

提高数字光栅投影测量系统精度的 gamma 校正技术

郑东亮 达飞鹏

(东南大学自动化学院, 江苏 南京 210096)

摘要 数字光栅投影测量系统中存在的 gamma 失真现象会带来明显的测量误差。提出了一种基于投影光栅预编码的 gamma 校正技术,通过对投影光栅引入一个预编码值,将经过预编码调制后的投影光栅用于测量,极大地削弱了由 gamma 失真现象带来的影响,提高了测量精度。实验验证了该方法的有效性,将该 gamma 校正技术用于传统的相移算法。采用该方法求得的预编码值,对相移算法的投影正弦光栅进行预编码调制,调制后的相移算法精度得到极大提高。与已有的基于投影光栅预编码的 gamma 校正技术相比,所提方法简单且有效。

关键词 测量; gamma 校正; 预编码; 光栅投影

中图分类号 TP391.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0512003

gamma Correction Method for Accuracy Enhancement in Grating Projection Profilometry

Zheng Dongliang Da Feipeng

(School of Automation, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China)

Abstract The gamma distortion in fringe projection profilometry system will create obvious measurement error. A gamma correction method based on the pre-coding of projected grating is proposed to reduce the measurement error caused by the gamma distortion. By applying an appropriate pre-coding value to the projected grating, the gamma distortion effect is attenuated and the accuracy is enhanced. Experiments are carried out to verify the proposed method. The traditional phase shifting profilometry is combined with the gamma correction method. Projected sinusoidal grating of the phase shifting profilometry are modulated by the appropriate pre-coding value. Then, accuracy of measurement of the phase shifting profilometry can be effectively enhanced. Compared with the existing pre-coding gamma correction method, the proposed method is simple and effective.

Key words measurement; gamma correction; pre-coding; fringe projection

OCIS codes 120.5050; 120.6650; 100.2650; 100.5070

1 引 言

光栅投影法^[1,2]是一种比较常用的光学三维测量方法,通过对待测物体表面投射光栅条纹,根据采集到的形变光栅图像相位信息获得物体表面的高度信息。该方法具有低成本和高精度等显著优点,在三维测量方面取得了广泛的应用。常用的获取物体表面相位信息方法有变换方法以及相移算法,变换方法包括傅里叶变换方法^[3,4]、小波变换方法^[5]以及希尔伯特变换方法^[6]。变换方法通常只需要一幅光

栅图像,但运算复杂且精度较低。相移算法需要多幅光栅图像,但能获得较高的精度。光栅投影测量系统(FPP)主要的设备有数字投影仪、CCD 相机等。由于设计原因,投影仪和相机均具有灰度非线性失真的性质,使得拍摄得到的正弦光栅投影条纹不具有良好的正弦性,随之会给测量带来相位误差。投影仪具有的非线性失真,称为 gamma 失真,既是投影仪的输入输出呈现指数函数响应关系,其中 gamma 代表投影仪的指数值。对于整个投影系统

收稿日期: 2010-10-18; **收到修改稿日期**: 2011-01-20

基金项目: 国家自然科学基金(60775025)和江苏省自然科学基金(BK2010058)资助课题。

作者简介: 郑东亮(1984—),男,博士研究生,主要从事三维测量方面的研究。E-mail: zdlseu@gmail.com

导师简介: 达飞鹏(1968—),男,博士,教授,主要从事三维测量和三维人脸识别等方面的研究。E-mail: dafp@seu.edu.cn

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网(<http://www.opticsjournal.net>)

而言, CCD 相机具有的非线性失真特性也会对 gamma 失真产生影响, 最终, 体现的是系统具有整体的 gamma 失真现象, 因此, 相应系统也具有一个整体的 gamma 值。针对这类非线性失真引起的相位误差, 一方面直接进行相位补偿: Zhang 等^[7]提出一种查表法对相位直接进行补偿, 能够较大地减少相位误差。Bing 等^[8]通过理论分析得出由这种非正弦性引起的相位误差模型, 然后根据此模型对相位进行补偿。另一方面通过计算出整个光栅投影测量系统的非线性失真的 gamma 值以及该 gamma 值所对应的相位误差, 据此进行相位补偿: Guo 等^[9]通过对拍摄得到的光栅图像进行统计学分析, 估计出 FPP 系统的 gamma 值。Liu 等^[10]给出了 FPP 系统的 gamma 求解模型, 能够较精确地求解出系统 gamma 值, 盖绍彦等^[11]提出了一种基于数字投影仪的光栅相位自校正方法。以上分析多是在相位信息求解出来之后进行补偿, Thang 等^[12,13]提出一种 gamma 预编码的方法, 通过对计算机产生的用于投影的正弦光栅进行预编码, 经过预编码调制后的光栅图像用于相移法测量物体表面, 不需要进行相位补偿, 即可取得较高的精度。该方法需要计算出正弦光栅所需的预编码值, 而 Thang 等提出的求解预编码值的方法相对复杂, 需要复杂的运算以及采用多步相移技术事先求出较精确的相位信息等。基于此, 本文提出一种更为简便的方法求得投影光栅所需的预编码值, 实验验证了该方法可以求得合适的预编码值, 提高了 FPP 系统的测量精度。

2 gamma 预编码方法

2.1 光栅投影测量相移算法

FPP 系统中, 计算机产生的是符合正弦分布的投影光栅, 而实际拍摄得到的光栅图像通常会含有非线性的高次谐波分量, 因此实际获取的光栅图像可以以下述三角函数形式表述:

$$I_i(x, y) = a + \sum_{j=1}^p b_j \cos[j(\phi + \delta_i)], \quad (1)$$

式中 a 代表背景光强或者称为平均灰度, b_j 为各谐波分量灰度调制系数, ϕ 为实际的相位分布, p 为拍摄所得光栅条纹的最高阶次, I_i 为拍摄得到的第 i 幅投影光栅, δ_i 为第 i 幅投影光栅的相移量。(1) 式中包含 $p+2$ 个未知变量: a, b_1, \dots, b_p, ϕ , 则需要 $p+2$ 步相移算法去求解这些变量, 式中 $i = 1, 2, \dots, p+2$ 和 $\delta_i = \frac{i-1}{p+2}2\pi$ 。基于最小二乘算法, 经过一系列严

格的数学运算, 得出所求相位分布公式为^[14]

$$\phi = \arctan\left(-\sum_{i=1}^{p+2} \sin \delta_i I_i / \sum_{i=1}^{p+2} \cos \delta_i I_i\right). \quad (2)$$

随着 p 值增大, 相移算法的精度增高, 相位误差逐渐降低。

2.2 gamma 预编码方法思想

拍摄得到实际光栅图像需要经过图 1 所示流程^[7], 计算机产生的光栅灰度图像分布为 I_i^s , 经过投影仪, 输出光栅图像函数变为 I_i^p , 有

$$I_i^p = f(I_i^s), \quad (3)$$

式中 $f(I_i^s)$ 是输入 I_i^s 的响应函数, 包含投影仪的 gamma 失真。将输出光栅投射到待测物体上, 经过调制得到

$$I_i^o = r(I_i^p + a), \quad (4)$$

式中 r 代表待测物体表面的反射率, a 为环境光强。相机拍摄得到的光栅图像为

$$I_i^c = g(I_i^o), \quad (5)$$

式中 $g(I_i^o)$ 为相机的响应函数, 其中包含非线性失真。FPP 系统的 gamma 失真由整个系统决定, 相关的设备主要有投影仪以及 CCD 相机, 理论上, FPP 系统的 gamma 失真可简化为^[13]

$$I_{(i)}^c = (I_{(i)}^s)^{\gamma_0}, \quad (6)$$

式中 $I_{(i)}^c$ 为 I_i^c 规格化后的值, $I_{(i)}^s$ 为 I_i^s 规格化后的值, γ_0 为整个光栅投影系统所对应的 gamma 失真值, 不同的 FPP 系统对应不同的 gamma 失真值, 通常 γ_0 在 $1 < \gamma_0 < 3$ 范围内^[15]。可以看出, 如果在计算机产生理想光栅图像前引入一个合适的预编码 γ_p , 使得 $1/\gamma_p < 1$, 则有

$$I_{(i)}^c = [(I_{(i)}^s)^{1/\gamma_p}]^{\gamma_0}. \quad (7)$$

这样可以削弱系统的 gamma 失真对测量的影响, 即使采用最简单的三步相移算法, 也能达到较高的精度。随着 γ_p 数值的变化, 相位误差随之变化, 理论与实验均验证了当 γ_p 取一个接近 3 的实数时, 相位误差最小^[13]。但是不同的 FPP 系统以及在不同的测量环境下, 所需的预编码 γ_p 不同, Thang 等给出了一种求解预编码 γ_p 的方法, 通过引入该预编码, 简单的三步相移算法即能获得较准确的相位信息, 但是该方法需要复杂的运算以及采用多步相移算法求出较精确的相位信息, 实验过程中采用的是 20 步

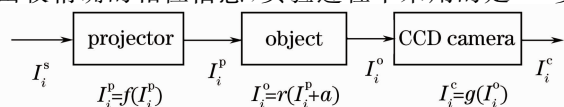


图 1 获取光栅图像流程

Fig. 1 Flow chart of grating images captured by the camera

相移算法,则该方法至少需要几十幅投影光栅图像,多幅光栅图像也增大了图像获取时间以及运算复杂度。基于此,本文提出一种简便易行的预编码方法,能精确的求解出合理的预编码值 γ_p 。

3 本文所提预编码方法

实际的 FPP 系统并不像(6)式描述的那么简单,假设灰度图像设定的灰度值为 I_i^s ,当引入预编码 γ_p 后,计算机产生的灰度图像的灰度值可表示为

$$I_{(i)}^s = (I_i^s)^{1/\gamma_p}. \quad (8)$$

然后将计算机产生灰度图像经过投影仪投影到待测物体上,考虑到实际存在的背景光强、幅度调制以及系统复杂度,实际获得的灰度图像则可近似表示为^[13]

$$I_i^c = c_1 (I_i^s)^{\gamma_a/\gamma_p + \gamma_b} + c_2, \quad (9)$$

式中 $\gamma_a/\gamma_p + \gamma_b = \gamma'$ 为整个系统的 gamma 值, γ_p 为预编码值, c_1 为幅度调制, c_2 为背景光强, γ_a 和 γ_b 是由系统所确定的值。则不同的预编码值 γ_p 对应不同的系统 gamma 值 γ' , gamma 校正的目的是选择一个合适的预编码值 γ_p , 使得 $\gamma' = 1$, 系统的 gamma 失真得以消除或者尽量减弱系统的 gamma 失真。

首先由计算机产生三幅具有不同灰度值的灰度图像: I_1^s, I_2^s 和 I_3^s , 同一幅灰度图像中所有像素灰度值均设定为相同。拍摄所得的三幅灰度图像分别为: I_1^c, I_2^c 和 I_3^c , 由(9)式可得

$$I_1^c = c_1 (I_1^s)^{\gamma'} + c_2, \quad (10)$$

$$I_2^c = c_1 (I_2^s)^{\gamma'} + c_2, \quad (11)$$

$$I_3^c = c_1 (I_3^s)^{\gamma'} + c_2. \quad (12)$$

由(10)~(12)式可以推知

$$\frac{I_1^c - I_2^c}{I_1^c - I_3^c} = \frac{(I_1^s)^{\gamma'} - (I_2^s)^{\gamma'}}{(I_1^s)^{\gamma'} - (I_3^s)^{\gamma'}}, \quad (13)$$

式中仅含 γ' 一个未知变量, 是一个超越方程, 令

$$f(\gamma') = \frac{I_1^c - I_2^c}{I_1^c - I_3^c} - \frac{(I_1^s)^{\gamma'} - (I_2^s)^{\gamma'}}{(I_1^s)^{\gamma'} - (I_3^s)^{\gamma'}} \text{ 为寻优目标函数,}$$

$f(\gamma')$ 为一个非线性的超越函数, 由(13)式可知, 满足 $f(\gamma')$ 最小的 γ' 即为所求的系统 gamma 值。遗传算法是一种模仿生物进化机制的优化算法, 具有良好的非线性搜索特性以及全局优化特性^[16]。因此, 本文采用遗传算法求出最优的或是近似最优的 γ' , 使得 $f(\gamma')$ 最小, 即可求得系统的 gamma 值。对三幅不同灰度图像分别引入两个预编码 γ_{p1} 和 γ_{p2} , 则可拍摄得到两组 6 幅灰度图像。针对每一组灰度图像, 分别采用遗传算法寻优, 可以得到两个系统 gamma 值 γ'_1 和 γ'_2 , 则有

$$\gamma_a/\gamma_{p1} + \gamma_b = \gamma'_1, \quad (14)$$

$$\gamma_a/\gamma_{p2} + \gamma_b = \gamma'_2, \quad (15)$$

联立(14),(15)式, γ_{p1} 和 γ_{p2} 已知, 则可解出 γ_a 和 γ_b , 令 $\gamma' = 1$, 得到

$$\gamma_p = \frac{\gamma_a}{1 - \gamma_b}, \quad (16)$$

式中即为最终求得的预编码值, 引入该预编码值, 即可消除 gamma 失真。相较于 Thang 等提出的求解预编码的方法, 本文提出方法只需要 6 幅灰度图像即可实现, 大大减少了投影光栅的数目, 相应也简化了运算。

4 实验验证

实验室构建了一个 FPP 系统, 系统结构图如图 2 所示, 系统中的 CCD 相机的型号为(UNIQ UP1800), 投影仪型号为(Optoma EP737)以及相应的图像采集卡和计算机。相机与投影仪均控制在合理的距离范围内, 相机距离投影仪约 20 cm, 相机距离待测物体约 90 cm, 系统软件部分采用 Visual C++6.0 实现。

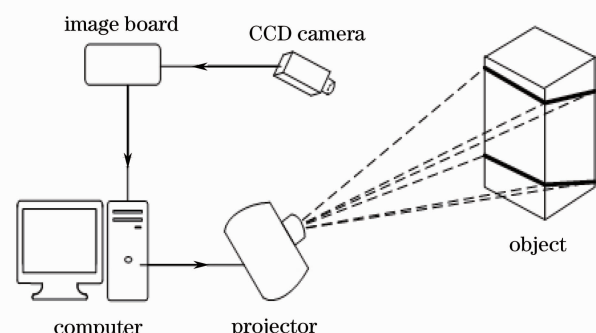


图 2 光栅投影系统结构图

Fig. 2 Grating projection system

首先验证了预编码算法的有效性, 采用经典的三步相移算法, 已知预编码 γ_p 取为接近于 3 的实数时, 相位误差最小。故预编码 γ_p 分别取 1.5, 2.5, 3 和 4.5 时, 进行误差对比分析。将经过预编码调制的投影光栅投射到待测物体上, 进而获得相位信息。取相位信息中的第 300 行, 与采用 20 步相移算法获得的实际相位相减得到相位误差如图 3 所示, 图 3 中纵坐标代表的是相位误差值, 单位为弧度, 横坐标代表的是像素位置, 分别为相位信息的第 300 行中的 1~300 pixel。很明显, 随着 γ_p 从 1.5~4.5, 相位误差呈现先降后升的趋势, 当 $\gamma_p = 3$ 时, 所对应的相位误差已经很小, 这与文献[13]中所得到的结论相符。因此验证了预编码方法能够明显降低相位误差, 提高测量精度。

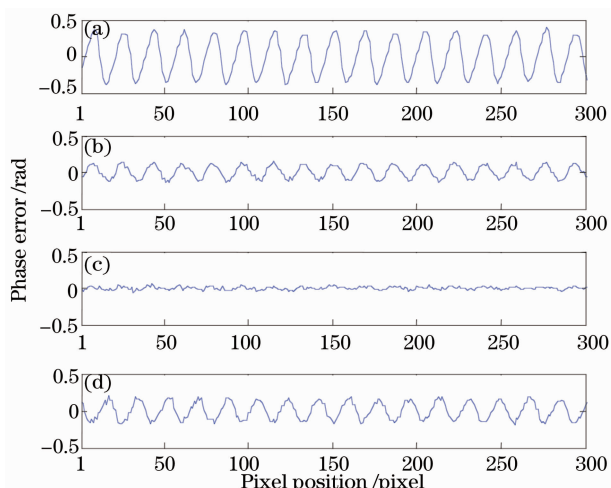


图3 相位误差。(a) $\gamma_p=1.5$, (b) $\gamma_p=2.5$,
(c) $\gamma_p=3.0$, (d) $\gamma_p=4.5$

Fig. 3 Phase errors. (a) $\gamma_p=1.5$, (b) $\gamma_p=2.5$,
(c) $\gamma_p=3.0$, (d) $\gamma_p=4.5$

下面验证该预编码方法,由于 CCD 相机具有一定的灰度响应范围,超出该范围就会产生平台效应^[17],具体情况如图 4 中 FPP 系统输入输出灰度响应曲线所示。将计算机产生的一系列灰度图像用投影仪投影到一个标准白色平板上,当计算机产生图像的灰度值大约在(100,230)之间,即为图 4 所示的(a,b)区间内,FPP 系统能够正常响应,而当计算机产生图像的灰度值超出该范围,FPP 系统的输出随输入变化很小,即出现较明显平台效应。则输

入灰度区间(100,230)属于 CCD 相机正常的响应范围,本文中计算机所产生图像灰度值均在该范围内选取,若超出该范围,会带来较大误差。

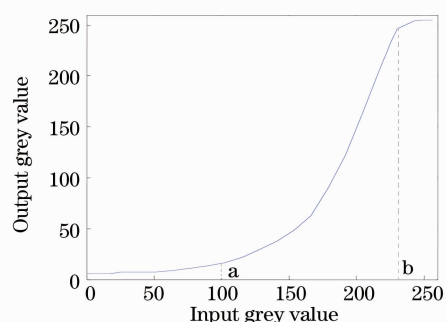


图 4 FPP 系统输入输出响应曲线

Fig. 4 Response relation between the input and output grey value of the FPP system

考虑到 FPP 系统的输入输出关系,在区间(100, 230)内任意选取三个值作为计算机产生的输入图像灰度值,为了便于分析,选取 $I_1^s = 0.4$, $I_2^s = 0.5$ 和 $I_3^s = 0.6$,则 I_1^s , I_2^s 和 I_3^s 对应的灰度值分别为:102,128 和 154,均在相机响应区间内。根据前文所述的预编码方法,如(8)式所示,对 I_1^s , I_2^s 和 I_3^s 分别进行预编码,考虑合理的预编码值 γ_p 接近于 3 以及 CCD 相机具有一定的灰度响应范围,预编码值分别选为 $\gamma_{p1} = 2.5$ 和 $\gamma_{p2} = 3.5$,在搭建的 FPP 系统平台上,将经过预编码的灰度图像分别投影到一个标准的白色平板上,拍摄得到六幅灰度图像如图 5 所示。

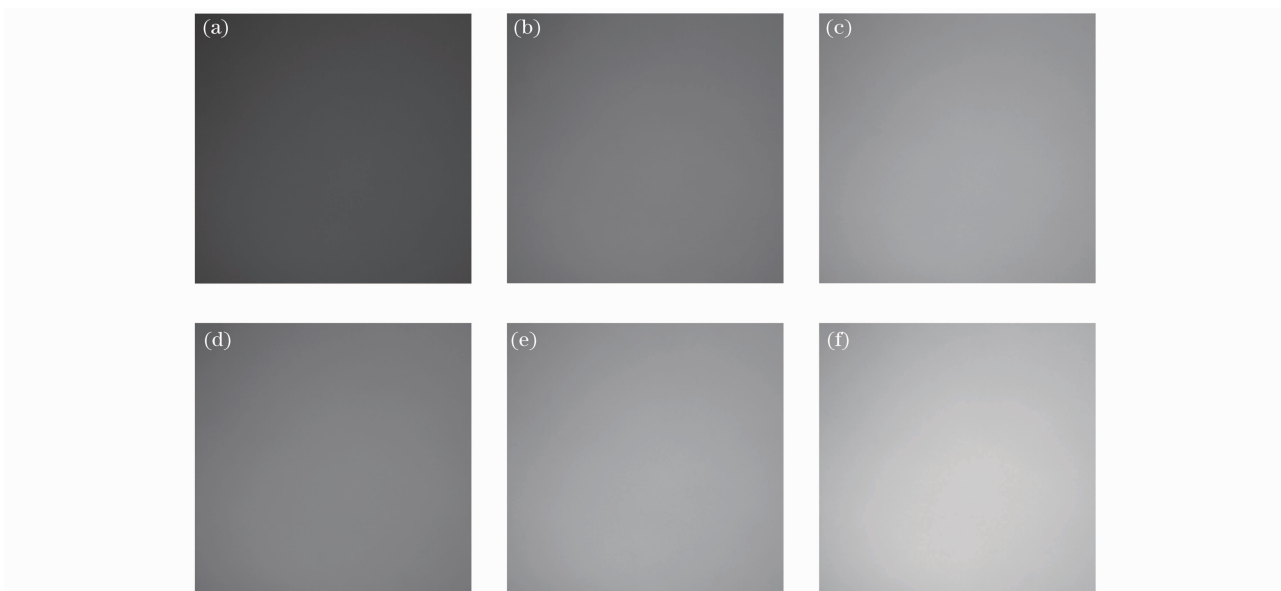


图 5 CCD 相机获取的 6 幅灰度图像。(a) $\gamma_p = 2.5, I_1^s = 0.4$; (b) $\gamma_p = 2.5, I_2^s = 0.5$; (c) $\gamma_p = 2.5, I_3^s = 0.6$;
(d) $\gamma_p = 3.5, I_1^s = 0.4$; (e) $\gamma_p = 3.5, I_2^s = 0.5$; (f) $\gamma_p = 3.5, I_3^s = 0.6$

Fig. 5 Six gray images captured by CCD camera. (a) $\gamma_p = 2.5, I_1^s = 0.4$; (b) $\gamma_p = 2.5, I_2^s = 0.5$; (c) $\gamma_p = 2.5, I_3^s = 0.6$;
(d) $\gamma_p = 3.5, I_1^s = 0.4$; (e) $\gamma_p = 3.5, I_2^s = 0.5$; (f) $\gamma_p = 3.5, I_3^s = 0.6$

令 I_1^c, I_2^c 和 I_3^c 分别为图 5(a), (b) 和 (c), 根据 (13) 式, 采用遗传算法寻优得到图像中第 300 行所有像素对应的 γ 值 γ' , 为了提高准确性, 取该行所有像素求得 γ 值的平均值作为 γ'_1 , 此时有 $\gamma'_1 = 1.72$ 。同理, 令 I_1^c, I_2^c 和 I_3^c 分别为图 5(d), (e) 和 (f), 求得第 300 行所有像素对应的 γ 值, 取平均值得到 $\gamma'_2 = 0.58$ 。由 (14) 和 (15) 式求得系统参数 $\gamma_a = 9.975$ 和 $\gamma_b = -2.27$, 再根据 (16) 式, 得 $\gamma_p = 3.05$, 即为所求的预编码值, 该预编码值与 Thang 等提出方法求得的结果相一致。然后将 $\gamma_p = 3.05$ 引入到三步相移算法中, 对比引入预编码前后的相位误差变化, 根据 (1) 和 (8) 式产生所需的投影光栅, 同样提取拍摄得到的光栅图像的第 300 行, 根据 (2) 式求得相位信息分布, 并与 6 步相移算法进行对比误差分析, 如图 6 所示。经过预编码校正后的三步相移算法的误差比六步相移算法略小, 但要远远小于未经过预编码校正的三步相移算法。分别取第 300 行相位均方根误差进行量化分析, 未校正三步相移算法、未校正六步相移算法和校正后三步相移算法的相位误差分别为 0.3492, 0.0353 和 0.0107 rad, 分别如图 6 中蓝线、红线和绿线所示, 经过预编码校正的三步相移算法相位误差已经很小。将该预编码算法应用到常用的四步和五步相移算法, 并与校正后三步相移算法得到的相位误差进行对比, 取第 300 行进

行分析, 校正后的三步、四步和五步相移算法的相位均方根误差依次为 0.0107, 0.0088 和 0.0058 rad。

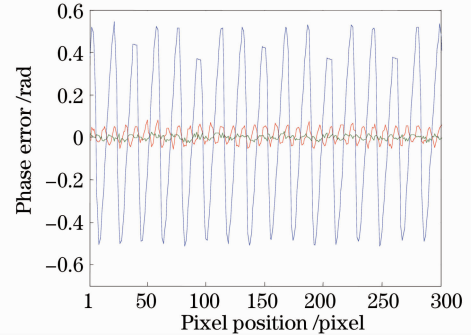


图 6 校正前后相位误差对比

Fig. 6 Comparison of phase errors before and after the γ correction

为了验证本文所提预编码算法在实际测量中的作用, 在所构建的 FPP 系统上, 采用校正后三步相移算法测量了一个模特头像的三维面型。图 7(a) 为所测量的模特头像模型, 图 7(b) 为经过预编码后的相移光栅图像投影到模型, 图 7(c) 为利用 (2) 式计算得到的包裹相位信息, 然后采用质量图法对校正后三步相移算法得到的包裹相位分别进行相位展开^[18], 展开的相位信息分别如图 7(d) 所示, 直观上, 校正后三步相移算法获得的展开相位图已经相当平滑。根据系统的标定参数以及展开得到的相位信息, 图 7(e) 和图 7(f) 分别给出了模特头像三维点云

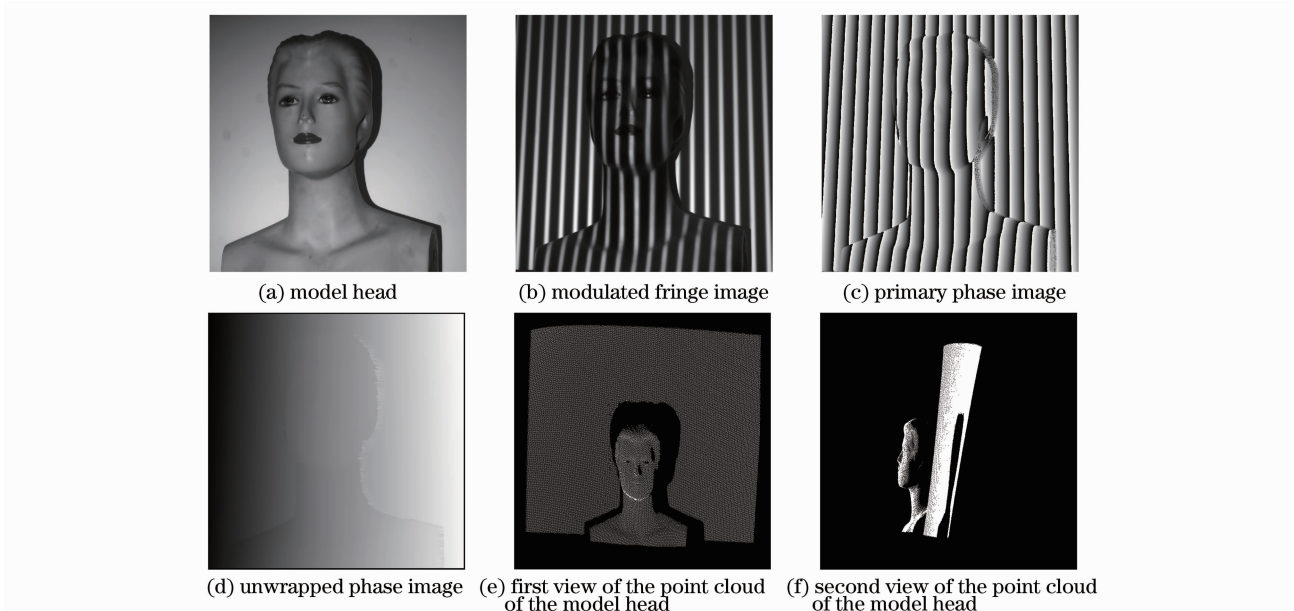


图 7 预编码校正的三步相移算法测量模特头像

Fig. 7 Model head measurement of three-step phase shifting algorithm combined with the pre-coding γ correction method

正视图以及侧视图,取得了良好的效果。

5 结 论

在分析了数字光栅投影测量系统中存在的 gamma 失真现象以及由此给系统带来的测量误差,提出了一种基于光栅图像预编码的 gamma 校正技术,极大地削弱了 gamma 失真现象带来的影响,提高了测量精度。相较于 Thang 等提出的求解预编码的方法需要复杂的运算以及采用多步相移技术求出较精确的相位信息。该方法只需要 6 幅灰度图像以及优化运算即可求得合理的预编码值,大大减少了所需拍摄图像的数目,相应也简化了运算。通过投影 6 幅设计好的均匀强度的灰度图像,对拍摄得到的灰度图像进行运算求解,得到合理的预编码 gamma 值,将所求预编码值引入到传统的相移法的投影正弦光栅。验证得到,经过预编码校正后的相移算法的相位误差要远低于校正之前,提高了测量精度,最终将经过预编码校正的三步相移算法用于实际测量,即可取得良好的测量效果。

参 考 文 献

- 1 Da Feipeng, Gai Shaoyan. Flexible three-dimensional measurement technique based on a digital light processing projector [J]. *Appl. Opt.*, 2008, **47**(3): 377~385
- 2 Gai Shaoyan, Da Feipeng. A new fast phase unwrapping method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(2): 259~267
盖绍彦, 达飞鹏. 一种新的快速解相位方法 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(2): 259~267
- 3 M. Takeda, H. Ina, S. Kobayashi. Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1982, **72**(1): 156~60
- 4 Mao Xianfu, Chen Wenjing, Su Xianyu *et al.*. Analysis of new phase and height algorithm in Fourier transform profilometry [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(2): 225~229
毛先富, 陈文静, 苏显渝 等. 傅里叶变换轮廓术中新的相位及高度算法分析 [J]. *光学学报*, 2007, **27**(2): 225~229
- 5 Jingang Zhong, Jiawen Weng. Spatial carrier-fringe pattern analysis by means of wavelet transform; wavelets transform profilometry [J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(26): 4993~4998
- 6 Liudong Xiong, Shuhai Jia. Phase-error analysis and elimination for nonsinusoidal waveforms in Hilbert transform digital-fringe projection profilometry [J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(15): 2363~2365
- 7 Song Zhang, Shing-Tung Yau. Generic nonsinusoidal phase error correction for three-dimensional shape measurement using a digital video projector [J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(1): 36~43
- 8 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
- 9 Guo Hongwei, He Haitao, Chen Mingyi. gamma correction for digital fringe projection profilometry [J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(14): 2906~2914
- 10 Kai Liu, Yongchang Wang, Daniel L. Lau *et al.*. gamma model and its analysis for phase measuring profilometry [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 2010, **27**(3): 553~562
- 11 Gai Shaoyan, Da Feipeng. A new phase alignment method for digital projector in phase measuring profilometry [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2008, **34**(11): 1363~1368
盖绍彦, 达飞鹏. 基于数字投影仪的光栅相位自校正方法 [J]. *自动化学报*, 2008, **34**(11): 1363~1368
- 12 Thang Hoang, Zhaoyang Wang, Dung Nguyen. Accuracy enhancement of fringe-projection-based 3D imaging [C]. 2010 OSA Conference on Digital Holography and Three-Dimensional Imaging, Miami, Florida, 2010
- 13 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
- 14 Yves Surrel. Design of algorithms for phase measurements by the use of phase stepping [J]. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(1): 51~60
- 15 M. J. Baker, J. F. Chicharo, J. Xi. An investigation into temporal gamma luminance for digital fringe Fourier transform profilometers [C]. IEEE International Symposium on Intelligent Signal Processing: WISP, 2007
- 16 Liang Shitong, Yang Jianfeng, Xue Bin. A new phase diversity wave-front error sensing method based on genetic algorithm [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(4): 1015~1019
梁士通, 杨建峰, 薛彬. 基于遗传算法的改进相位差法波前误差传感技术研究 [J]. *光学学报*, 2010, **30**(4): 1015~1019
- 17 Georg H. Notni, Gunther Notni. Digital fringe projection in 3D shape measurement-an error analysis [C]. *SPIE*, 2003, **5144**: 372~380
- 18 Song Zhang, Xiaolin Li, ShingTung Yau. Multi-level quality-guided phase unwrapping algorithm for real-time three-dimensional shape reconstruction [J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(1): 50~57