYEA J, MCINTYREB G, NORIHIROC Y, *et al.* Polarization aberration analysis in optical lithography systems[J]. *Optical Microlithography*, 2006, 36(7):1553-1559.
- [9] 张颖, 李林, 黄一帆. 光学系统的偏振像差分析[J]. *光学技术*, 2005, 31(2):202-207.
- [10] CHENAULT D B, PEZZANITI J L, CHIPMAN R A. Mueller matrix algorithms[J]. *Polarization Analysis and Measurement*, 1992, 1746:231-246.
- [11] PEZZANITI J L, CHIPMAN R A. Mueller matrix imaging polarimetry[J]. *Optical Engineering*, 1995, 34(6):1558-1568.
- [12] YUN G, CRABTREE K, CHIPMAN R A. Three-dimensional polarization ray tracing and diattenuation calculation[J]. *SPIE OSA*, 2010, 7652:76521X1-76521X7.
- [13] YUN G, CHIPMAN R A. Three-dimensional polarization ray tracing, retardance[J]. *SPIE OSA*, 2010, 7652:76521W1-76521W7.
- [14] 李旸晖, 沈伟东, 章岳光, 等. 基于 Jones 矩阵的薄膜诱导偏振像差分析[J]. *光学学报*, 2010, 30(12):s100109-1-s100109-4.

=====

(上接第 11 页)

- [2] SRINIVASAN V, LIU H C, HALIOUA M. Automated phase-measuring profilometry of 3-D diffuse objects[J]. *Applied Optics*, 1984, 23(18):3105-3108.
- [3] ZHANG S. Recent progresses on real-time 3D shape measurement using digital fringe projection techniques[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2010, 48(2):149-158.
- [4] HUANG P S, ZHANG C P, CHIANG F P. High-speed 3-D shape measurement based on digital fringe projection[J]. *Optical Engineering*, 2003, 42(1):163-168.
- [5] GUO H W, HE H T, CHEN M Y. Gamma correction for digital fringe projection profilometry[J]. *Applied Optics*, 2004, 43(14):2906-2914.
- [6] 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.
- [7] 郑东亮, 达飞鹏. 提高数字光栅投影测量系统精度的 Gamma 校正技术[J]. *光学学报*, 2011, 31(5):1-6.
- [8] LIU K, WANG Y C, LAU D L, *et al.* Gamma model and its analysis for phase measuring profilometry[J]. *JOSA A*, 2010, 27(3):553-562.
- [9] HUANG P S, HU Q J, CHIANG F P. Double three-step phase-shifting algorithm[J]. *Applied Optics*, 2002, 41(22):4503-4509.
- [10] 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):0636001-0636019.
- [11] ZHANG S, YAU S T. Generic non-sinusoidal phase error correction for three-dimensional shape measurement using a digital video projector[J]. *Applied Optics*, 2007, 46(1):36-43.