

# Gamma 畸变的相位误差模型与 Gamma 标定技术

张 旭<sup>1</sup> 朱利民<sup>2\*</sup>

(<sup>1</sup> 上海大学机电工程与自动化学院, 上海 200072 )  
(<sup>2</sup> 上海交通大学机械与动力工程学院, 上海 200240 )

**摘要** Gamma 畸变是数字相移测量技术的主要误差源。以通用的均匀步长相移技术为对象, 分析了 Gamma 畸变对相位计算的影响, 建立了相位误差与谐波系数的关系模型, 证明了各阶谐波系数在 Gamma 值影响下的递推公式, 进而提出了基于离散傅里叶变换的 Gamma 标定技术。基于此 Gamma 标定值, 通过 Gamma 预矫正降低相位误差。实验结果表明, 标定的 Gamma 值在整个像平面具有较强的稳定性, Gamma 矫正后使相位误差减小了 77.5%, 在曲面测量的结果中, 水波纹明显得到抑制, 曲面质量得以提高。

**关键词** 测量; 相移; Gamma 非线性; Gamma 标定

中图分类号 TN206 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201232.0412006

## Phase Error Model from Gamma distortion and Gamma Calibration

Zhang Xu<sup>1</sup> Zhu Limin<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China )  
(<sup>2</sup> School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China )

**Abstract** The Gamma nonlinearity is one of the most important factors for the phase error in digital phase measuring profilometry. The phase error model resulting from the Gamma distortion is deduced, which reflects the relation between the phase error and the harmonic coefficients. The recurrence formula of the harmonic coefficients is proved, which is influenced by the Gamma value. Based on this recurrence rule, a Gamma calibration method based on discrete Fourier transform is proposed. Discrete Fourier transform is applied to obtain the harmonic coefficients. Then, this Gamma value is computed and adopted to correct the nonlinearity. In the experiment, the mean Gamma value in the whole image is employed into the gamma pre-encoding process. With the proposed technique, the phase error is reduced by 77.5% in the standard variance and the surface quality is enhanced.

**Key words** measurement; phase shifting; Gamma nonlinearity; Gamma calibration

**OCIS codes** 120.5050; 110.6880; 150.6910; 330.1400

## 1 引 言

相位轮廓术(PMP)是一种基于主动立体视觉的光学三维测量方法。它具有非接触、高速度、高精度、大数据量、大工作距离和材料适用范围广等特点,在工业检测、文物数字化和人体测量等领域得到了广泛的应用<sup>[1,2]</sup>。PMP的原理是利用有一定相位差的多幅光栅条纹图像计算图像中每个像素的相位

值,然后根据相位值计算观察点的深度信息<sup>[3,4]</sup>。影响 PMP 测量精度的因素有相移偏差、投影机和摄像机的非线性、光源稳定性、量化误差和系统振动<sup>[5]</sup>。对于数字光投影,误差源主要是投影机和摄像机的非线性,即 Gamma 畸变。目前,针对 Gamma 畸变引起的相位误差方式和减小测量误差方法,中外学者进行了大量的研究。现有的方法主

收稿日期: 2011-10-08; 收到修改稿日期: 2011-11-18

基金项目: 国家自然科学基金(51121063, 51075252)和上海市科学技术委员会(10JC1408000)资助课题。

作者简介: 张 旭(1982—),男,博士,讲师,主要从事结构光三维测量及视觉检测等方面的研究。

E-mail: xuzhang@shu.edu.cn

\* 通信联系人。E-mail: zhulm@sjtu.edu.cn

要可分为三大类:Gamma 矫正、相位误差补偿和离焦法。

Gamma 矫正方法首先对投影机到摄像机的亮度传递函数进行标定,然后在生成模式图像时进行 Gamma 逆变换,实现投影图像输入值的提前矫正,或者对畸变的条纹图像进行 Gamma 矫正。Skocaj 等<sup>[6]</sup>提出了非线性方程调整技术来消除投影机和摄像机系统的非线性。Guo 等<sup>[7]</sup>提出了首先基于正弦函数的累积分布特性估计 Gamma 值,然后利用此 Gamma 值采用迭代算法对相位进行矫正。Thang 等<sup>[8]</sup>假设 Gamma 畸变引起的非线性是有限次的,使用多于最高次数 2 的相移法获得正确相位,并通过优化方程求解系统 Gamma 值,然后根据多个预设投影机 Gamma 值获得系统分立的两个 Gamma 参数,进而估计出理想的投影机 Gamma 预设值。郑东亮等<sup>[9]</sup>使用遗传算法求取 Gamma 值,推广了文献<sup>[8]</sup>的工作。Pan 等<sup>[10]</sup>将相位误差模型简化为正弦函数,然后使用迭代算法矫正相位误差。Liu 等<sup>[11]</sup>对 Gamma 畸变引起的相位误差进行了建模,推导出高次谐波相和 Gamma 值之间的关系,然后通过多步相移获得高次谐波相,进而标定出 Gamma 系数和进行 Gamma 矫正。Li 等<sup>[12]</sup>将投影机的离焦效应包含进相位误差模型中,使得 Gamma 的标定更加准确。郭志明等<sup>[13]</sup>利用二次求导方法确定投影机和摄像机系统的最大线性区域,然后对此区域的响应函数进行标定,并用于矫正投射条纹的生成。许伟等<sup>[14]</sup>采用二次多项式对 Gamma 畸变进行建模,并采用最小二乘法估计参数,最后对畸变相位进行矫正。

相位误差补偿方法是根据相位误差的固有的规律性,提前标定相位误差,然后对计算出的畸变相位进行补偿,得到正确相位。Huang 等<sup>[15]</sup>基于对称三步相移技术相位误差的对称性提出了双三步相移技术,通过两者相加补偿相位误差。Zhang 等<sup>[16]</sup>根据相位误差相似性,建立相位误差的查找表,对畸变相位进行补偿。李中伟等<sup>[17]</sup>对四步相移技术采用查找表法补偿相位误差。Tiendee 等<sup>[18]</sup>进一步扩展了查找表法。相位误差补偿方法使用简单,也无需标定 Gamma 值,但由于没有严格的相位误差模型,其误差相似性缺乏严格的理论证明。

离焦法<sup>[19,20]</sup>是使用图像离焦对高频的抑制作用,减小拍摄图像高次谐波能量,从而减小相位误差的方法。离焦法通过投影机离焦产生低通滤波器,然而离焦量的控制存在可变性,且低通滤波器的高频泄漏不

可避免,使得该方法无法完全消除高频谐波。

尽管众多学者研究了 Gamma 畸变与相位的关系,但是针对通用的相移技术,特别是可调系数的相移条纹,仍有待研究。本文分析了 Gamma 畸变对通用相移技术的影响,建立了相位差与 Gamma 畸变的关系模型,证明了 Gamma 值与各阶谐波系数的递推关系,进而提出了基于离散傅里叶变换的 Gamma 标定技术。

## 2 原理和方法

### 2.1 相移技术原理

相移技术作为数据获取和分析的重要方法,已广泛应用于光学三维测量领域<sup>[5]</sup>。在目前已提出众多相移技术,最为常用的是均匀相位步长算法。投射的第  $n$  幅图像亮度可表示为

$$I_n^p = A^p + B^p \cos\left(2\pi f y^p - \frac{2\pi n}{N}\right), \quad (1)$$

式中  $f$  为余弦周期函数的频率,  $A^p$  和  $B^p$  为预先设定好的常数,  $y^p$  为投影机任意像素的纵坐标值,  $I_n^p$  为此像素对应的投射亮度值。

当不考虑 Gamma 效应时,投影机和摄像机的亮度传递函数为理想线性的情况下,在摄像机图像对应像素上获得的亮度值可表示为

$$I_n^c = A^c + B^c \cos\left(\phi - \frac{2\pi n}{N}\right). \quad (2)$$

式中  $A^c$  为该摄像机图像像素多幅余弦采样图像的平均亮度,  $B^c$  则为此余弦函数的调制幅值,相位值  $\phi$  是  $2\pi$  的模数,即  $\phi = 2\pi f y^p \pmod{2\pi}$ 。根据  $N$  步相移图像可求得相位值

$$\phi = \arctan \frac{\sum_{n=0}^{N-1} I_n^c \sin\left(\frac{2\pi n}{N}\right)}{\sum_{n=0}^{N-1} I_n^c \cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right)}. \quad (3)$$

相位值  $\phi$  称为卷绕相位,在  $0 \sim 2\pi$  之间。通过空间相位展开技术或多频相移技术可实现相位解卷绕,确定绝对相位,进而获得深度信息。

### 2.2 Gamma 畸变引起的相位误差模型

然而,在实际的结构光测量系统中,投影机和摄像机亮度传递函数并非线性的,存在着 Gamma 畸变。这导致投射的光强不是理想的余弦函数[图 1(a)],存在着高次谐波量。由图 1(b)可知,此畸变后的光强存在着明显的二次、三次谐波分量。在此情况下,由(3)式计算出的相位存在着相位误差,进而导致深度信息出现较大偏差。因此,对 Gamma 畸变引起的相位误差进行建模和分析具有重要的理论意义。

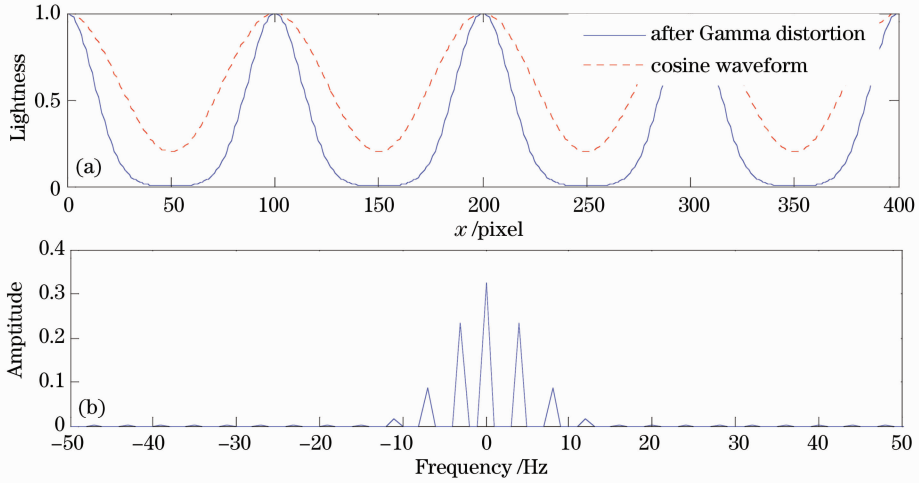


图1 理想的余弦函数与存在 Gamma 的畸变的函数对比。(a)亮度;(b)幅频带特性

Fig.1 Comparison between theoretical cosine function and the function with Gamma distortion. (a) Lightness; (b) amplitude-frequency characteristics

为了便于问题分析,将(1)式改写为

$$I_n^p = \alpha_p \left[ (1 - \beta) + \beta \cos \left( 2\pi f y^p - \frac{2\pi n}{N} \right) \right], \quad (4)$$

式中  $\beta$  为控制调制幅值和平均亮度值的比例参数,其范围在  $0 \sim 0.5$  之间。 $\beta > 0.5$  时,投射亮度出现负值,投影设备无法实现。 $\beta = 0$  时,投射的为常数亮度图像。 $\alpha_p$  为亮度比例控制参数,可映射到投影机区间内的任意余弦亮度场。文献[11]假设投射余弦亮度占据所有亮度范围,即  $\beta = 0.5$ 。实际上,由于摄像机存在低亮度和高亮度弱敏感区,响应效应非常差,因此,余弦条纹仅使用投影机亮度区间的部分区域。同时,大多情况下,余弦条纹的平均亮度不等于调制幅值。因此,文献[11]的模型是(4)式的特例。经 Gamma 畸变后,摄像机获得的图像可表示为

$$I_n^c = \alpha \alpha_p \left[ (1 - \beta) + \beta \cos \left( \phi - \frac{2\pi n}{N} \right) \right]^\gamma + I_0. \quad (5)$$

式中  $\alpha$  为比例系数,对于同一像素, $N$  幅图像为固定值, $\gamma$  为投影机和摄像机系统的联合 Gamma 值, $I_0$  为环境光在该像素的亮度响应。假设在图像获取过程中,环境光稳定不变,则对于  $N$  幅图像在同一像素为固定值。由(5)式不难发现,当  $\gamma = 1$  时,则不存在 Gamma 畸变,投影机和摄像机系统是线性的。一般情况下,结构光测量系统中  $\gamma > 1$ 。对(5)式可

表示为二项式形式,即

$$I_n^c = \alpha \alpha_p (1 - \beta)^\gamma \left[ 1 + \frac{\beta}{(1 - \beta)} \cos \left( \phi - \frac{2\pi n}{N} \right) \right]^\gamma + I_0. \quad (6)$$

二项式级数定理表明对于二项式任意实数幂的函数可展开为幂级数形式,即

$$(1 + x)^t = \sum_{k=0}^{\infty} \binom{t}{k} x^k. \quad (7)$$

式中  $\binom{t}{k} = \frac{t(t-1)(t-2)\cdots(t-k+1)}{k!}$ 。根据(7)

式,对(6)式进行幂级数展开

$$I_n^c = I_0 + \alpha \alpha_p (1 - \beta)^\gamma \sum_{k=0}^{\infty} \binom{\gamma}{k} \left[ \frac{\beta}{(1 - \beta)} \right]^k \times \left[ \cos \left( \phi - \frac{2\pi n}{N} \right) \right]^k. \quad (8)$$

根据余弦函数的积化和差公式,可得余弦函数降次公式,而任意余弦函数的幂可以展开为不同倍数相角余弦函数线性组合:

$$\cos^k(x) = 0.5^k \sum_{m=0}^k \binom{k}{m} \cos[(k-2m)x]. \quad (9)$$

利用降次(9)式并代入(8)式,然后交换求和次序可得

$$I_n^c = I_0 + \alpha \alpha_p (1 - \beta)^\gamma \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{m=0}^k \binom{\gamma}{k} \left[ \frac{\beta}{(1 - \beta)} \right]^k \binom{k}{m} \cos \left[ (k-2m) \left( \phi - \frac{2\pi n}{N} \right) \right]. \quad (10)$$

设  $k-2m=i$ ,进行变量替换,(10)式变换为

$$I_n^c = I_0 + \alpha \alpha_p (1 - \beta)^\gamma \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} \binom{\gamma}{2m+i} \left[ \frac{\beta}{(1 - \beta)} \right]^{2m+i} \binom{2m+i}{m} \cos \left[ i \left( \phi - \frac{2\pi n}{N} \right) \right]. \quad (11)$$

对(11)式进一步化简,可表示为无穷级数谐波函数的线性组合:

$$I_n = I_0 + B_0 + \sum_{i=1}^{\infty} B_i \cos \left[ i \left( \phi - \frac{2\pi n}{N} \right) \right]. \quad (12)$$

式中  $B_i = \alpha \alpha_p (1 - \beta)^\gamma \sum_{m=0}^{\infty} b_{i,m}$ ,  $b_{i,m} = \binom{\gamma}{2m+i} \left[ \frac{\beta}{(2-2\beta)} \right]^{2m+i} \binom{2m+i}{m}$ 。

将(12)式代入(3)式计算相位值。利用三角函数的特性  $\sum_{n=0}^{N-1} \sin \left( \frac{2\pi n}{N} \right) = \sum_{n=0}^{N-1} \cos \left( \frac{2\pi n}{N} \right) = 0$ , 其可转化为

$$\bar{\phi} = \arctan \left\{ \frac{\sum_{i=1}^{\infty} \frac{B_i}{2} \left\{ \sum_{n=0}^{N-1} \sin \left[ i\phi - \frac{2\pi n(i-1)}{N} \right] - \sum_{n=0}^{N-1} \sin \left[ i\phi - \frac{2\pi n(i+1)}{N} \right] \right\}}{\sum_{i=1}^{\infty} \frac{B_i}{2} \left\{ \sum_{n=0}^{N-1} \cos \left[ i\phi - \frac{2\pi n(i-1)}{N} \right] + \sum_{n=0}^{N-1} \cos \left[ i\phi - \frac{2\pi n(i+1)}{N} \right] \right\}} \right\}. \quad (13)$$

因为  $\sum_{n=0}^{N-1} \cos \left( x - \frac{2\pi mn}{N} \right) = \sum_{n=0}^{N-1} \sin \left( x - \frac{2\pi mn}{N} \right) = 0$ , if  $m \pmod{N} \neq 0$ , (13)式可化简为

$$\bar{\phi} = \arctan \left( \frac{S_N}{C_N} \right), \quad (14)$$

式中  $S_N = \frac{N}{2} \left\{ B_1 \sin \phi + \sum_{m=1}^{\infty} \{ B_{mN+1} \sin[(mN+1)\phi] \} - \sum_{m=1}^{\infty} \{ B_{mN-1} \sin[(mN-1)\phi] \} \right\}$ ,

$C_N = \frac{N}{2} \left\{ B_1 \cos \phi + \sum_{m=1}^{\infty} \{ B_{mN+1} \cos[(mN+1)\phi] \} + \sum_{m=1}^{\infty} \{ B_{mN-1} \cos[(mN-1)\phi] \} \right\}$ 。

相位差定义为  $\Delta\phi = \phi - \bar{\phi}$ , 根据三角函数的和角公式, 可得相位差计算公式

$$\Delta\phi = \arctan \left[ \frac{\sum_{m=1}^{\infty} (B_{mN-1} - B_{mN+1}) \sin(mN\phi)}{B_1 + \sum_{m=1}^{\infty} (B_{mN-1} + B_{mN+1}) \cos(mN\phi)} \right]. \quad (15)$$

由(15)式可知, 相位差与高次谐波相关, 高次谐波系数与基频谐波系数比值越大, 相位差越大, 如图2所示。这是因为大 Gamma 值具有更强的非线性特性, 导致高频谐波系数与基频的相对比值更大。值得强调的是谐波系数的比值可能为负值, 如图2(a)的三倍频放大图。然而, 文献[11]误认为幅

值的绝对值等效于谐波系数, 忽略了正负号。这会导致在 Gamma 标定算法中出现错误。当相移步数  $N$  越大, 相位差越小, 如图3所示。当增加相移步数, 相位差要与更高倍频的谐波系数相关。同时, 谐波系数具有指数收敛特性, 减小非常迅速。因此, 相位差会更小。

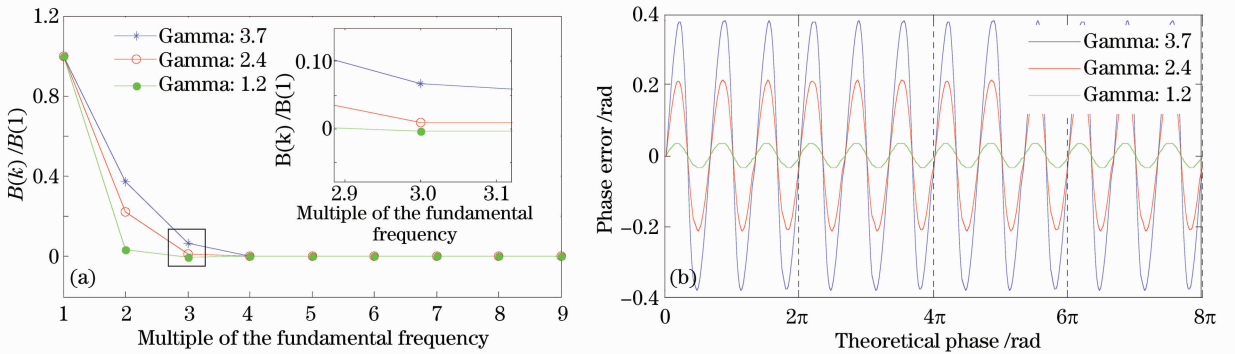


图2 Gamma 效应对相位误差的影响。(a)谐波系数比值;(b)相位误差,  $N=3$

Fig. 2 Influence of the value of Gamma on phase error. (a) Harmonic coefficients divided by the base harmonic coefficient for different Gamma values; (b) phase errors for different Gamma values, when  $N=3$

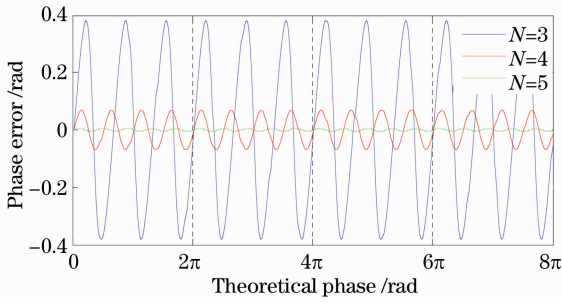


图3 相位误差图, Gamma=3.7

Fig. 3 Phase errors for different phase shifting steps, when the value of Gamma is 3.7

### 2.3 高阶谐波系数的关系

根据  $b_{i,m}$  定义, 可得到递推公式

$$\frac{b_{i+1,m}}{b_{i,m}} = \frac{\beta(\gamma - 2m - i)}{(2 - 2\beta)(m + i + 1)}. \quad (16)$$

(6)式可表示为

$$(\gamma + i + 2)b_{i+2,m} = (\gamma - i)b_{i,m} + \frac{(2\beta - 2)}{\beta}(i + 1)b_{i+1,m}. \quad (17)$$

对左右两边按照  $m$  从 0 到无穷大做和, 且乘以固定系数  $\alpha\alpha_p(1 - \beta)^\gamma$  可得

$$(\gamma + i + 2)B_{i+2} = (\gamma - i)B_i + \frac{2\beta - 2}{\beta}(i + 1)B_{i+1}. \quad (18)$$

这个公式指明了连续相邻的三个谐波系数与 Gamma 值之间的关系。根据此公式可实现 Gamma 的标定。

### 2.4 Gamma 标定技术

由(12)式可知, 摄像机感知的亮度信号  $I_n^c$  为  $N$  点采样的周期信号。对  $I_n^c$  进行离散傅里叶变换, 可得其频率特性, 即

$$\hat{I}_k = \sum_{n=0}^{N-1} \exp\left(-i \frac{2\pi}{N}nk\right) I_n^c. \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (19)$$

根据采样定理, 可恢复出  $N/2$  频率的信号, 即计算出  $I_n^c$  中小于  $N/2$  的谐波系数。(12)式给出了信号  $I_n^c$  的傅里叶展开, 其只含有余弦项, 且余弦项含有相位信息。因此, 谐波系数的绝对值等于离散傅里叶变换的幅值绝对值乘以固定的比例系数, 即

$$|B_k| = \frac{2}{N} |\hat{I}_k|, \quad (20)$$

(20)式与文献[11]的(34)式是一致的。文献[11]从相位求解的角度, 当相移步数足够大时, 根据谐波系数的快速收敛性得出上述结论的。本文从信息论的采样定理得出(20)式, 并且定量指明了谐波系数求

解需要的相移步数, 这补充了文献[11]的不足。另外, 文献[11]误认为  $B_k$  等效于离散傅里叶变换的幅值绝对值乘以固定的比例系数, 丢失了谐波系数的绝对值符号, 而实际上  $B_k$  可能会负值, 如图 2(a) 中的三倍频放大图。因此, 在确定谐波系数绝对值后, 还应确定谐波系数的符号。符号可根据相角变化确定:

$$\text{sign}(\hat{I}_k) = \begin{cases} 1, & |\arg \hat{I}_k - k \arg \hat{I}_1| \leq \frac{\pi}{2} \\ -1, & |\arg \hat{I}_k - k \arg \hat{I}_1| > \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (21)$$

式中  $\arg \hat{I}_k$  表示第  $k$  个谐波对应的相位角, 其属于  $(-\pi, \pi]$ 。因此, 可求得谐波系数  $B_k = \text{sign}(\hat{I}_k) \frac{2}{N} \times |\hat{I}_k|$ 。

当已知  $B_k$  时, 根据(18)式可计算出 gamma 值:

$$\gamma = \frac{(k+2)B_{k+2} + kB_k - \frac{2\beta-2}{\beta}(k+1)B_{k+1}}{B_k - B_{k+2}}. \quad (22)$$

当 Gamma 计算出后, 应用到(5)式, 进行 Gamma 预矫正, 消除非线性, 达到减小相位误差的目的。

## 3 实验和分析

本文构建了一套由投影机和摄像机组成的结构光测量系统<sup>[21]</sup>。如图 4(a)所示, 摄像机采用 OPAL-1000c, 具有 1024 pixel × 1024 pixel 分辨率, 投影机采用联想 T165, 分辨率为 1024 pixel × 768 pixel。所有实验在该系统上进行。

首先生成投射光栅条纹, 其中  $f = (1/60)$  Hz,  $A^p = 150, B^p = 70, N = 60$ 。然后, 依次将投影机投射到标准白板上, 摄像机从另外一个角度进行拍摄。为了抑制系统噪声的影响, 对此  $N$  幅光栅条纹反复投射 7 次, 并且对于相同相位移  $n$  的拍摄图像进行亮度平均, 作为此相位移  $n$  的对应图像。在  $N$  幅对应平均图像中, 任意像素在时间序列上具有周期性。该亮度曲线受到 Gamma 非线性的影响, 与标准余弦信号存在较大偏差, 如图 5 所示。采用(19)式对其进行离散傅里叶变换, 然后利用(20)式和(21)式获得谐波系数, 最后根据(22)式求得该像素位置的 Gamma 值。如图 5 所示, 像素(500, 500)位置  $\gamma = 3.2060$ 。对所有像素使用上述方法, 可得整个像面区域的 Gamma 值分布。由图 5(b)可知, 整个像面

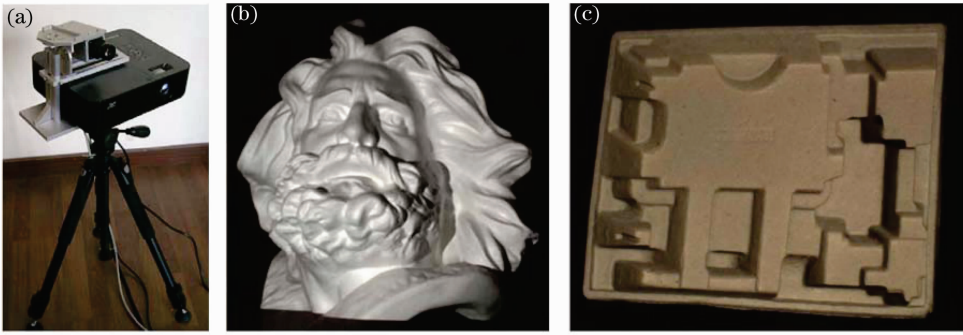


图 4 结构光测量系统和测量对象。(a)结构光测量系统;(b)马赛;(c)盒子

Fig. 4 Experimental setup of the structural light and test objects. (a) Portable measurement system of structural light used in experiment; (b) Marseilles; (c) box

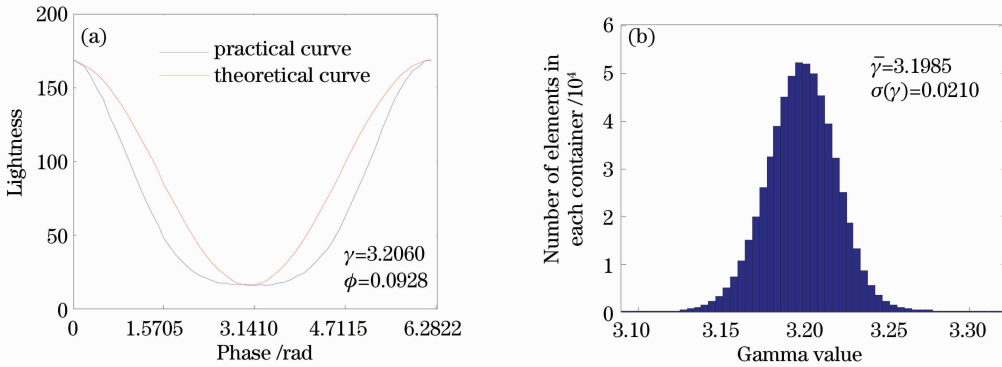


图 5 Gamma 标定结果。(a)像素位置(500,500)拍摄亮度曲线及 Gamma 标定值;(b)全幅面 Gamma 标定值分布  
Fig. 5 Results of the Gamma calibration. (a) Lightness curve at the pixel position (500,500) and the corresponding Gamma value; (b) distribution of the calibrated Gamma values in the whole camera image

Gamma 值不完全相同,符合正态分布,均值为 3.1985,标准差为 0.0210。

对上述  $N=60$  幅图像,根据(3)式计算所有像素的相位值。根据(15)式,当  $N$  非常大时,谐波系数极小,相位差几乎为 0。此时,使用此 60 步相移技术计算出的相位值作为基准,选择第 1,21,41 幅

图像,利用三步相移法(3)式计算相位值。两者差值如图 6 黑线所示(彩图请见网络电子版)。标准白板位置固定不变,使用 Gamma 平均值  $\gamma=3.1985$  对投影机投出光栅条纹进行预矫正,然后利用三步相移法计算相位值。这一相位值与基准相位的差如图 6 红线所示。由图 6 可知,Gamma 预矫正技术大

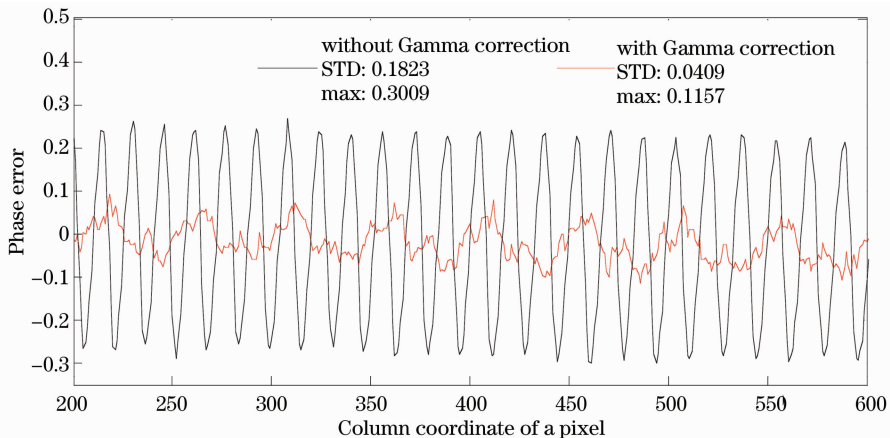


图 6 校正前、后相位误差比较

Fig. 6 Comparison of the phase error with and without Gamma corrections

大减小了相位差。在标准差方面,使相位差减小了 77.56%,在最大误差方面减少到原来的 38.4%。由此可见,相位校正算法是有效的。图中 STD 表示标准差,max 表示相位差绝对值的最大值。

采用 Gamma 预矫正技术测量两个物体,物体如图 4(b)和图 4(c)所示。求出卷绕相位后,使用多

频解卷绕技术( $f_1 = 1/1024, f_2 = 1/256, f_3 = 1/64, f_4 = 1/16$ )求出绝对相位,进而获得形面信息。测量结果如图 7(b)和图 8(b)所示。它们分别与未经矫正的测量结果[图 7(a)和图 8(a)]相比,水波纹得到明显抑制,曲面质量大大提高。

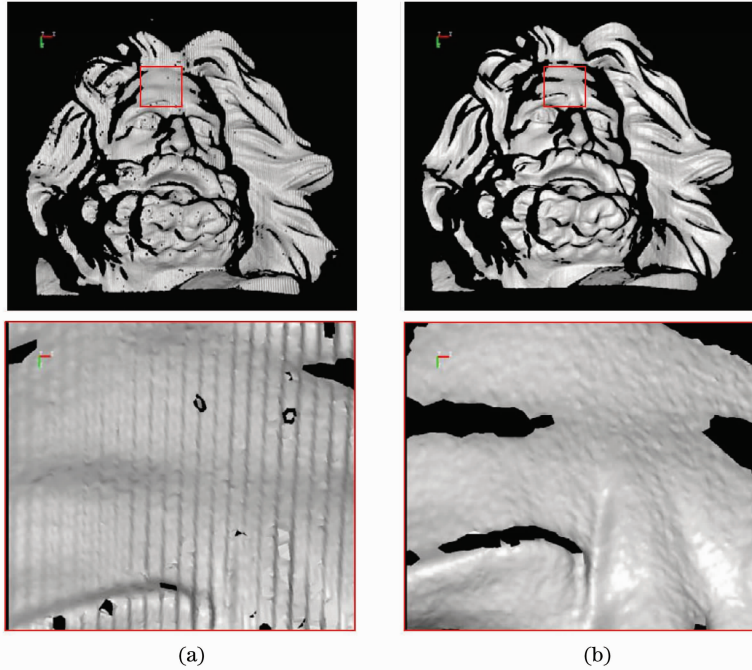


图 7 马赛曲面测量结果。(a)未进行 Gamma 矫正;(b) Gamma 预矫正后

Fig. 7 Surface results of the Marseilles curved surface. (a) Without Gamma correction; (b) with Gamma correction

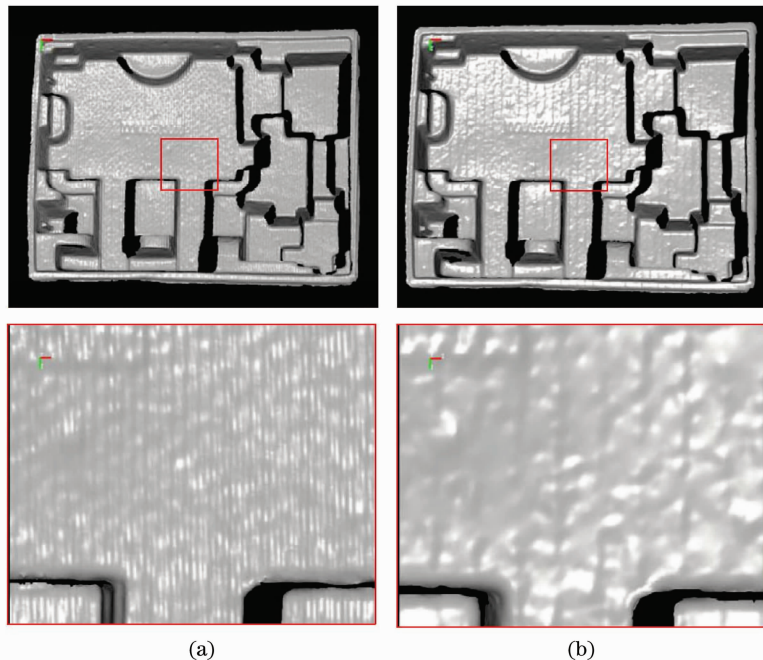


图 8 盒子曲面测量结果。(a)未进行 Gamma 矫正;(b) Gamma 预矫正后

Fig. 8 Surface results of the curved surface of box. (a) Without Gamma correction; (b) with Gamma correction

## 4 结 论

Gamma 畸变是影响 PMP 技术测量精度的主要原因。首先对 Gamma 畸变与相位值的关系进行分析,推导出畸变的相位模型和相位误差模型,证明了谐波系数递推关系。通过分析发现,畸变相位和相位误差都与高频谐波系数有关,高频谐波系数的相对比值决定了相位误差的大小。然后,根据谐波系数与 Gamma 之间的关系模型,提出了 Gamma 标定算法。该算法通过离散傅里叶变换对摄像机周期性的采样信号进行处理,获得谐波系数,然后根据递推公式计算出 Gamma 值,并进行 Gamma 预矫正,减小相位误差。

实验中以自行设计的结构光系统为平台,首先进行了 Gamma 标定的实验,发现 Gamma 值对不同像素略有变化,但是整个像面 Gamma 值变动的标准差只有 0.021。然后,使用矫正后相移技术与未经矫正的相移技术进行比较,相位差减小为原来的 22.44%,证明了本文方法的有效性。最后对两个物体进行三维面形测量,曲面上的水波纹大大减少,提高了曲面质量。

## 参 考 文 献

- 1 F. Chen, G. Brown, M. Song. Overview of three-dimensional shape measurement using optical methods [J]. *Opt. Engng.*, 2000, **39**(1): 10~22
- 2 Gorthi Sai Siva, Rastogi Pramod. Fringe projection techniques: whither we are? [J]. *Opt. & Lasers in Engng.*, 2010, **48**(2): 133~140
- 3 V. Srinivasan, H. C. Liu, M. Halioua. Automated phase-measuring profilometry of 3-D diffuse objects[J]. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(18): 3105~3108
- 4 S. Zhang. Recent progresses on real-time 3D shape measurement using digital fringe projection techniques [J]. *Opt. & Lasers in Engng.*, 2010, **48**(2): 149~58
- 5 D. Malacara. *Optical Shop Testing* [M]. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2007. 599~610
- 6 D. Skocaj, A. Leonardis. Range image acquisition of objects with non-uniform albedo using structured light range sensor [C]. Barcolona: Pattern Recognition, Proceedings. 15th International Conference on, 2000. 778~781
- 7 H. W. Guo, H. T. He, M. Y. Chen. Gamma correction for digital fringe projection profilometry [J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(14): 2906~2914

- 8 H. A. Thang, P. Bing, N. Dung *et al.*. Generic gamma correction for accuracy enhancement in fringe-projection profilometry [J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(12): 1992~1994
- 9 Zheng Dongliang, Da Feipeng. Gamma correction method for accuracy enhancement in grating projection profilometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(5): 0512003  
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): 0512003
- 10 B. Pan, K. M. Qian, L. Huang *et al.*. Phase error analysis and compensation for nonsinusoidal waveforms in phase-shifting digital fringe projection profilometry [J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(4): 416~418
- 11 K. Liu, Y. C. Wang, D. L. Lau *et al.*. Gamma model and its analysis for phase measuring profilometry [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2010, **27**(3): 553~562
- 12 Z. W. Li, Y. F. Li. Gamma-distorted fringe image modeling and accurate gamma correction for fast phase measuring profilometry [J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(2): 154~156
- 13 Guo Zhiming, Zhang Qican, Ma Ke. Analysis and correction of the nonlinearity of the structured light illumination in three-dimensional shape measurement [J]. *Laser Journal*, 2011, **32**(1): 14~16  
郭志明, 张启灿, 麻珂. 三维面形测量中结构光场的非线性分析和校正[J]. *激光杂志*, 2011, **32**(1): 14~16
- 14 Xu Wei, Chen Xiaobo, Xi Juntong. A method of phase error compensation for structural light measurement[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(3): 0312008  
许伟, 陈晓波, 刁俊通. 结构光测量相位波动误差补偿方法研究[J]. *光学学报*, 2011, **31**(3): 0312008
- 15 P. S. Huang, Q. Hu, F.-P. Chiang. Double three-step phase-shifting algorithm [J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(22): 4503~4509
- 16 S. Zhang, S. T. Yau. Generic nonsinusoidal phase error correction for three-dimensional shape measurement using a digital video projector[J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(1): 36~43
- 17 Li Zhongwei, Wang Congjun, Shi Yusheng *et al.*. High precision phase error compensation algorithm for structural light measurement[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(8): 1527~1532  
李中伟, 王从军, 史玉升等. 结构光测量中的高精度相位误差补偿算法[J]. *光学学报*, 2008, **28**(8): 1527~1532
- 18 S. Tiendee, C. Lersudwichai, C. Sinthanayothin *et al.*. Algorithm for decreasing nonlinear gamma effect with digital fringe projection images [C]. Bangkok: 8th International Conference on ICT and Knowledge Engineering, 2010. 1~4
- 19 X. Y. Su, W. S. Zhou, G. V. Bally *et al.*. Automated phase-measuring profilometry using defocused projection of a Ronchi grating[J]. *Opt. Commun.*, 1992, **94**(6): 561~573
- 20 Ying Xu, Laura Ekstrand, Junfei Dai *et al.*. Phase error compensation for three-dimensional shape measurement with projector defocusing [J]. *Appl. Opt.*, 2011, **50**(17): 2572~2581
- 21 X. Zhang, L. M. Zhu, Y. F. Li. Indirect decoding edges for one-shot shape acquisition [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2011, **28**(4): 651~661

栏目编辑: 何卓铭