

条纹投影三维测量的Gamma畸变校正方法

崔艳军¹ 张文峰¹ 李建欣^{2*} 朱日宏² 王冉¹ 张春晖¹

¹中国电子科技集团公司第28研究所, 江苏 南京 210007

²南京理工大学电光学院, 江苏 南京 210094

摘要 Gamma畸变是影响条纹投影三维测量精度的重要因素,为提高条纹投影系统的测量精度,通过分析Gamma值与谐波系数的定量关系研究了一种准确、简便的Gamma系数预标定技术。在仿真实验中,通过该方法将Gamma校正前后的相位平面与标准相位平面之间的误差降低了一个数量级,提高了测量精度。搭建了条纹投影实验系统,对人嘴雕像进行三维重建,并对Gamma畸变校正前后的测量结果进行了对比分析,验证了该方法的有效性。

关键词 测量;条纹投影;三维重建;Gamma校正

中图分类号 TB96; TB811 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0112002

A Method of Gamma Correction in Fringe Projection Measurement

Cui Yanjun¹ Zhang Wenfeng¹ Li Jianxin² Zhu Rihong² Wang Ran¹ Zhang Chunhui¹

¹28th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Nanjing, Jiangsu 210007, China

²School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology,
Nanjing, Jiangsu 210094, China

Abstract The Gamma distortion is an important influencing factor of accuracy in fringe projection measurement. To improve the accuracy of measurement, an accurate and simple Gamma correction method is studied by analyzing the relationship between Gamma coefficient and harmonic coefficient. The accuracy and reliability of this method is verified through the simulation results. Finally, experimental work is done with this method. Compared with the retrieval phase without Gamma correction, the conclusion can be made that this method can effectively restrain the Gamma distortion of the system and improve the measurement precision.

Key words measurement; fringe projection; three-dimensional reconstruction; Gamma correction

OCIS codes 120.2650; 150.6910; 110.6880

1 引言

在基于相位恢复的相移条纹投影法三维轮廓测量中,高质量的正弦条纹是获得高精度三维形貌复原结果的前提和保证。然而普通商用电子设备存在的Gamma效应严重地影响了投影条纹的质量,使其发生非正弦畸变,引起相位计算误差^[1]。对此,国内外学者进行了广泛而深入的研究。

1992年,四川大学Su等^[2]指出,测量时适当地使投影设备离焦,能够有效地减小Gamma效应引起的相位恢复误差;2004年,上海大学Guo等^[3]基于累积分布函数的概念,在对条纹图像进行相位解调的同时迭代估计了系统的Gamma系数,该方法无需预先知道设备的属性,是一种自适应的Gamma效应抑制方法,但其假定条纹图的全场Gamma畸变系数为同一常数;2007年,Zhang等^[4]采用多项式拟合技术分析得到了输入输出信号之间的对应关系,进而对所获取的条纹图像进行线性补偿,从而减小了Gamma效应对测量精度的影响,但该优化估计策略计算复杂度高,且需要使用较多的(如20幅)相移条纹图;同年Xu等^[5]提出了一种基于查

收稿日期: 2014-06-17; 收到修改稿日期: 2014-09-16

基金项目: 国家自然科学基金(61475072)、教育部博士点基金(20123219110042)

作者简介: 崔艳军(1987—),女,硕士研究生,主要从事光学测量、视频监控方面的研究。E-mail: cuiyanjunfly@163.com

导师简介: 朱日宏(1964—),男,博士,教授,主要从事光学精密测量方面的研究。

E-mail: zhurihong@mail.njust.edu.cn

*通信联系人。E-mail: ljx@vip.163.com

找表法(LUT)的误差补偿方法。2009年,通过系统地分析相位误差分布及其系数,Pan等^[6]也提出了一种类似的技术。但是Zhang和Pan的方法都必须预先标定误差分布,来构建出LUT或估计误差系数。2010年,Hoang等^[7]在相移算法基础上推导出了一个Gamma畸变模型,同时提出了一种非线性优化的Gamma系数估计方法。但该优化估计策略计算较为复杂,且需要使用较多的相移条纹图。在分析系统Gamma系数与所拍摄条纹傅里叶级数系数之间定量关系的基础上,2010年,Liu等^[8]提出了另一种Gamma畸变模型;2011年,Li等^[9]给出了一个更为精确的模型,他们在计算时引入了投影器离焦因子。然而,为了较为精确地估计出傅里叶级数的系数,Li和Liu的方法在投影时每步均需至少16幅相移条纹图,验证了三步相移法条纹投影轮廓术的准确性,在一定程度上减小了Gamma畸变引起的相位误差,整个Gamma预标定过程较为耗时。本文所述Gamma畸变校正方法在十六步相移条纹投影轮廓术的基础上,通过分析Gamma值与谐波系数的定量关系,准确、简便地标定出Gamma系数,并对该方法在较高步数相移算法的准确性进行了仿真实验论证,最后通过实际实验系统误差分析验证了该方法的有效性。

2 原理分析

2.1 相移条纹投影技术

相移条纹投影三维轮廓测量过程如图1所示,测量时投影仪将正弦条纹投影到被测物体上,同时CCD相机拍摄经被测物体表面调制而变形的条纹图像;然后利用相位解调方法,从拍摄到的变形条纹图中解调出绝对相位值;最后根据预先标定的系统参数和相位-高度映射关系从绝对相位值中恢复出物体表面的三维高度点云数据。

图2为典型的条纹投影测量系统结构示意图,采用的是相交型三角光路^[10]。

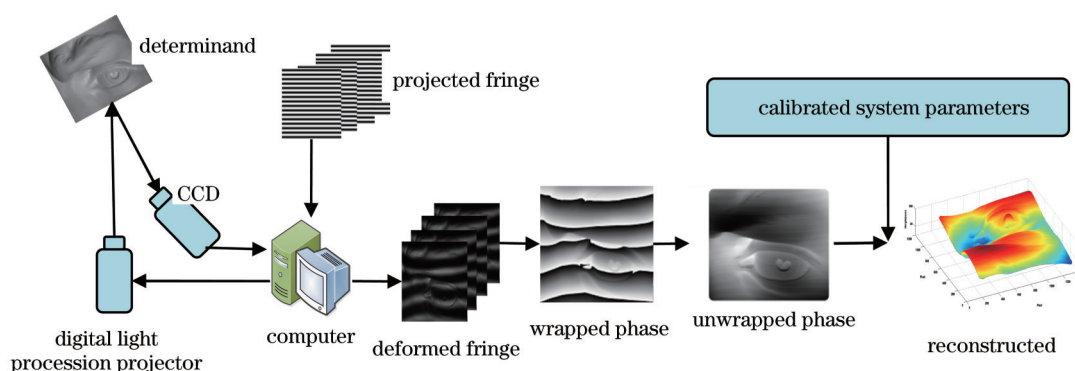


图1 相移条纹投影三维轮廓术测量原理

Fig.1 Principle of phase shift fringe projection measurement

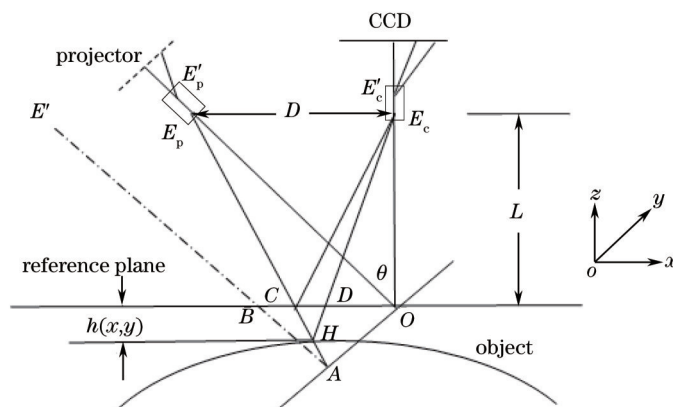


图2 条纹投影测量系统几何结构图

Fig.2 Geometric texture of fringe projection measurement system

图中 E'_pE_p 和 E'_cE_c 分别是投影仪和 CCD 相机的光轴,两光轴的连线与参考平面相交于 O 点,参考平面

垂直于 $E'_c E_c$ 。测量时,投影正弦条纹图像到参考面上,在 CCD 相机端获取的参考条纹分布为

$$g_{\text{ref}}(x,y) = a_{\text{ref}}(x,y) + b_{\text{ref}}(x,y) \cdot \cos[2\pi f_0 x + \varphi_{\text{ref}}(x,y)], \quad (1)$$

式中 $a_{\text{ref}}(x,y)$ 表示参考面上的背景光分量, $b_{\text{ref}}(x,y)$ 为参考面上条纹的振幅调制度, f_0 为条纹图像的空间基频, $\varphi_{\text{ref}}(x,y)$ 为参考面上相位分布。在相同结构参数的情况下,将该条纹投影到被测物体表面,由于物体表面具有高低起伏的变化,使得正弦条纹被调制变形,CCD 相机得到的变形条纹分布为^[9]

$$g(x,y) = a(x,y) + b(x,y) \cdot \cos[2\pi f_0 x + \varphi(x,y)], \quad (2)$$

式中 $a(x,y)$ 和 $b(x,y)$ 分别表示背景光分量和条纹的振幅调制度, $\varphi(x,y)$ 是被调制后变形条纹的相位分布。相对于参考面,由于物体表面高度变化而引起的相位调制为

$$\Delta\varphi(x,y) = \varphi(x,y) - \varphi_{\text{ref}}(x,y) = 2\pi f_0 \overline{CD}. \quad (3)$$

在投影系统出瞳中心和 CCD 相机入瞳中心的连线与参考平面平行,以及 CCD 相机光轴与参考面垂直的情况下,根据几何关系,设 L 为 CCD 相机入瞳中心 E_c 到参考面的距离, D 是投影系统出瞳中心 E_p 到 CCD 相机入瞳中心 E_c 的距离。在系统参数 D 和 L 的值已知的情况下,由三角形相似的原理可得

$$\frac{h(x,y)}{L-h(x,y)} = \frac{\overline{CD}}{D}. \quad (4)$$

由(3)、(4)式可知被测物体的高度 $h(x,y)$ 与相位差 $\Delta\varphi(x,y)$ 之间的对应关系可表述为

$$h(x,y) = \frac{L\Delta\varphi(x,y)}{2\pi D f_0 + \Delta\varphi(x,y)}. \quad (5)$$

因此,只需测量得到被测物体与参考面的位相差 $\Delta\varphi(x,y)$, 结合相位-高度标定结果,即可精确重构被测物体的三维面形分布。

2.2 Gamma 畸变校正技术

数字光条纹投射技术的诞生使得条纹投影系统自适应性更强,操作起来更加方便、灵活,然而,在实际的数字光条纹投影系统中,投影仪和 CCD 相机的亮度传递函数并不是线性的,它们的灰度非线性——即 Gamma 畸变会直接导致变形条纹中出现高次谐波,影响位相的求解精度,给系统测量带来误差。针对上述问题,目前已有的 Gamma 畸变校正技术通常需要大量的特定图像来完成 Gamma 预标定,过程繁琐、费时,而且较难定量地分析 Gamma 畸变值,因此,快速、准确地校正系统的 Gamma 畸变对条纹投影系统实现高精度测量具有重要意义。

条纹投影系统中的 Gamma 效应会导致投影的正弦条纹发生畸变,如图 3 所示,虚线为理想的正弦条纹,实线为具有 Gamma 畸变的条纹灰度。

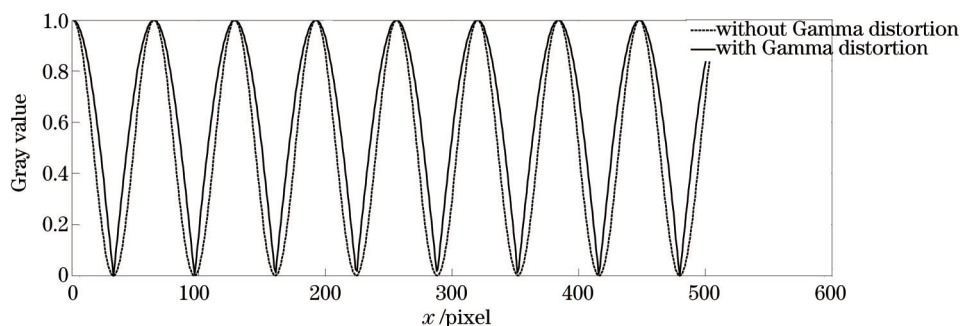


图 3 Gamma 畸变引起的相位误差示意图

Fig.3 Sketch map of phase error caused by Gamma distortion

由于系统的 Gamma 效应,实际拍摄到的第 n 幅相移条纹图可表示为

$$I'_n(x,y) = \left\{ A(x,y) + B(x,y) \cdot \cos[2\pi f x + \varphi(x,y) + \theta_n(x,y)] \right\}^{\gamma} = A(x,y) + \sum_{k=-\infty}^{+\infty} B_k(x,y) \cos\left\{ k \cdot [2\pi f x + \varphi(x,y) + \theta_n(x,y)] \right\}, \quad (6)$$

式中 (x,y) 为图像中的坐标点, $A(x,y)$ 为背景光强,是一个常数系数, $B(x,y)$ 为条纹的振幅调制度, f 为条纹

图的空间频率, $\varphi(x,y)$ 为待解调的相位, $\theta_n(x,y)$ 为相移值, γ 为系统的 Gamma 系数, B_k 为条纹信号第 k 阶谐波分量的系数, $n=0,1,\dots,N-1$ 为相移序列号, N 为总的相移步数。可见, 系统的 Gamma 效应使得原始条纹图的正弦性被破坏, 出现了其他高阶谐波分量。然而, (6) 式中各阶谐波分量的系数本质上是系统 Gamma 系数 γ 的函数^[11]; 因此, 可利用算法分析求解估计出 γ , 从而完成测量系统的 Gamma 预标定校正。

若 $B_k \neq 0$, 则条纹信号第 $k+1$ 阶谐波分量和第 k 阶的比例为

$$\frac{B_{k+1}}{B_k} = \frac{\gamma - k}{\gamma + k + 1}. \quad (7)$$

(7) 式是在只考虑了系统 Gamma 畸变的模型下推算出来的, 在实际测量中, 还要考虑投影仪的离焦问题^[11-13]。投影仪的离焦程度用点扩展函数 (PSF) 来表征, PSF 由投影物镜系统决定, 其表达式为

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

式中 σ 是离焦系数, 那么 CCD 相机实际接收到的光强信号应为

$$I_n^c(x,y) = \alpha \cdot I_n'(x,y) \otimes G(x,y), \quad (9)$$

式中 \otimes 表示光强和 PSF 的卷积过程, $\alpha \in [0,1]$ 为被测物表面的反射系数, 为了便于问题分析, 将把表征坐标的 (x,y) 省略。由于点扩展函数的特性, (9) 式的卷积过程可以看成是一个低通滤波器, 它可以抑制高阶谐波减少相位误差。由卷积定理可知, (9) 式在频域对应的形式为

$$\mathcal{F}[I_n^c] = \mathcal{F}[\alpha \cdot I_n'] \cdot \mathcal{F}[G], \quad (10)$$

式中 $\mathcal{F}[\cdot]$ 为正向连续傅里叶变换, $\mathcal{F}[G]$ 为投影仪的光学传递函数 (OTF)。实际测量中, 投影的条纹通常都是沿 x 或 y 轴成正弦分布, 为了便于讨论, 这里仅考虑沿 x 轴的一维信号, 则光学传递函数的表达式为

$$T(f_x) = \int_{-\infty}^{\infty} G(x) \exp(i2\pi f_x x) dx = \exp(-2\pi^2 \sigma^2 f_x^2), \quad (11)$$

式中 f_x 为沿 x 轴的空间频率。根据 (6)、(10) 和 (11) 式可得, CCD 采集到的条纹信号为

$$I_n^c = \alpha I_n' T(f_x) = \tilde{A} + \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \tilde{B}_k \cos[k \cdot (2\pi f_x + \varphi + \theta_n)], \quad (12)$$

式中 $\tilde{A} = \alpha A$, $\tilde{B}_k = \alpha T(kf_0) B_k$ 为条纹信号第 k 阶谐波分量的系数。由于投影系统和 CCD 采集系统所投影和记录的都是被数字化和离散化的条纹信息, 连续傅里叶变换实际上是通过离散傅里叶变换来实现, 那么 (10) 式左边项为

$$\text{DFT}[I_n^c](f_x') = \sum_{l=0}^{L_N-1} I_n^c \cdot \exp(-j2\pi f_x' \cdot l \cdot \Delta x), \quad (13)$$

式中 $\text{DFT}(\cdot)$ 表示离散傅里叶变换, $f_x' = p / (L_N \cdot \Delta x)$ 为条纹沿 x 轴的离散空间频率, $j = \sqrt{-1}$, $l = 0, 1, \dots, L_N - 1$, L_N 表示沿 x 轴的总采样点数, Δx 为采样间隔。根据欧拉公式, (13) 式可改写为

$$\text{DFT}[I_n^c](f_x') = \sum_{l=0}^{L_N-1} I_n^c \cdot \cos(2\pi f_x' l \Delta x) - j \cdot \sum_{l=0}^{L_N-1} I_n^c \cdot \sin(2\pi f_x' l \Delta x). \quad (14)$$

根据 (13) 式和 (14) 式, 由离散傅里叶变换的性质, 可得 \tilde{B}_k 的计算公式为

$$\tilde{B}_k = \frac{1}{N} \left\{ \left[\sum_{n=1}^N I_n^c \sin\left(k \frac{2\pi n}{N}\right) \right]^2 + \left[\sum_{n=1}^N I_n^c \cos\left(k \frac{2\pi n}{N}\right) \right]^2 \right\}^{1/2}, \quad (15)$$

式中 $k=1, 2, \dots$, 为条纹信号第 k 阶谐波分量的系数, N 为所投影条纹图像的幅数。高次谐波分量对相位造成的影响由 N 决定, 投影的条纹图像越多, 高次谐波分量的影响越小。因此为了获得更为精确的形貌测量结果, 较为简单的策略便是将估计出的 γ 编码到投影用的正弦条纹中。若任意的一个非零 Gamma 值 γ' 被预编码至投影条纹图中, 若只考虑到二阶谐波分量, 那么此时傅里叶级数系数的比例 $\tilde{B}_2' / \tilde{B}_1'$ 为

$$\frac{\tilde{B}_2'}{\tilde{B}_1'} = \frac{T(2f_0) B_2'}{T(f_0) B_1'} = \exp(-6\pi^2 \sigma^2 f_0^2) \frac{\gamma/\gamma' - 1}{\gamma/\gamma' + 2}. \quad (16)$$

该比例可通过(13)~(15)式计算得到。故基于(15)和(16)式,利用两个预编码的 Gamma 值 γ_1' 和 γ_2' ,即可估计出系统的 Gamma 系数 γ 。图 4 即为所提 Gamma 预标定校正算法流程图。

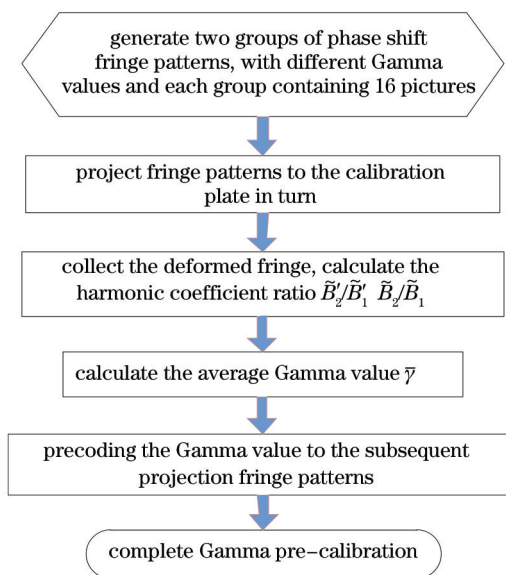


图 4 Gamma 预标定流程图

Fig.4 Flow chart of Gamma pre-calibration process

3 实验结果及误差分析

3.1 仿真验证

为验证 Gamma 畸变校正算法的有效性,对上文所述 Gamma 畸变消除方法进行了仿真。假设未经校正的系统带有 0.8 的原始 Gamma 系数,在此基础上分别编码 0.5 和 1.0 的 Gamma 系数到两组投影用条纹里,那么实际拍摄到的条纹就应该分别携带了 0.4 和 0.8 的 Gamma 系数,如图 5 所示。

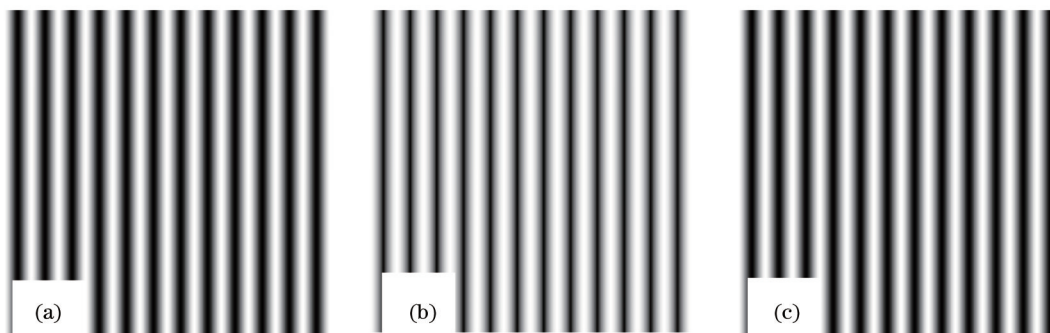


图 5 仿真 CCD 相机获取到的条纹图原始条纹 $\gamma_0=0.8$; (b)预编码 $\gamma=0.5$; (c) 预编码 $\gamma=1.0$

Fig.5 Fringe collected in simulation CCD. (a) Original fringe $\gamma_0=0.8$ (b) pre-calibration $\gamma=0.5$; (c) pre-calibration $\gamma=1.0$

对 $\gamma=0.5$ 和 $\gamma=1$ 的条纹进行编码,分别产生 16 幅移相条纹图,每两幅图之间的移相量为 $\pi/16$,用本章所述算法对 $\gamma=0.5$ 和 1 这两组条纹进行解算,计算得出当给投影条纹预编码值为 1.2684 的 Gamma 系数时[如图 6(a)所示],在 CCD 相机成像端可获得具有最佳正弦性的条纹[如图 6(b)所示],此时获取到的条纹的 Gamma 系数为 $0.8 \times 1.2684 = 1.0147$ 。

图 6 中(c)中蓝色虚线所示为经过 Gamma 校正后的条纹灰度值,红色实线为未经 Gamma 校正的条纹灰度值,可见经过 Gamma 预标定后在成像端获取到的条纹图的高次谐波分量影响被削弱,正弦性好了很多。计算原始 Gamma 畸变条纹的光强值减去标准正弦条纹光强值后误差的均方根(RMS)值为 0.0286;而经本算法校正后的条纹光强与标准正弦条纹光强之间相位误差的 RMS 值为 0.00936,这里的光强均为归一化的光强

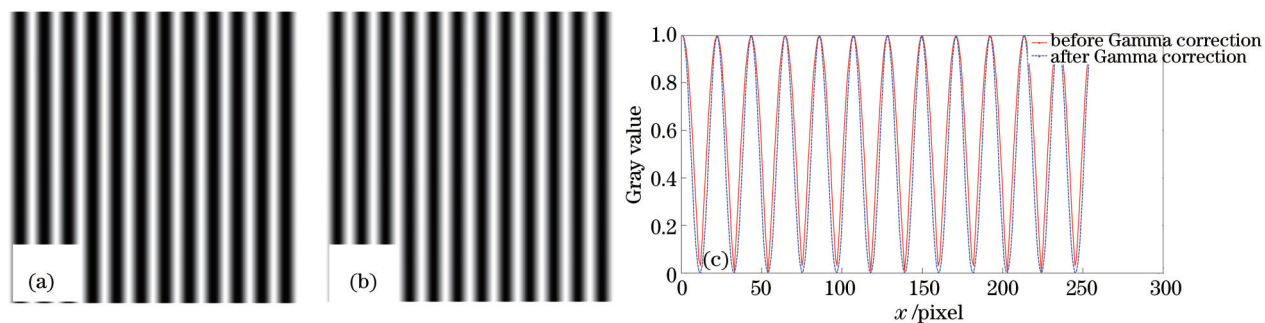


图6 仿真结果。(a)投影条纹($\gamma=1.3440$);(b) 仿真 CCD 获取到的条纹;(c) Gamma 校正前后 CCD 中获取到的条纹正弦性对比
Fig.6 Simulation results. (a) Projection fringe ($\gamma=1.3440$); (b) fringe collected in simulation CCD; (c) comparison of fringes before and after Gamma correction

值。可见,经过 Gamma 校正后获取的条纹(由图中蓝色条纹所代表)的误差大大减小。

3.2 实验论证

在实验室环境下搭建数字光条纹投影系统进行实验,实验装置如图 7 所示,其中的主要实验设备见表 1。根据图 7 搭建实验系统,实物照片如图 8 所示。

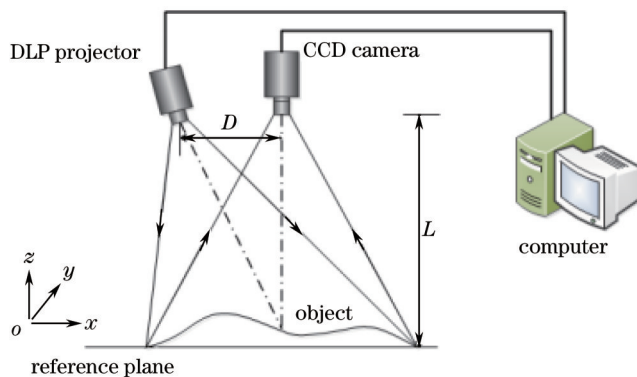


图 7 条纹投影测量装置图

Fig.7 Device of fringe projection measurement

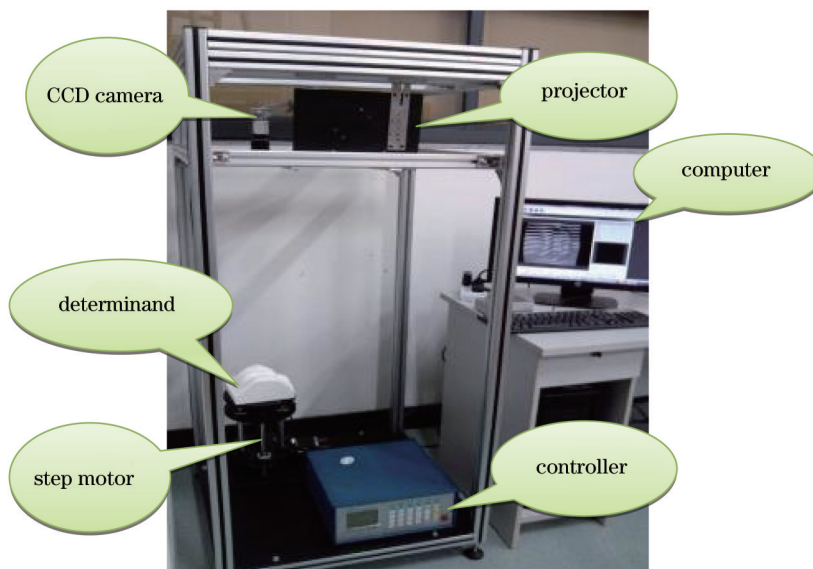


图 8 实验装置实物图

Fig.8 Experimental system

表 1 实验设备

Table 1 Experimental devices

Equipment	Specification
CCD camera	Baumer TXG13
CCD camera lens	US3517MC TV LENS (35 mm, F1.7)
Projector	Acer M112(1024 pixel×768 pixel)
Computer	HP Pioneer

图 8 中, 框架高度为 1.6m, 步进电机及其控制器放置在框架底座上, 将步进电机的平台作为载物台放置被测物^[14]; 投影仪和 CCD 相机分别悬挂在框架的顶端, 投影仪和 CCD 摄像机之间相距约 30cm, 待测物体放置于投影仪前方 100cm 处。投影仪将条纹斜投射到被测物上, CCD 则垂直于被测物拍摄, 拍摄到的条纹图像将传送到计算机中, 由计算机进行相位解调处理得出被测物的真实高度^[15]。

实验时, 由计算机编程产生两组 Gamma 值分别为 1 和 0.5 的条纹, 每组条纹由十六幅移相值为 $\pi/16$ 的条纹图组成, 分别如图 9 (a)、(b) 所示。

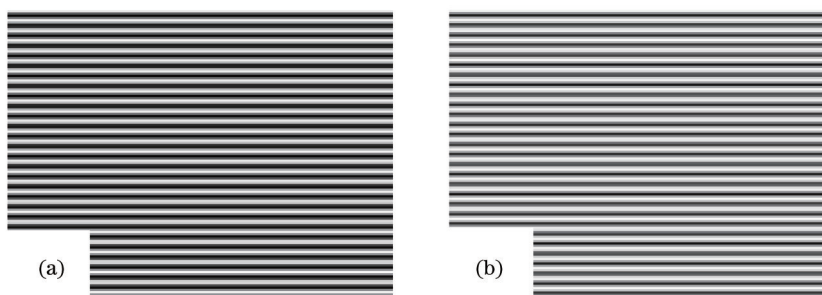


图 9 不同 Gamma 值的投影条纹图。(a) $\gamma=1$; (b) $\gamma=0.5$

Fig.9 Projection fringes with different Gamma values. (a) $\gamma=1$; (b) $\gamma=0.5$

通过计算机控制, 由投影仪将上述两组条纹依次投影到较为平滑的白色平板上, CCD 相机在另一端进行图像采集并输入到计算机上。经 Gamma 畸变校正方法解算出, 当投影条纹的 Gamma 畸变系数为 0.3424

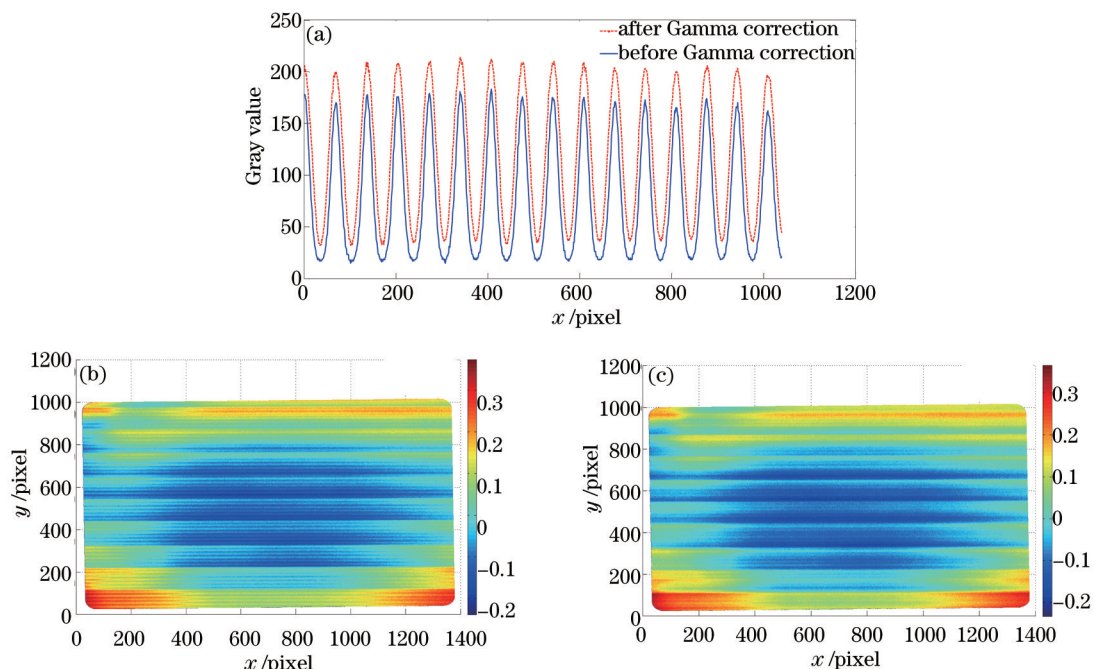


图 10 Gamma 校正前后被测平面相位恢复对比。(a) Gamma 校正前后条纹正弦性对比; (b) 无 Gamma 校正相位结果; (c) Gamma 校正后的相位结果

Fig.10 Comparison of phase before and after Gamma correction. (a) Sinusoidal property comparison; (b) phase without Gamma correction; (c) phase after Gamma correction

时,可最大程度地减弱系统 Gamma 畸变带来的相位误差。

根据四步移相法,编码生成四幅 Gamma 系数为 0.3424 的条纹图,每幅图之间的移相量为 $\pi/2$,依次将其投影到参考平面,在另一端用 CCD 相机采集相应的变形条纹,Gamma 校正前后条纹的正弦性对比如图 10(a)所示,可见条纹的正弦性得到了一定程度的改善。根据采集到的变形条纹解算出待测平面的相位值,图 10

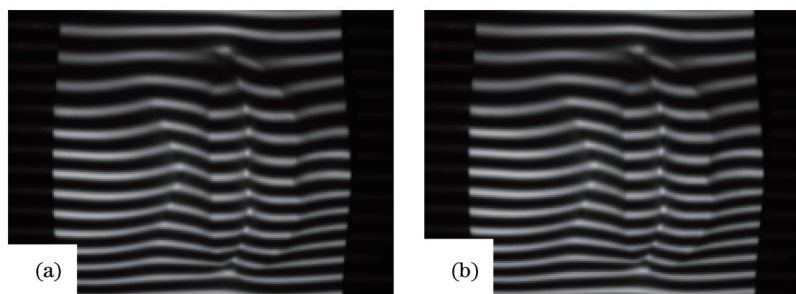


图 11 投影条纹图。(a)投影原始条纹图;(b)投影 Gamma 校正后的条纹图

Fig.11 Projection fringe. (a) Original fringe; (b) fringe after Gamma correction

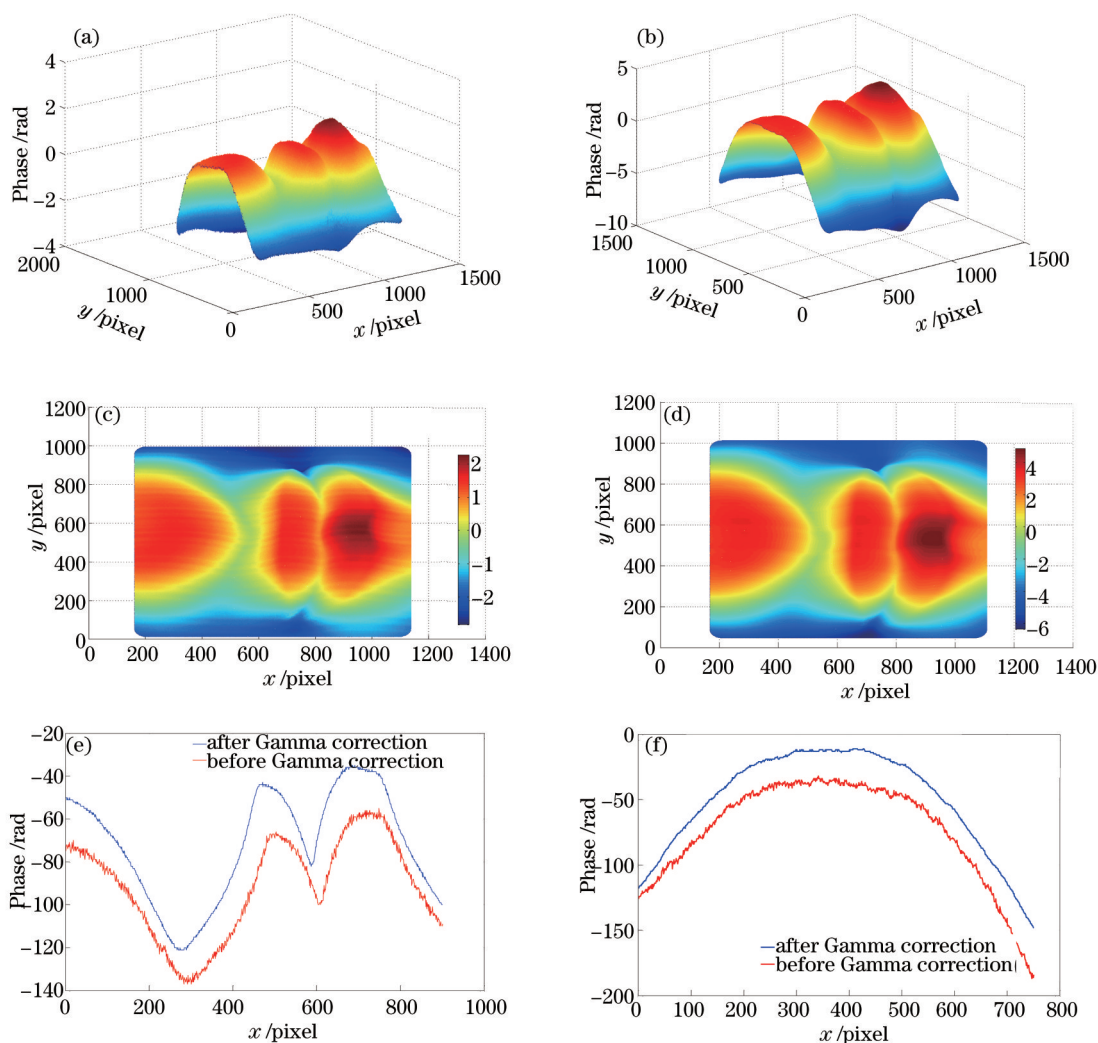


图 12 人嘴被测件的形貌测量相位结果。(a)无 Gamma 校正的相位结果;(b) Gamma 校正后的相位结果;(c)无 Gamma 校正的相位俯视图;(d) Gamma 校正后的相位俯视图;(e) Gamma 校正前后某一列截面对比;(f) Gamma 校正前后某一行截面对比

Fig.12 Phase result of mouth profile measurement. (a) Result without Gamma correction; (b) result after Gamma correction; (c) planform of phase without Gamma correction; (d) planform of phase after Gamma correction; (e) column section comparison of phase before and after Gamma correction; (f) row section comparison of phase before and after Gamma correction

(b)、(c)所示分别为未经任何补偿和经 Gamma 校正后被测平板的复原相位对比,为了方便对比,人为地在图 10(a)中给经过 Gamma 校正后的曲线加了一个光强值。根据图 10(a)计算得出利用算法校正前后,条纹相位误差的标准差减少了 85.3%,相较于张旭等^[16]所提算法中条纹相位差的标准差减少了 77.56%,在精确度方面具有一定的优越性。而且张旭等^[16]所提算法中利用了 60 步相移算法,算法是在 16 步移相算法基础上计算得出的,计算简洁性和测量速度方面也有所提升。

一个形状更为复杂的人嘴雕像被进一步用来测试。图 11 中展示了不经任何 Gamma 校正[图 11(a)]和经过 Gamma 校正后[图 11(b)]的情况下所拍摄到的该雕像的条纹图。图 12(a)和 (b)所示则为相应的不经任何 Gamma 校正和经过 Gamma 校正后所解算出的三维轮廓相位测量结果,图 12(c)和(d)则展示了被测件的相位俯视图,较为直观地看出 Gamma 校正前后的相位恢复结果,从中可见,图 12(d)中由 Gamma 效应引起的误差小于图 12(c)。图 12(e)和(f)则分别为在被测件恢复的相位中选取了某一横向和纵向的截面所勾画出的曲线,红线代表的是不经任何 Gamma 校正所恢复出的相位值,蓝线代表经过 Gamma 校正后恢复出的相位。可见经过 Gamma 校正后,被测件恢复出的相位更为平滑,有效抑制了 Gamma 效应引起的误差。然而,仔细观察图 12(e)和 (f),会发现 Gamma 校正后的相位中仍有些许误差残留。这是由于测量系统的相位误差分布或 Gamma 系数会随被测深度而发生轻微的变化^[17],针对这种情况,可沿深度方向对其进行进一步校正或补偿。

4 结 论

对相移条纹投影测量系统中 Gamma 畸变引起的相位误差进行建模分析,根据高次谐波和 Gamma 系数之间的定量关系,结合 16 步移相的方法求解出高次谐波项,标定出系统的 Gamma 系数。进行了系统仿真实验,Gamma 校正前后的相位平面与标准相位平面之差的 RMS 值从 0.0286 降到了 0.00936,减小了 75%,验证了所述方法的准确性。最后对人嘴雕像进行条纹投影三维形貌测量实验,通过相位解析恢复出人嘴雕像的三维形貌,并对 Gamma 畸变校正前后的测量结果进行了对比分析。

参 考 文 献

- 1 Sai S Gorthi, Pramod Rastogi. Fringe projection techniques: whither we are? [J]. *Opt & Lasers in Eng*, 2010, 48(2): 133–140.
- 2 Xianyu Su, Wensen Zhou, G Von Bally, *et al.*. Automated phase-measuring profilometry using defocused projection of a Ronchi grating[J]. *Opt Commun*, 1992, 94(6): 561–573.
- 3 Hongwei Guo, Haitao He, Mingyi Chen. Gamma correction for digital fringe projection profilometry [J]. *Appl Opt*, 2004, 43(14): 2906–2914.
- 4 Song Zhang, Peisen S Huang. Phase error compensation for a 3-D shape measurement system based on the phase-shifting method [J]. *Opt Eng*, 2007, 46(6): 063601.
- 5 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.
- 6 Bing Pan, Qian Kemao, Lei 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.
- 7 Thang Hoang, Bing Pan, Dung Nguyen, *et al.*. Generic gamma correction for accuracy enhancement in fringe-projection profilometry [J]. *Opt Lett*, 2010, 35(12): 1992–1994.
- 8 Kai Liu, Yongchang Wang, Daniel L Lau, *et al.*. Gamma model and its analysis for phase measuring profilometry [J]. *J Opt Soc Am A*, 2010, 27(3): 553–562.
- 9 Zhongwei Li, Youfu Li. Gamma-distorted fringe image modeling and accurate gamma correction for fast phase measuring profilometry [J]. *Opt Lett*, 2011, 36(2): 154–156.
- 10 Chen Chao, Chen Bin, Meng Jianping. Geometric correction of remote sensing image based on graphic processing unit [J]. *Command Information System & Technology*, 2012, 3(1): 76–80.
陈 超, 陈 彬, 孟剑萍. 基于 GPU 大规模遥感图像的几何校正[J]. *指挥信息系统与技术*, 2012, 3(1): 76–80.
- 11 Wang Xianjin. Investigation into the keystone correction of the perspective projection of 3D scene[J]. *Command Information System & Technology*, 2010, 1(6): 70–74.
王先进. 三维场景透视投影中梯形修正探讨[J]. *指挥信息系统与技术*, 2010, 1(6): 70–74.

- 12 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.
- 13 Wang Dongping, Wu Zhihui, Ni Mingyang, *et al.*. Experimental studies on precision laser displacement adjustment using fiber laser [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(9): 091201.
王东平, 吴志会, 倪明阳, 等. 光纤激光精密位移调整技术实验研究[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(9): 091201.
- 14 Wang Zichen, Dai Ming, Li Gang, *et al.*. Apparatus design for surveying relative angular translation of airborne optoelectronic platform [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(9): 0908007.
王子辰, 戴明, 李刚, 等. 机载光电平台相对角位移测量系统设计[J]. 中国激光, 2013, 40(9): 0908007.
- 15 Chang Li, Yang Jimin. Moire fringe phase difference measurement based on correcting MPFFT algorithm [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(6): 0612006.
常丽, 杨继敏. 基于校正多相位快速傅里叶变换算法的叠栅条纹相位差测量[J]. 光学学报, 2014, 34(6): 0612006.
- 16 Zhang Xu, Zhu Limin. Phase error model from Gamma distortion and Gamma calibration [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(4): 0412006.
张旭, 朱利民. Gamma畸变的相位误差模型与Gamma标定技术[J]. 光学学报, 2012, 32(4): 0412006.
- 17 Mitsuo Takeda, Kazuhiro Mutoh. Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3-D object shapes [J]. Appl Opt, 1983, 22(24): 3977-3982.

栏目编辑: 何卓铭