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

肖焱山[1,2] 曹益平[1] 武迎春[1] 李 洋[1]

([1] 四川大学光电科学系，四川 成都 610064
[2] 三峡大学理学院，湖北 宜昌 443002)

摘要 数字投影和成像系统的 Gamma 非线性效应是导致相位测量轮廓术(PMP)测量误差的重要原因。目前大多采用多帧条纹图进行 Gamma 校正，使测量的实时性受到限制。提出了一种 Gamma 校正方法，利用正交光栅像的傅里叶频谱分布计算 Gamma 值，再根据此 Gamma 值对投影相移条纹进行 Gamma 逆变换，实现投影条纹输入值的提前校正，以获取具有良好正弦性的结构条纹，从而降低 PMP 相位测量误差。校正过程中只需一帧条纹图，而且考虑了测量系统的离焦效应。实验证实了该方法的有效性和正确性。

关键词 傅里叶光学；相位测量轮廓术；Gamma 非线性；正交光栅；傅里叶频谱分析；Gamma 校正

中图分类号 TN206；O438.2 **文献标识码** A **doi**：10.3788/AOS201232.1212004

Gamma Nonlinearity Correction Based on Fourier Spectrum Analysis for Phase Measuring Profilometry

Xiao Yanshan[1,2] Cao Yiping[1] Wu Yingchun[1] Li Yang[1]

([1] *Department of Optoelectronics, Sichuan University, Chengdu, Sichuan* 610064, *China*
[2] *College of Science, China Three Gorges University, Yichang, Hubei* 443002, *China*)

Abstract Gamma nonlinearity of a digital camera-projector pair leads to obvious phase measurement errors in phase measuring profilometry (PMP). Among the conventional gamma correction methods, most of them use plenty of fringe patterns to implement gamma correction, which is unsuitable for real-time measurement. Based on the Fourier spectrum analysis of an orthogonal sinusoid grating, a correction method for the evaluation of the gamma value is proposed. The evaluated gamma value is then pre-encoded into computer-generated phase-shifting fringe patterns to obtain well-sinusoidal fringe patterns, the errors of the PMP are reduced. Only one pattern is needed and the defocusing effect of the measuring system is considered in the correction. Experiments have verified the feasibility and validity of the proposed method.

Key words Fourier optics; phase measuring profilometry (PMP); Gamma nonlinearity; orthogonal grating; Fourier spectrum analysis; Gamma correction

OCIS codes 100.2650; 100.5088; 120.2830; 120.6650

1 引 言

相位测量轮廓术(PMP)具有非接触测量、数据采集量大和测量精度高等优点在许多领域得到了广泛应用[1~4]。其基本原理是将一透过率为正弦分布的光栅投影到待测物体表面，在另一个方向用电荷耦合器件(CCD)拍摄受物体面形调制的变形条纹图，结合

收稿日期：2012-06-26；**收到修改稿日期**：2012-07-25

基金项目：国家 863 计划(2007AA01Z333)、国家重大专项(2009ZX02204-008)、四川省学术和技术带头人培养基金(07GRC-01)和湖北省教育厅自然科学研究项目(B201001203)资助课题。

作者简介：肖焱山(1980—)，男，博士研究生，主要从事光学三维传感和光信息处理等方面的研究。E-mail：xiaoyanshan.scu@qq.com

导师简介：曹益平(1962—)，男，教授，博士生导师，主要从事光学三维传感、光信息处理及光机电一体化等方面的研究。E-mail：caoyping@mail.sc.cninfo.net(通信联系人，中国光学学会会员号：6100106)

相移技术计算出每一个测量点的空间相位值，最后利用相位高度映射关系计算物体表面的高度信息。数字条纹投影与传统光栅投影相比，其优点是利用计算机生成光栅条纹，采用数字光投影仪(DLP)作为透射光源，可以方便投射出任意形状、频率的光栅条纹，且能够实现准确的相移，消除相移误差。然而由 DLP 和 CCD 的 Gamma 非线性所引起的非正弦波形误差成为影响系统测量精度的主要因素[5]。

为了减小 Gamma 非线性引起的测量误差，众多学者做了大量研究，提出的解决方案主要包括离焦[6,7]、相位补偿[8~12]及 Gamma 值计算[13~18]等方法。离焦法主要是通过 DLP 或 CCD 离焦产生低通滤波器对图像高频起抑止作用，然而离焦会降低图像信噪比，且无法完全消除高次谐波。相位补偿法通过建立相位误差模型或相位误差查找表对畸变相位进行补偿，但所建立的相位误差模型缺乏严格的理论证明，而建立误差查找表需要采集大量数据。Gamma 值计算法通过计算整个测量系统的 Gamma 值，然后利用此 Gamma 值对投影条纹或相位进行校正。

以上方法一般需采集多帧条纹图进行大量运算，耗费时间。本文提出一种 Gamma 非线性校正方法，通过对一帧正交光栅条纹图像进行傅里叶变换，利用其频谱分布计算测量系统的 Gamma 值，然后依据此 Gamma 值在计算机生成正弦相移条纹图像时进行 Gamma 逆变换，实现投影条纹输入值的提前校正，以获取具有良好正弦性结构条纹，最后采用传统相移算法计算相位分布。

2　Gamma 非线性校正原理

测量系统拍摄记录灰度图像过程如图 1 所示。计算机生成的正弦条纹 $I(x,y)$ 由 DLP 投影于被测物体表面，CCD 采集到的经物体表面反射后的变形条纹图为 $I_C(x,y)$。由于 DLP 和 CCD 的 Gamma 效应，$I_C(x,y)$ 与 $I(x,y)$ 呈非线性变化关系。

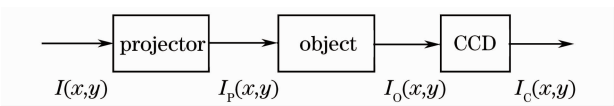


图 1　系统成像流程图

Fig. 1　System imaging procedure

整个测量系统的 Gamma 非线性效应可表示为[13]

$$I_C(x,y) = I^{\gamma}(x,y), \tag{1}$$

式中 γ 为 Gamma 值，表征系统的非线性效应。这里 $I(x,y)$，$I_C(x,y)$ 为归一化强度值。若在 PMP 测量前计算或标定出测量系统的 γ 值，然后对计算机生成的投影光栅进行 $I'(x,y) = [I(x,y)]^{1/\gamma}$ 的 Gamma 逆变换，就可以实现投影图像输入值的提前校正，抑制系统的非线性效应，从而降低 PMP 相位测量误差。将(1)式展开为傅里叶级数形式[14]：

$$I_C(x,y) = \sum_{k=0}^{\infty} A_k \cos\{k[2\pi f_0 x + \varphi_0(x,y)]\}, \tag{2}$$

式中 A_k 为 k 阶谐波系数，f_0 为光栅频率，$\varphi_0(x,y)$ 为条纹初相。

在实际测量过程中，测量系统的离焦效应是不可避免的，CCD 所拍摄的离焦后的条纹图像可表示为[15,16]

$$\hat{I}_C(x,y) = I_C(x,y) * g(x,y), \tag{3}$$

式中 * 为卷积符号，$g(x,y)$ 为系统的点扩展函数，即

$$g(x,y) = (1/2\pi\sigma^2)\exp[-(x^2+y^2)/2\sigma^2], \tag{4}$$

式中 σ 为离焦系数。$g(x,y)$ 的傅里叶变换式表示系统的光学传递函数，即

$$G(f_x,f_y) = \mathscr{F}\{g(x,y)\} = \exp[-2\pi^2\sigma^2(f_x^2+f_y^2)], \tag{5}$$

式中 $\mathscr{F}\{\ \}$ 为傅里叶变换。(3)式可简化为

$$\hat{I}_C(x,y) = I_C(x,y)G(f_x,f_y) = \sum_{k=0}^{\infty} \hat{A}_k \cos\{k[2\pi f_0 x + \varphi_0(x,y)]\}, \tag{6}$$

式中 $\hat{A}_k = A_k G(kf_0)$，表示 k 阶谐波系数。则

$$\frac{\hat{A}_k}{\hat{A}_{k+1}} = \frac{G(kf_0)}{G[(k+1)f_0]}\frac{A_k}{A_{k+1}}, \tag{7}$$

由文献[14]可知

$$\frac{A_k}{A_{k+1}} = \frac{\gamma+k+1}{\gamma-k}, \tag{8}$$

故

$$\frac{\hat{A}_k}{\hat{A}_{k+1}} = \exp[2\pi^2\sigma^2(2k+1)f_0^2]\frac{\gamma+k+1}{\gamma-k}. \tag{9}$$

由于 CCD 所采集到的是离散的数字化图像，根据傅里叶级数展开与傅里叶变换之间的关系，$\hat{I}_C$ 傅里叶级数谐波系数的绝对值与其离散傅里叶变换的幅值绝对值满足[16,18]

$$|\hat{A}_k| = C|\mathscr{F}_D\langle\hat{I}_{Ck}\rangle)|, \tag{10}$$

式中 C 表示比例系数，是常数；$\mathscr{F}_D\langle\hat{I}_{Ck}\rangle$ 表示对 $\hat{I}_C$ 进行离散傅里叶变换，即

$$\mathscr{F}_D\langle\hat{I}_{Ck}\rangle = \sum_{n=0}^{N-1}\exp\left(-\mathrm{i}\frac{2\pi}{N}nk\right)\hat{I}_C,\quad k=0,1,2,\cdots,N-1 \tag{11}$$

式中 N 为采样点总数。因此可通过 $\hat{I}_C$ 的傅里叶频谱

分布求解其傅里叶级数谐波系数 $\hat{A}_k$ 和 $\hat{A}_{k+1}$，然后再利用(9)式求解 γ。为了便于利用(9)式求解测量系统的 γ，可先在计算机生成的条纹中预编码已知的 γ'，考虑到(9)式中有两个未知量 γ 及 σ，可在计算机生成的正弦光栅 $I(x,y)$ 中预编码两个不同的 γ'_1 和 γ'_2，即

$$I_m(x,y)=\{A+B\cos[2\pi f_0 x+\varphi_0(x,y)]\}^{(1/\gamma'_m)},\quad m=1,2 \tag{12}$$

式中 A,B 为事先设计好的常数。则由(9)式生成方程组来求解 γ 和 σ，即

$$\begin{cases}\dfrac{\hat{A}'_{1,k}}{\hat{A}'_{1,k+1}}=\exp[2\pi^2\sigma^2(2k+1)f_0^2]\dfrac{(\gamma/\gamma'_1)+k+1}{(\gamma/\gamma'_1)-k}\\ \dfrac{\hat{A}'_{2,k}}{\hat{A}'_{2,k+1}}=\exp[2\pi^2\sigma^2(2k+1)f_0^2]\dfrac{(\gamma/\gamma'_2)+k+1}{(\gamma/\gamma'_2)-k}\end{cases}, \tag{13}$$

式中 $\hat{A}'_k$，$\hat{A}'_{k+1}$ 表示谐波系数，由(10)式求解。

事实上，计算得到的 γ 是一个与图像大小相等的矩阵，矩阵中每个元素表示图像相应像素点位置的 Gamma 值，各位置 Gamma 值并不完全相等，对 γ 矩阵取平均值得到 $\overline{\gamma}$，将 $\overline{\gamma}$ 值代入 $I'(x,y)=[I(x,y)]^{1/\overline{\gamma}}$，即完成了计算机生成条纹前的 Gamma 逆变换，实现了投影条纹输入值的提前校正。

3 基于正交光栅的 Gamma 校正方法

本文提出了一种基于正交光栅像傅里叶频谱分析的 γ 校正方法，将 γ'_1 和 γ'_2 预编码在正交光栅相互垂直的正弦条纹上，只需要获取一帧条纹图就能计算出测量系统的 γ。计算机生成的经预编码的正交光栅为

$$I(x,y)=[a+b\cos(2\pi f_0 x)]^{(1/\gamma'_1)}+[a+b\cos(2\pi f_0 y)]^{(1/\gamma'_2)}, \tag{14}$$

式中 a,b 为预先设计的常数。假定在正交光栅两个相互垂直方向上 γ 分布是一致的，由(1)式可得 CCD 所拍摄到的条纹图可表示为

$$I_C(x,y)=\{[a+b\cos(2\pi f_0 x)]^{(1/\gamma'_1)}+[a+b\cos(2\pi f_0 y)]^{(1/\gamma'_2)}\}^{\gamma}. \tag{15}$$

对其进行傅里叶变换，其频谱分布可表示为

$$F(f_x,f_y)=\sum_{k_1=-\infty}^{+\infty}\sum_{k_2=-\infty}^{+\infty}G(f_x+k_1f_0,f_y+k_2f_0), \tag{16}$$

式中 k_1,k_2 取整数，表示频谱阶数。分别滤出水平方向频谱 $G(f_x+k_1f_0,f_y)$、$G[f_x+(k_1+1)f_0,f_y]$ 以及竖直方向频谱 $G(f_x,f_y+k_2f_0)$，$G[f_x,f_y+(k_2+1)f_0]$ 并取模，根据(10)式有

$$\begin{cases}|A'_{1,k}|=C|G(f_x+k_1f_0,f_y)|\\ |A'_{1,k+1}|=C|G[f_x+(k_1+1)f_0,f_y]|\\ |A'_{2,k}|=C|G(f_x,f_y+k_2f_0)|\\ |A'_{2,k+1}|=C|G[f_x,f_y+(k_2+1)f_0]|\end{cases}, \tag{17}$$

此处滤波窗形状的选择直接影响有效频谱信息的提取，为了进一步提高滤波精度，可以选择组合滤波窗口进行滤波[19]。将(17)式代入(13)式即可求出系统的 γ。

这种方法可概括为：1)以(14)式为基础，将经过预编码的正交光栅条纹投射到一白色平面上；2)将 CCD 拍摄到的正交光栅条纹图进行傅里叶变换，分别滤出水平方向频谱 $G(f_x+k_1f_0,f_y)$，$G[f_x+(k_1+1)f_0,f_y]$ 以及竖直方向频谱 $G(f_x,f_y+k_2f_0)$，$G[f_x,f_y+(k_2+1)f_0]$；3)利用(17)、(13)式计算出测量系统的 γ，并取平均值 $\overline{\gamma}$；4)利用 $I'(x,y)=[I(x,y)]^{1/\gamma}$ 对计算机生成的正弦相移条纹做 Gamma 逆变换，再投影到待测物表面，采用传统的相移算法计算相位分布。

4 实验与分析

为了验证所提测量方法的可行性和有效性，进行了实物测量。实验中所用 DLP 型号为 CP-HX6500，CCD 型号为 MTV1881EX。3 步相移算法是 PMP 中要求相移步数最少，测量时间最短且能够适用于快速动态测量的测量方法[20]，应用甚广，因此采用 3 步相移算法进行测量。测量过程中需进行 Gamma 校正，将一经过预编码的正交光栅投影到白色平面上(预编码值 $\gamma'_1=1.1$，$\gamma'_2=0.55$)，CCD 拍摄记录的正交光栅条纹图如图 2(a)所示，其频谱分布图如图 2(b)所示。

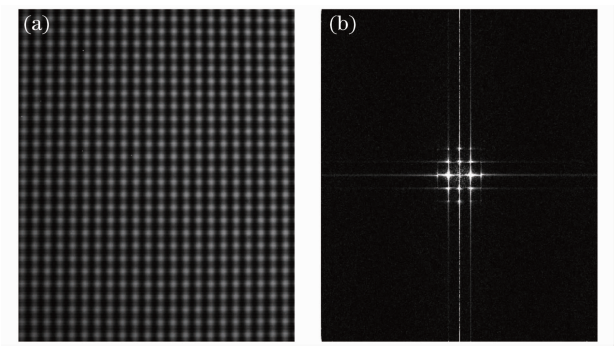


图 2 (a) CCD 拍摄正交光栅像和(b)正交光栅傅里叶频谱分布

Fig. 2 (a) Orthogonal grating pattern taken by CCD and (b) Fourier spectrum distribution

根据以上方法计算测量系统的 γ，其中(17)、(13)式中 $k=k_1=k_2=1$，即分别提取水平、竖直方向的1级和2级频谱参与运算，计算结果显示测量系统的 $\overline{\gamma}=2.1476$。图3(a)表示的是依次将计算机生成的灰级分别为0～255的256幅灰度图投射到白平板上后，CCD拍摄到的灰级变化曲线图；图3(b)表示的是利用所求 $\overline{\gamma}$ 对计算机生成灰度图进行Gamma逆变换后，CCD拍摄的灰级变化曲线图。可以看到经校正后，测量系统的Gamma非线性效应得到了明显的改善。再利用 $\overline{\gamma}$ 对计算机生成的3步正弦相移条纹做Gamma逆变换以完成投影条纹校正，图4(a)表示投影条纹校正前CCD拍摄到的一帧相移条纹图，图4(b)表示其一维傅里叶频谱分布，可以看到由于非线性效应，正弦条纹的傅里叶频谱除了零频与基频成份外，还出现了高次谐波。图4(c)表示投影条纹校正后CCD拍摄到的一帧相移条纹图，图4(d)表示对应的一维傅里叶频谱分布，可以看到经校正后，条纹频谱中的高次谐波得到了有效抑制，从而保证了条纹良好的正弦性。

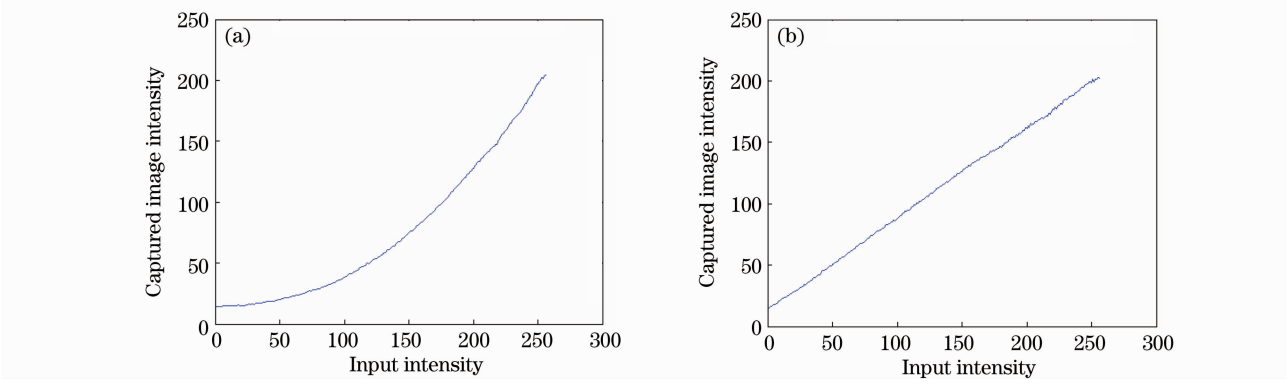


图3　(a)Gamma校正前和(b)校正后CCD拍摄光强随输入强度变化曲线

Fig. 3　Mapping of projector input grayscale values to CCD camera captured image intensity (a) before and (b) after gamma correction

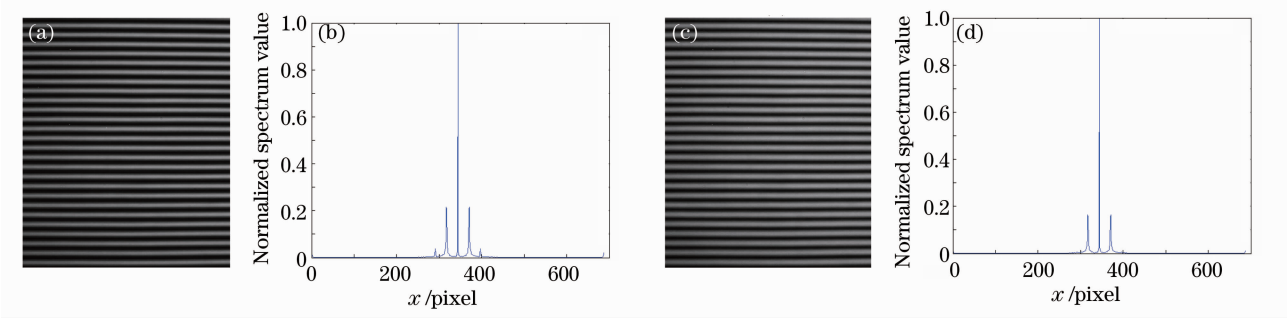


图4　(a) Gamma校正前条纹及其(b)一维频谱分布；(c) Gamma校正后条纹及其(d)一维频谱分布

Fig. 4　(a) Fringe patterns and (b) its one-dimensional Fourier spectrum before gamma correction; (c) fringe patterns and (d) its one-dimensional Fourier spectrum after gamma correction

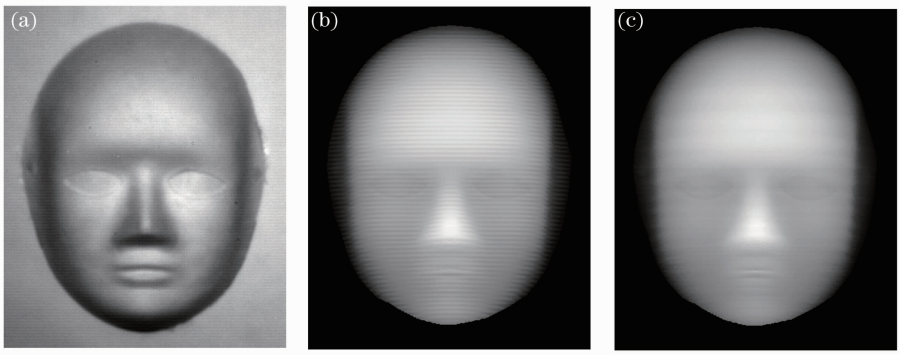
为了与其他校正方法进行比较，还分别采用Li等[15]和Ma等[16]所提的方法计算测量系统的 γ，计算结果如表1所示。文献[14,15]提到测量中相移步数越多，测量结果受Gamma非线性影响越小，结果越精确，本文采用48步相移(其中相移光栅频率 $f_0=1/48$，f_0 的单位是1/pixel)算法对一平面进行了测量，并以此测量结果为基准，将采用了各种Gamma校正方法的3步相移算法所测得结果与其进行比较，如表1所示。校正前相位误差的峰谷值 d_{PV} 和均方根 x_{rms} 分别是0.3626 rad和0.2052 rad，校正后相位误差的 d_{PV} 和 x_{rms} 分别是0.1047 rad和0.0652 rad(Li等[15]的方法)，0.1046 rad和0.0656 rad(Ma等[16]的方法)，0.1037 rad和0.0651 rad(本文所提方法)。可见校正后测量精度得到了明显提高，且这几种方法所得测量结果非常相近，都能够满足测量要求，但Li等[15]的方法需要32帧条纹，Ma等[16]的方法需要2帧不同的条纹，而改进后的方法只需1帧条纹图，进一步简化了Gamma校正过程，提高了测量速度，可以满足快速测量的要求。

表 1 不同测量方法测量结果比较

Table 1 Quantitative comparison of measurement results by four methods

	$\overline{\gamma}$	d_{PV}/rad	x_{rms}/rad	Number of fringe pattern for gamma correction
Without correction	—	0.3626	0.2052	—
Li′s method	2.1419	0.1047	0.0652	32
Ma′s method	2.1449	0.1046	0.0656	2
Proposed one	2.1476	0.1037	0.0651	1

还利用所提方法对一人脸面具进行了测量。图 5(a)为待测物体，图 5(b)为投影条纹校正前采用 3 步相移算法得到的连续相位分布，图 5(c)为利用本文所提方法进行 Gamma 校正后采用 3 步相移算法得到的连续相位分布，图 5(d)为校正前后连续相位剖面比较，可以看到进行校正后物体表面由 Gamma 非线性所引起的“水波状”误差明显减小，测量精度明显提高。



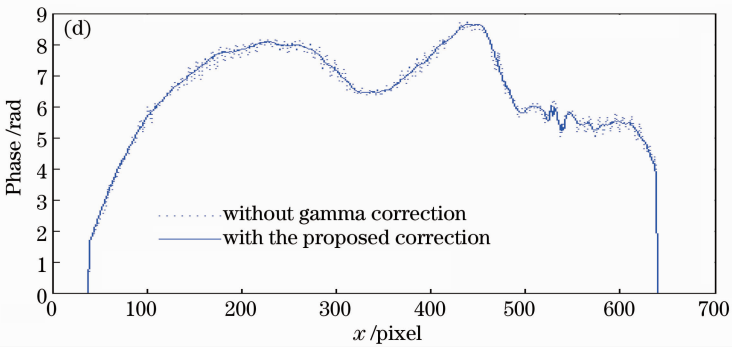


图 5 (a) 待测物；(b) Gamma 校正前连续相位分布；(c) Gamma 校正后连续相位分布和 (d) 校正前后剖面比较

Fig. 5 (a) Measured object; unwrapped phase distribution (b) before and (c) after Gamma correction and (d) comparison of a cross section before and after gamma correction

5 结 论

针对采用数字投影和成像设备的 PMP 测量中所出现的 Gamma 非线性效应，提出了一种 Gamma 非线性校正方法。对一帧经过 Gamma 预编码的正交光栅条纹图进行傅里叶变换，根据其傅里叶频谱分布与傅里叶级数谐波系数之间的关系求解测量系统的 γ，然后依据此 γ 对计算机生成的相移条纹进行 Gamma 逆变换，实现投影条纹的提前校正。实验结果显示此方法所得测量精度较校正前有明显提高。与其他校正方法相比，该方法只需一帧条纹图就能求解系统的 γ 而不失测量的精确性，简化了校正过程，提高了测量速度，可应用于快速或实时的高精度三维面形测量中。

参 考 文 献

1 V. Srinivasan, H. C. Liu, M. Halioua. Automated phase measuring profilometry of 3-D diffuse object[J]. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(18): 3105～3108

2 Sai Siva Gorthi, Pramod Rastogi. Fringe projection technique: Whither we are? [J]. *Opt. & Lasers in Engng.*, 2010, **48**(2): 133～140

3 F. Chen, G. Brown, M. Song. Overview fo the three-dimensional shape measurement using optical method [J]. *Opt. Engng.*, 2000, **39**(1): 10～22

4 S. Zhang. Recent progress on real-time 3D shape measurement using digital fringe projection techniques [J]. *Opt. & Lasers in Engng.*, 2010, **48**(2): 149～158

5 J. Schwider, R. Burow, K.-E. Elssner *et al.*. Digital wave-front

measuring inerferometry: some systematic error sources [J]. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(21): 3421～3432

6 Ying Xu, Laura Ekstrand, Junfei Dai *et al.*. Phase error compesation for three-dimensional shape measurement with projector defocusing [J]. *Appl. Opt.*, 2011, **50**(17): 2572～2581

7 M. J. Baker, J. Xi, J. F. Chicharo. Elimination of γ non-Linear luminance effects for digital video projection phase measuring profilometers [C]. IEEE International Symposium on Electronic Design, Test on Applications, 2008. 496～501

8 Bing Pan, Kemao Qian, Lei Huang *et al.*. Phase error analysis and compensation for nonsinusoidal waveformes in phase-shifting digital fringe projection profilometry [J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(4): 416～418

9 Song 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

10 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

11 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，习俊通. 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

12 Miao Erlong, Zhang Jian, Gu Yongiang *et al.*. Measurement error analysis of high precision Fizeau interferometer for lithography projection objective [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(8): 2029～2034
苗二龙，张　健，谷勇强 等. 用于光刻投影物镜检测的高精度菲佐干涉仪误差分析[J]. 中国激光, 2010, **37**(8): 2029～2034

13 Guo Hongwei, He Haitao, Chen Mingyi. Gamma correction for digital fringe projection profilometry [J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(14): 29.6～2914

14 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

15 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

16 S. Ma, C. Quan, R. Zhu *et al.*. A fast and accurate gamma correction based on Fourier spectrum analysis for digital fringe projection profilometry [J]. *Opt. Commun.*, 2012, **285**: 533～538

17 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

18 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

19 Zhang Rui, Cao Yiping, He Dinggao. New method for improving the accuracy of real-time three-dimensional measurement based on a composite grating [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(10): 1008005
张　睿，曹益平，何定高. 一种提高复合光栅实时三维测量精度的方法[J]. 中国激光, 2011, **38**(10): 1008005

20 Song Zhang, Shingtung Yau. Simultaneous three-dimensional geometry and color texture acquisition using a single color camera [J]. *Opt. Engng.*, 2008, **47**(12): 123604

栏目编辑：何卓铭