

文章编号 1004-924X(2015)01-0056-07

## 结构光测量中相位误差的过补偿与欠补偿校正

周 平<sup>1,2\*</sup>, 朱统晶<sup>1</sup>, 刘欣冉<sup>1</sup>, 袁俊杰<sup>1</sup>

- (1. 东南大学 生物科学与医学工程学院, 江苏 南京 210096;  
2. 东南大学 苏州研究院, 江苏 苏州 215123)

**摘要:**针对现有结构光测量中采用的相位误差补偿算法存在的相位误差过补偿或欠补偿问题,提出了一种新的相位补偿误差校正算法。推导了环境光下四步相移的相位误差数学模型,解释了相位误差过补偿、欠补偿的产生原因;通过数学推导获得相位误差的解析表达式,提出了相位误差过补偿、欠补偿的校正算法。该方法通过向标定平面投射 4 步相移图像、16 步相移图像与黑白图像获得相位误差系数;然后在 8 种不同环境光条件下重复这一步骤获得多组系数;最后运用参数拟合法获得相位误差数学模型的具体表达式。实验结果表明:无论在黑暗环境还是光环境下,利用该修正方法进行相位误差补偿后均可使相位精度达到 0.002 rad,比进行相位误差补偿前提高了 8.6 倍左右,比查找表(LUT)提高了 2.5 倍左右。该算法精度高,速度快,能有效解决相位误差过补偿、欠补偿的问题。

**关键词:**结构光测量;相位误差;过补偿;欠补偿;环境光

**中图分类号:** TB92; TP391 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152301.0056

## Correction of phase error overcompensation and under-compensation in structured light measurement

ZHOU Ping<sup>1,2\*</sup>, ZHU Tong-jing<sup>1</sup>, LIU Xin-ran<sup>1</sup>, YUAN Jun-jie<sup>1</sup>

- (1. School of Biological Science & Medical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;  
2. Suzhou Research Institute of Southeast University, Suzhou 215123, China)

\* Corresponding author, E-mail: capzhou@163.com

**Abstract:** In structured light measurement, the current phase error compensation algorithms always lead to phase error overcompensation or under-compensation as the ambient light is varied. Therefore, a new correction method for the phase compensation errors was proposed. Based on analyzing the impact of ambient light on phase errors of four-step phase-shifting method, the reasons of phase error overcompensation and under-compensation were illuminated, the expression of the phase errors was deduced and a method to correct the phase compensation error was proposed. To compensate phase error accurately, a group of four-step phase-shifting images, sixteen-step phase-shifting images, black and white images were projected to the calibration plane, then the operation was repeated in eight different ambient light conditions to obtain several groups of coefficients. Subsequently, the analytical expression was obtained by a curve fitting. Experimental results show that the accuracy of phase error compensation is 0.002 rad no matter under dark or light environments when the method is applied,

收稿日期:2014-03-14;修订日期:2014-05-12.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61179035);苏州市自然科学基金资助项目(No. SYG201313)

which is about 9.6 times higher than that without phase error compensation and about 3.5 times higher than that with Look-Up-Table (LUT) compensation only. This method is characterized by higher accuracy and reliability and can be used to compensate the phase errors in varied ambient lights accurately.

**Key words:** structured light measurement; phase error; overcompensation; under-compensation; ambient light

## 1 引言

结构光测量是一种典型的光学三维测量方法。该方法将光栅图像投射到物体表面,采集被物体表面轮廓调制过的光栅信息,通过立体视觉原理计算出物体的三维信息<sup>[1-3]</sup>。基于结构光测量的物体表面轮廓测量系统由数字投影仪、CCD相机、待测物体与计算机构成。其中,投影仪和CCD相机都具有由gamma非线性变换引起的光栅非正弦化效应,该效应使包含有物体轮廓信息的相位值产生误差,降低了系统的测量精度<sup>[4-5]</sup>。

为了减少gamma非线性引起的误差,常采用生成系统误差的查找表法(Look-Up-Table, LUT)来修正相位误差。Zhang等首先计算了系统gamma值,然后生成系统误差的查找表<sup>[6]</sup>。Pan等分析了gamma效应对相位误差的影响,建立了相位误差的数学模型<sup>[7]</sup>。Chen等提出基于平滑样条插值(SSA)的方法来生成查找表<sup>[8]</sup>,有效降低了随机误差的影响。Guo等利用光栅图像的统计信息,通过归一化累计直方图来估计系统gamma值<sup>[9]</sup>。近年来,gamma非线性数学模型成为了研究热点<sup>[9-11]</sup>。Liu等推导了相位测量轮廓术中的gamma非线性数学模型,并在此基础上分析误差,提出了两种相位补偿方法<sup>[12]</sup>。Hoang等提出了一种基于gamma预编码的gamma校正方法<sup>[13]</sup>。Li等在Liu的模型基础上考虑投影仪特性,提高了算法的精度<sup>[14]</sup>。Zhang等则进一步发展Liu和Li的方法,建立了通用的gamma模型<sup>[15]</sup>。

然而,在实际测量中使用查找表、gamma值进行误差补偿时均未考虑测量环境,特别是测量中环境光对相位误差的影响。理论分析与实验数据均发现在考虑环境光变化时,用同一系统测量同一物体,在物体的相同位置的相位误差小于无环境光(黑暗环境)情况下的相位误差。进一步分

析表明:若相位误差补偿预处理时的环境光弱于实际测量时的环境光,则存在相位误差过补偿,即采用的补偿相位值大于实际需要补偿的相位值;反之,则存在相位误差欠补偿,即采用的补偿相位值小于实际需要补偿的相位值。本文提出了一种相位测量轮廓术中相位误差过补偿与欠补偿的校正算法,以解决环境光变化对相位误差补偿的影响,提高测量精度。

## 2 原理

### 2.1 环境光下相位误差模型

结构光三维测量中,理想的正弦光栅为:

$$I_n = A + B \cos(\varphi_i + 2\pi n/N), \quad (1)$$

其中:A和B是用户定义的常数,通常 $A=B$ ;N为相移图像数, $n$ 为相移图像索引; $\delta_n = 2\pi n/N$ , $\varphi_i = 2\pi f x$ 是光栅相位,对应的解相公式为:

$$\varphi_i = \arctan \left[ \frac{\sum_{n=0}^{N-1} I_n \sin(\delta_n)}{\sum_{n=0}^{N-1} I_n \cos(\delta_n)} \right]. \quad (2)$$

实际测量中,依据Hoang等的研究<sup>[13]</sup>可将投影仪与相机的gamma非线性效应综合为系统gamma值。当理想正弦光栅经投影仪与相机的gamma非线性畸变以及物体表面调制后,若被调制的光栅没有发生饱和,经相机采集到的测量数据仍呈现正弦形态,则采集到的图像记为:

$$I'_n = \alpha [M + L \cdot \cos(\varphi + \delta_n)]^\gamma, \quad (3)$$

其中: $I'_n$ 表示由相机采集到的畸变正弦光栅光强, $\varphi$ 为畸变正弦光栅的相位, $\gamma$ 为系统总的gamma非线性参数,M与L为光强表达式中的系数。M是光强均值,有环境光条件下, $M > L$ ;无环境光条件下, $M = L$ 。设计光栅时通常设定 $M = L$ 。若测量图像发生了明显的饱和现象,则图像中包含的相位信息被损坏并且无法恢复,此情况不在本文的研究范围内。

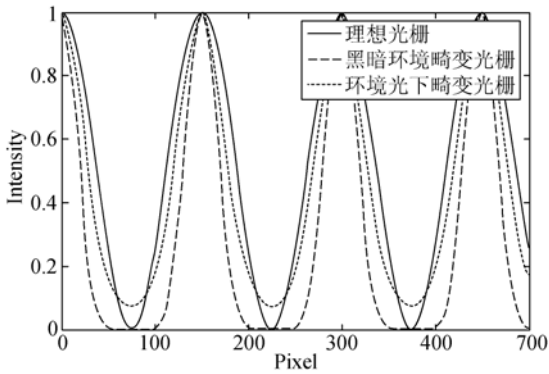
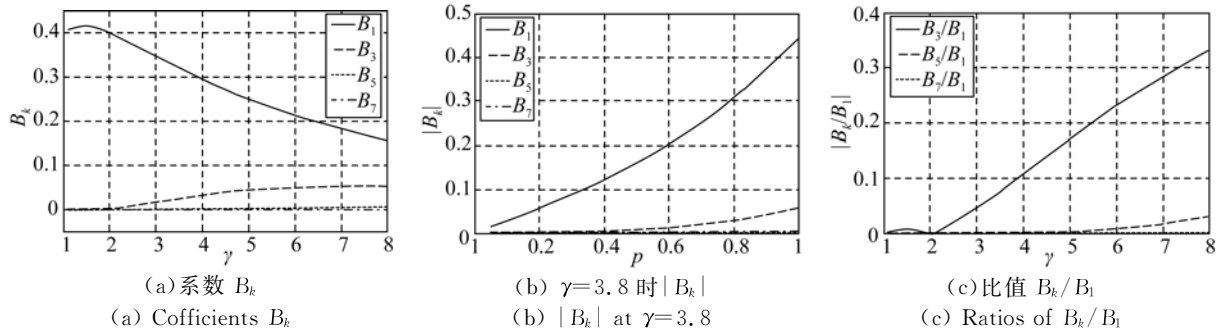


图 1 理想光栅与不同环境光下的畸变光栅

Fig. 1 Ideal and distorted gratings in different ambient lights

在有环境光的条件下将理想光栅投影到一白色平板,采集到的畸变光栅如图 1 所示。直接用式(2)求解相位将产生高次谐波性相位误差<sup>[12]</sup>。与黑暗环境的畸变光栅相比,环境光下的畸变光栅存在两点明显差异:(1)光强范围发生了改变;(2)畸变程度发生了改变。实验表明,不考虑测量环境光的变化将引起相位误差过补偿与欠补偿,因此本文通过引入一个环境光参数  $p = L/M$  来进行建模分析,以解决该问题。显然,在黑暗环境下,  $p=1$ ; 在环境光条件下,  $p < 1$ 。

(a) 系数  $B_k$   
(a) Coefficients  $B_k$ (b)  $\gamma=3.8$  时  $|B_k|$   
(b)  $|B_k|$  at  $\gamma=3.8$ (c) 比值  $B_k/B_1$   
(c) Ratios of  $B_k/B_1$ 图 2  $B_k$  的性质Fig. 2 Properties of  $B_k$ 

$B_k$  的性质如图 2 所示。图 2(a) 中,  $p$  值固定,若  $\gamma$  是一个大于 1 的整数,则当  $k > \gamma$  时,  $B_k = 0$ 。图 2(b) 中,  $\gamma$  值固定为 3.8,  $|B_k|$  值随着  $p$  值的增大而增大,且同一  $p$  值处,  $|B_k|$  随着  $k$  值的增大而减小。图 3(c) 中,固定  $p$  值,对于任意的  $\gamma$  值都有  $B_3/B_1 \gg B_5/B_1 \gg B_7/B_1$ , 即  $q \gg r \gg s$ 。因此将式(8)以泰勒公式展开后,忽略含  $r, s$  项,相位误差简化为:

$$\Delta\varphi = -q \sin 4\varphi + \epsilon(\varphi, q, \gamma). \quad (9)$$

利用广义二项式定理展开式(3)得:

$$I_n^Y = \alpha M^Y \sum_{m=0}^{\infty} \left[ \binom{\gamma}{m} p^m \cos^m(\varphi + \delta_n) \right]. \quad (4)$$

再利用余弦降幂展开式(4)得:

$$I_n^Y = 0.5 B_0 + \sum_{k=1}^{\infty} \{ B_k \cos[k(\varphi + \delta_n)] \}. \quad (5)$$

$$B_k = 2M^Y \sum_{m=0}^{\infty} b_{k,m}. \quad (6)$$

$$b_{k,m} = (0.5p)^{2m+k} \binom{\gamma}{2m+k} \binom{2m+k}{m}. \quad (7)$$

## 2.2 四步相移的相位误差分析

以四步相移为例求解相位误差。将式(1)和式(5)代入解相公式(2),获得了理想相位  $\varphi_i$ , 实际相位  $\varphi$  以及相位误差  $\Delta\varphi = \varphi - \varphi_i$ 。利用三角函数公式展开  $\Delta\varphi$  后,只考虑最高八次谐波分量,而更高次谐波因数过小,可忽略不计。得到相位误差表达式为:

$$\Delta\varphi \approx -\arctan \frac{q \cdot \sin 4\varphi - r \cdot \sin 4\varphi + s \cdot \sin 8\varphi}{1 + q \cos 4\varphi + r \cdot \cos 4\varphi + s \cdot \cos 8\varphi}, \quad (8)$$

其中:  $q, r, s$  分别为  $B_3/B_1, B_5/B_1, B_7/B_1$ 。

式(9)为本文提出的环境光条件下的相位误差模型。 $\Delta\varphi$  分为两个部分,其中  $-q \sin 4\varphi$  贡献了相位误差的绝大部分;而  $\epsilon(\varphi, q, \gamma)$  是一个复杂余项,其主要成分  $-0.5q^2 \sin 8\varphi$  远远小于  $-q \sin 4\varphi$ , 因此可以忽略不计。虽然单参数的相位误差模型不能绝对精确地描述结构光系统的非线性效应,但由于相位误差的高次谐波分量衰减得非常快,对相位误差影响很小,因此本文模型在实际应用中的效果良好。

### 2.3 相位的过补偿、欠补偿分析

相位误差模型中,  $| -q |$  为  $\sin 4\varphi$  的幅度, 即相位误差最大值  $\Delta\varphi_{\max} = |q|$ ; 而当  $\varphi$  为  $\pi/4$  的倍数时, 相位误差  $\Delta\varphi$  为 0。

$q = B_3/B_1$ , 如式(6)、式(7)所示,  $q$  与环境光和系统  $\gamma$  值有关。为了获得  $q$  的解析表达式, 以两种不同方式展开式(7), 分别得:

$$2pmb_{k,m} + 2mb_{k+1,m} = p(\gamma - k)b_{k,m} - 2(k+1)b_{k+1,m}, \quad (10)$$

$$2(m+1)b_{k,m+1} + 2pmb_{k+1,m} = (\gamma - k - 1)b_{k+1,m}. \quad (11)$$

上述两式累加, 并代入式(6)可得:

$$(\gamma + k + 1)\hat{B}_{k+1} = p(\gamma - k)\hat{B}_k + 2\left[\frac{1}{p} - p\right]C_k, \quad (12)$$

其中:  $\hat{B}_k = \sum_{m=0}^{\infty} b_{k,m}$ ,  $C_k = \sum_{m=0}^{\infty} (mb_{k,m})$ 。

整理式(12)可得递推公式:

$$B_{k+1} = \frac{p(\gamma - k)}{\gamma + k + 1}B_k + 4M^\gamma \frac{1 - p^2}{p(\gamma + k + 1)}C_k. \quad (13)$$

推导  $q$  得:

$$q = q_1 + q_2 + q_3, \quad (14)$$

$$\text{其中: } q_1 = \frac{p^2(\gamma - 2)(\gamma - 1)}{(\gamma + 3)(\gamma + 2)},$$

$$q_2 = \frac{2(\gamma - 2)(1 - p^2)}{(\gamma + 3)(\gamma + 2)} \cdot \frac{C_1}{\hat{B}_1},$$

$$q_3 = \frac{2(1 - p^2)}{p(\gamma + 3)} \cdot \frac{C_2}{\hat{B}_1}.$$

如图 3 所示,  $q_1$  贡献  $q$  值的绝大部分, 为简化分析, 忽略  $q_2$  与  $q_3$ 。观察  $q_1$  表达式,  $q_1$  与  $p^2$  成正比例关系。随着环境光强度的减小,  $p$  值增大,  $|q|$  也增大。在其他条件不变时, 有环境光情况下的相位误差均小于黑暗环境下的相位误差。进一步推理可知, 若相位误差补偿预处理时的环境光弱于实际测量时的环境光, 则预处理时的  $p$  值大于实际测量时的  $p$  值, 导致相位误差过补偿; 若相位误差补偿预处理时的环境光强于实际测量时的环境光, 则情况相反, 导致相位误差欠补偿。

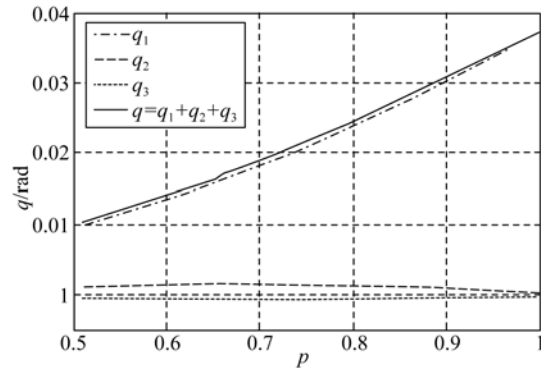


图 3  $q$  值组成

Fig. 3 Components of  $q$

### 2.4 相位误差过、欠补偿的校正方法

如式(14)所示,  $q_1$  不仅与参数  $p$  相关, 还与系统  $\gamma$  值相关, 而  $\gamma$  值是难以标定的系统参数。因此本文采用间接测量、参数拟合的方法来获得  $q_1$ 。根据式(3), 当投影仪投射全白与全黑图像时, 相机采集到的图像可分别表示为:

$$I_w = M^\gamma (1 + p)^\gamma, I_b = M^\gamma (1 - p)^\gamma.$$

设可测量的环境光参数  $t$  为:

$$t = \left[\frac{I_b}{I_w}\right]^\gamma = \left[\frac{1-p}{1+p}\right]^\gamma = \left[\frac{M-L}{M+L}\right]^\gamma. \quad (15)$$

通过式(15)求得  $p$  关于  $t$  的表达式, 代入  $q_1$  表达式得:

$$q = \frac{(\gamma - 2)(\gamma - 1)}{(\gamma + 3)(\gamma + 2)} \cdot \left[\frac{1 - t^{1/\gamma}}{1 + t^{1/\gamma}}\right]^2 = a \cdot \left[\frac{1 - t^b}{1 + t^b}\right]^2. \quad (16)$$

相位误差补偿预处理过程就是求解式(16)数值表达式的过程。其中  $(a, b)$  是表达式中待拟合的参数, 由于推导过程中忽略了高阶项, 实际测得的  $a, b$  并不具有严格的函数关系。通过向标定平面投射全黑与全白图像获得  $t$ , 通过计算相位误差最大值获得相位误差系数  $q$ 。由 Pan<sup>[7]</sup> 和 Hoang<sup>[13]</sup> 的理论可知, 相移光栅图像数目足够大时 ( $N > 10$ ), 相位误差极小可以忽略不计。因此投射四步相移和十六步相移图像并解相, 得到的差值即为相位误差  $\Delta\varphi$ , 遍历寻找  $\Delta\varphi_{\max}$ , 然后可求出  $q$  值。在至少 3 种不同环境光下进行上述步骤, 就可以求解出未知参数  $(a, b)$  的值。

由于在相位误差补偿预处理过程中考虑了环境光对相位误差的影响, 因此采用求解得到的式(16)可以解决相位过补偿与欠补偿问题。

经过校正后, 这里可以补偿不同环境光下的

相位误差。当被测物体置于未知环境光下,通过全黑与全白照片可以解得像素 $(i, j)$ 点处的 $t(i, j)$ 值,继而求出 $q(i, j)$ 值。相位误差则为:

$$\Delta\varphi(i, j) = -q(i, j) \sin 4[\varphi(i, j)]. \quad (17)$$

修正后的相位为:

$$\varphi'(i, j) = \varphi(i, j) - \Delta\varphi(i, j).$$

### 3 实验结果与分析

本文研发的结构光三维测量系统由维视图像 MV-VD120CS 型工业 CCD 相机和 BenQ GP1 型投影仪构成。其主要测量参数为:单次测量面积最大为 400 mm×300 mm,单次测量时间约为 2 s。

摄像机投影仪采用 Matlab 相机标定工具箱进行标定,可获得系统的结构参数。相机的内部参数和畸变参数矩阵分别为:

$$\mathbf{A}^c = \begin{bmatrix} 2\,394.894 & 0 & 722.339 \\ 0 & 2\,394.016 & 395.369 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{k}^c = [0.088\,8 \quad 1.431\,0 \quad -0.005\,6 \quad 0.005\,3].$$

投影仪的内部参数与畸变参数矩阵分别为:

$$\mathbf{A}^p = \begin{bmatrix} 2\,899.954 & 0 & 931.244 \\ 0 & 2\,867.489 & 628.919 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{k}^p = [-0.012\,7 \quad 0.029\,6 \quad -0.007\,6 \quad 0.006\,3].$$

相机坐标系、投影仪坐标系到世界坐标系的转换关系分别为:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} 0.994\,8 & -0.007\,7 & 0.102\,0 & -105.439\,4 \\ 0.001\,5 & -0.995\,9 & -0.090\,3 & -101.216\,6 \\ 0.102\,2 & 0.089\,9 & -0.990\,7 & 797.790\,3 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{M}^p = \begin{bmatrix} 0.998\,4 & -0.000\,9 & -0.056\,1 & -226.297\,4 \\ -0.005\,5 & -0.996\,6 & -0.082\,5 & -108.084\,6 \\ -0.055\,8 & 0.082\,7 & -0.995\,0 & 873.674\,2 \end{bmatrix}.$$

设置由弱到强的 8 种环境光条件,利用上述系统测量  $t$  值和  $q$  值。8 组测量结果用向量 $[t, q]$ 表示,分别为:

1.  $[0.0537, 0.040]$ ; 2.  $[0.0579, 0.037]$ ;
3.  $[0.1086, 0.032]$ ; 4.  $[0.1568, 0.026]$ ;
5.  $[0.2174, 0.021]$ ; 6.  $[0.2688, 0.016]$ ;
7.  $[0.3167, 0.014]$ ; 8.  $[0.3889, 0.010]$ ;

其中:1 组为黑暗环境,2 组到 8 组的环境光强度依次增大。根据理论分析,随着环境光的增强, $p$  值减小,因为  $q_t$  与  $p^2$  成正比例关系,所以  $q$  值会随着环境光的增强而减小。同时, $t$  值随着  $p$  值的减小而增大,即  $t$  值会随着环境光的增强而增强。实验结果与理论分析吻合。

对这 8 组数据按照式(16)进行曲线拟合,得到  $q$  值的解析表达式为:

$$q = 0.046\,4 \cdot \left\{ \frac{1 - t^{1.065\,0}}{1 + t^{1.065\,0}} \right\}^2. \quad (18)$$

不同测量系统的参数 $(a, b)$ 是不同的,但是对于一个镜头和曝光时间固定的测量系统,其参数 $(a, b)$ 则是稳定的。

设置具有区分度但不影响测量的黑暗、弱光、强光 3 种环境光条件,向白色平板投射理想正弦光栅。然后利用 Zhang<sup>[6]</sup>的方法生成黑暗环境下的相位误差 LUT,用于第一组实验;生成弱光环境下的 LUT,用于第二组实验。通过计算 RMS 来分析相位误差的补偿效果,实验结果如图 4 所示。

第一组实验研究 LUT 方法在不同环境光环境下的补偿效果。图 4(a)为黑暗环境下预处理生成 LUT,并对黑暗环境下的测量结果进行了相位补偿。图中未经补偿的相位误差 RMS 为 0.020 9,经过 LUT 补偿的相位误差 RMS 降为 0.001 8。图 4(b)为弱光环境下预处理生成 LUT,并对黑暗环境下的测量结果进行了相位补偿,图中经过弱光 LUT 补偿的相位误差 RMS 激增到 0.005 9。说明当相位误差补偿预处理的环境光与实际测量的环境光一致时,LUT 方法是有效的,否则 LUT 方法的误差较大。

第二组实验研究本文方法对相位误差过补偿、欠补偿的处理效果。图 4(b)为弱光环境下预处理生成 LUT,并对黑暗环境下的测量结果进行相位补偿。图 4(c)为利用式(19)对黑暗环境下的测量结果进行相位补偿,有效解决了相位误差欠补偿的问题。图 4(d)为弱光环境下预处理生成 LUT,并对强光环境下的测量结果进行相位补偿。图 4(e)为利用式(19)对强光环境下的测量结果进行相位补偿,有效解决了相位误差过补偿的问题。

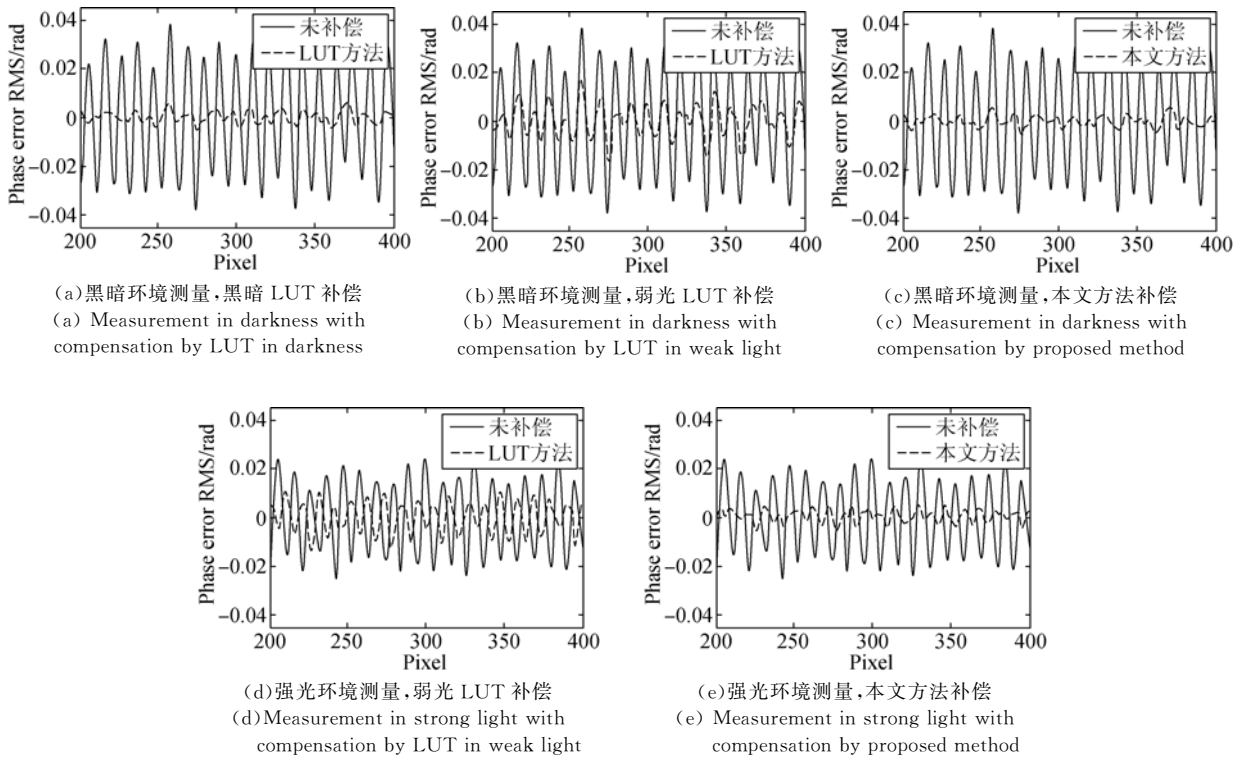


图 4 LUT 方法与本文方法的补偿效果

Fig. 4 Compensation results between LUT method and proposed method

表 1 为图 4(b)~4(e)的相位误差 RMS。比较图 4(b)与图 4(c)可得:黑暗环境下,利用本文方法补偿的相位精度较未进行相位误差补偿的提高了 11 倍,较弱光 LUT 补偿的提高了 2.1 倍。比较图 4(d)与图 4(e)可知:强光环境下,利用本文方法补偿的相位精度较未进行相位误差补偿的提高了 8.6 倍,较弱光 LUT 补偿的提高了 2.5 倍。

表 1 相位误差补偿结果

Tab. 1 Result of phase error compensation (rad)

	黑暗环境	强光环境
未补偿	0.020 9	0.015 3
弱光 LUT	0.005 9	0.005 6
本文方法	0.001 9	0.001 6

最后,使用本文方法测量真实人脸。图 5 左侧为 LUT 相位误差补偿方法的重建结果,右侧为本文相位误差补偿方法的重建结果。比较两组测量结果发现,本文方法重建得到的点云数据光滑均匀,基本消除了由 gamma 畸变引起的相位误差。

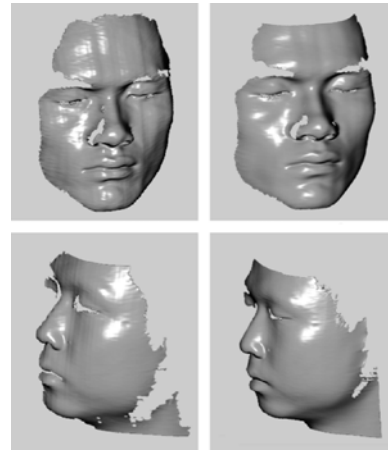


图 5 LUT 和本文方法的人脸重建结果

Fig. 5 Results of faces reconstructed by LUT and proposed method

## 4 结 论

本文分析了相位误差过补偿、欠补偿的产生原因,认为它主要与环境光及系统的 Gamma 非线性特征有关,并在此基础上提出环境光下相位误差的数学模型。通过数学推导获得了相位误差的解析表达式,提出了相位误差过补偿、欠补偿的校正算

法。实验结果表明,无论在黑暗环境还是有光环境下,经本文方法补偿的相位精度达到 $0.002 \text{ rad}$ ,较未进行相位误差补偿得到的结果提高了 8.6 倍,较利用不一致环境光生成的 LUT 进行相位补偿提高

了 2.5 倍。本文方法精度高、速度快,解决了相位误差的过、欠补偿问题,重建得到的点云数据光滑均匀,基本消除了相位误差的过补偿与欠补偿现象。

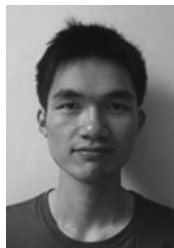
#### 参考文献:

- [1] 陈晓荣,蔡萍,施文康. 光学非接触三维形貌测量技术新进展 [J]. 光学精密工程, 2002, 10(5): 528-532.  
CHEN X R, CAI P, SHI W K. The latest development of optical noncontact 3D profile measurement [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002, 10(5): 528-532. (in Chinese)
- [2] ZHOU P, LIU X, ZHU T. Analysis of the relationship between fringe angle and three-dimensional profilometry system sensitivity [J]. *Applied Optics*, 2014, 53(13): 2929-2935.
- [3] 林焕,马志峰,姚春海,等. 基于格雷码-相移的双目三维测量方法研究 [J]. 电子学报, 2013, 41(1): 24-28.  
LIN H, MA ZH F, YAO CH H, *et al.*. 3D measurement technology based on binocular vision using a combination of gray code and phase-shift structured light [J]. *Acta Electronic Sinica*, 2013, 41(1): 24-28. (in Chinese)
- [4] 许丽,张之江. 结构光测量系统的误差传递分析 [J]. 光学精密工程, 2009, 17(2): 306-313.  
XU L, ZHAN ZH J. Error propagation analysis of structured light system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(2): 306-313. (in Chinese)
- [5] 贾小军,张之江,曹芳,等. 编码结构光系统模型及误差分析 [J]. 光学精密工程, 2011, 19(4): 717-726.  
JIA X J, ZHANG ZH J, CAO F, *et al.*. System model and error analysis for structure light [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(4): 717-726. (in Chinese)
- [6] ZHANG S, YAU S T. Generic nonsinusoidal phase error correction for three-dimensional shape measurement using a digital video projector [J]. *Applied Optics*, 2007, 46(1): 36-43.
- [7] PAN B, KEMAO Q, HUANG L, *et al.*. Phase error analysis and compensation for nonsinusoidal waveforms in phase-shifting digital fringe projection profilometry [J]. *Optics Letters*, 2009, 34(4): 416-418.
- [8] CHEN X, XI J, JIN Y. Phase error compensation method using smoothing spline approximation for a three-dimensional shape measurement system based on gray-code and phase-shift light projection [J]. *Optical Engineering*, 2008, 47(11): 113601-113601-9.
- [9] GUO H, HE H, CHEN M. Gamma correction for digital fringe projection profilometry [J]. *Applied Optics*, 2004, 43(14): 2906-2914.
- [10] LILLEY F, LALOR M J, BURTON D R. Robust fringe analysis system for human body shape measurement [J]. *Optical Engineering*, 2000, 39(1): 187-195.
- [11] ZHOU P, LIU X, HE Y, *et al.*. Phase error analysis and compensation considering ambient light for phase measuring profilometry [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2014, 55: 99-104.
- [12] LIU K, WANG Y, LAU D L, *et al.*. Gamma model and its analysis for phase measuring profilometry [J]. *JOSA A*, 2010, 27(3): 553-562.
- [13] 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.
- [14] LI Z, LI Y. Gamma-distorted fringe image modeling and accurate gamma correction for fast phase measuring profilometry [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(2): 154-156.
- [15] ZHANG X, ZHU L, LI Y, *et al.*. Generic nonsinusoidal fringe model and gamma calibration in phase measuring profilometry [J]. *JOSA A*, 2012, 29(6): 1047-1058.

#### 作者简介:



周平(1980—),男,江苏南京人,副教授,2002年,2007年于中国科学技术大学分别获得学士、博士学位,主要从事信号与图像处理的研究。E-mail: capzhou@163.com



朱统晶(1990—),男,江苏南京人,硕士研究生,2014年于东南大学获得学士学位,主要从事结构光三维测量算法的研究。E-mail: zhutongjing@163.com