

# 免疫于伽马非线性的八步相移法

杨柳 程筱胜 崔海华\* 戴宁 张晨博

南京航空航天大学机电学院, 江苏 南京 210016

**摘要** 为了消除投影仪伽马非线性对相位波动误差的影响,提出了基于八步相移法的伽马非线性误差消除方法。对相位解析表达式进行了数学分析和推导,建立了相位与投影仪伽马值的数学模型,针对投影仪的四阶以内的伽马非线性误差,相位求解表达式消除了伽马非线性系数,消除了伽马非线性对相位的影响。实验结果表明,该方法能有效降低由伽马非线性引起的相位波动误差,相位误差的标准偏差降低为原来的8.3%,标准方差降低为原来的18.5%。该方法简单可靠,不受环境光和系统参数的影响,具有很好的通用性。

**关键词** 测量; 结构光测量; 误差消除; 八步相移; 伽马非线性

**中图分类号** TN206 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP53.111202

## Eight-Step Phase Shifting Method Being Independent of Gamma Nonlinearity

Yang Liu Cheng Xiaosheng Cui Haihua Dai Ning Zhang Chenbo

*College of Electrical and Mechanical, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,  
Nanjing, Jiangsu 210016, China*

**Abstract** In order to eliminate the influence of the gamma nonlinearity of the projector on the phase, this paper proposes a method to remove the gamma nonlinearity based on the eight-step phase shifting. The mathematical analysis and derivation of the phase are demonstrated, and the mathematical model is established between phase and projector gamma. For the gamma nonlinearity error within the four order of the projector, we illustrate that the expression of the phase is independent of the gamma nonlinearity. The experimental results show that the method can effectively reduce the phase error caused by the gamma nonlinearity. The standard deviation of the phase error is reduced to 8.3% of it. Besides, the standard deviation is reduced to 18.5% of it. This method is simple, reliable and universal, and it is not affected by ambient light and system parameters.

**Key words** measurement; structural light measurement; error elimination; eight-step phase shifting; gamma nonlinearity

**OCIS codes** 120.5050; 120.6650; 190.4350; 050.5080

## 1 引言

随着测量技术的发展,结构光三维测量作为测量技术的重要组成部分,在生产生活中起到了越来越重要的作用。基于相移的结构光三维测量是将具有相位信息的条纹图像投射到物体表面,经过物体外轮廓调制后,解出调制后的相位信息,根据投射前后的相位信息和相应的几何关系计算出待测物体的三维信息<sup>[1-3]</sup>。该技术在工业测量和检测,数字医疗,逆向工程,文物保护等方面得到了广泛的应用<sup>[4-5]</sup>。随着科学技术的发

**收稿日期:** 2016-07-08; **收到修改稿日期:** 2016-08-10; **网络出版日期:** 2016-10-21

**基金项目:** 国家自然科学基金(51305201)、江苏省自然科学基金(BK20130793)、南京市产学研项目(201306007)

**作者简介:** 杨柳(1989—),男,硕士研究生,主要从事光学三维测量方面的研究。E-mail: 861242008@qq.com

**导师简介:** 程筱胜(1964—),男,博士,博士生导师,主要从事数字化设计制造、企业信息化、数字化医疗装备等方面的研究。

E-mail: smcadme@nuaa.edu.cn

\* 通信联系人。E-mail: cuihh@nuaa.edu.cn

展,对测量精度也提出了更高的要求,基于相移的结构光测量系统的误差主要来自相位误差<sup>[6-9]</sup>。其主要原因有两个:1)相移步距不均匀导致的相移误差,随着数字投影仪的广泛应用,这个问题得到了很好的解决;2)投影仪的伽马非线性导致的非正弦波形误差,由于目前多数投影仪都存在伽马非线性,因此非正弦波形误差是相移结构光测量系统的主要误差来源<sup>[10-11]</sup>。

为了提高测量精度,减少伽马非线性的影响,国内外学者做了大量的研究,并取得了一定的成果。李中伟等<sup>[12]</sup>直接投射条纹图到白色平板上,然后根据采集到的条纹图求解相位并和理想相位作比较,将他们之间的差值即相位误差存储到查找表中,用于后续测量的误差补偿,但此方法建立的查找表不具有通用性,测量系统和测量环境的不同都会造成查找表不同。Zhang等<sup>[13]</sup>提出首先标定出投影仪的伽马值,然后根据标定出的伽马值,建立相位误差查找表,用于误差补偿。这种方法需要伽马值保持不变,而且容易受环境光的影响。Liu等<sup>[14]</sup>建立了一种数学模型,模拟分析了伽马非线性和相位误差的关系,并计算出伽马值提高精度,但是计算伽马值的过程比较繁琐,效率较低。Pan等<sup>[15]</sup>提出迭代法补偿误差,迭代法的优点就是通过不断的迭代,测量精度会不断提高,但是多次迭代运算量较大,影响该方法的应用。Huang等<sup>[16]</sup>根据伽马非线性误差的周期特性,提出用两种相移偏量的光栅图像计算相位并做平均来补偿相位误差,这种方法操作复杂,耗时较长。

在实际测量过程中,使用查找表、标定伽马值等方法进行误差补偿时均未考虑测量环境。测量仪器参数的不同和测量中环境光的不同,都会对补偿结果造成很大的影响。为了解决以上问题,本文提出了八步相移法,推导出的相位表达式只与采集到的图片像素值有关。该相位测量结果免疫于伽马非线性和环境光等因素,具有很好的通用性,测量精度大大提高。

## 2 算法原理

### 2.1 相位波动误差分析

在实际的测量过程中,将理想的正弦光栅图投射到待测物体表面,光栅图可表示为

$$x = \frac{M}{2} \left[ 1 + \cos\left(\frac{2\pi n}{p} + \delta\right) \right], \quad (1)$$

式中  $M$  为光栅灰度最大值,  $n$  为像素点个数,  $p$  为光栅周期,  $\delta$  为初始相位。如果投影仪没有伽马非线性,投影仪的输入与输出是线性的,可表示为

$$f(x) = a + bx, \quad (2)$$

将(1)式代入(2)式可得到在没有伽马非线性的情况下输出的光栅分布为

$$f(x) = \left( a + \frac{bM}{2} \right) + \frac{bM}{2} \cos\left(\frac{2\pi n}{p} + \delta\right). \quad (3)$$

以  $I_i$  表示投影光栅光强分布,应用四步相移法,可知

$$\begin{cases} I_1 = I_0 (1 + \lambda \cos \phi) \\ I_2 = I_0 \left[ 1 + \lambda \cos\left(\phi + \frac{\pi}{2}\right) \right] \\ I_3 = I_0 [1 + \lambda \cos(\phi + \pi)] \\ I_4 = I_0 \left[ 1 + \lambda \cos\left(\phi + \frac{3\pi}{2}\right) \right] \end{cases}, \quad (4)$$

式中  $I_0$  表示背景光强,  $\lambda$  表示光栅的对比度。根据(4)式可解出包裹相位为

$$w(\phi) = \arctan\left(\frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3}\right). \quad (5)$$

由于数字投影仪的伽马非线性的影响,投影仪输入输出灰度不是线性的,其响应曲线可表示为

$$f(x) = [a + bx]^\gamma. \quad (6)$$

对于不同的投影仪,  $\gamma$  值会有不同,国家电视系统委员会(NTSC)推荐值为 2.2,但是具体的生产过程中,由于厂家不同、工艺不同,投影仪的  $\gamma$  值也是不同的,而且为了达到更好的视觉效果还会进行动态调整<sup>[17]</sup>。一

般情况下  $\gamma$  值大于 1 小于 4。当  $\gamma$  值大于 1 小于 2 时,根据四步相移法,可以得到包裹相位值如(5)式所示。当  $\gamma$  值大于 2 小于 4 时,传统的四步相移法已经不适用。

为了验证投影仪的伽马非线性对相位的影响,首先用四步相移法模拟实验。模拟结果如图 1 所示(取  $\gamma=4$ )。图 1(a)表示投影仪的灰度响应曲线,由于  $\gamma=4$ ,所以响应曲线是一个近似四次的曲线。取光栅图像第 300 行中两个周期的条纹为例,图 1(b)中实线表示标准的正弦信号,正弦信号输入到投影仪中,由于伽马非线性的影响,输出非正弦信号如虚线所示。根据标准的正弦信号和输出的非正弦信号,利用四步相移法进行解相位,解出的理想相位值是直线,如图 1(c)中实线所示,虚线表示的是非正弦信号解出的实际相位值,可以看出是弯曲的曲线。理想相位和实际相位之间的差值就是投影仪的伽马非线性导致的误差,如图 1(d)所示,由图中可以看出误差是周期性的波动误差。相位的波动误差会直接导致重建点云的周期性波动误差,影响测量精度。

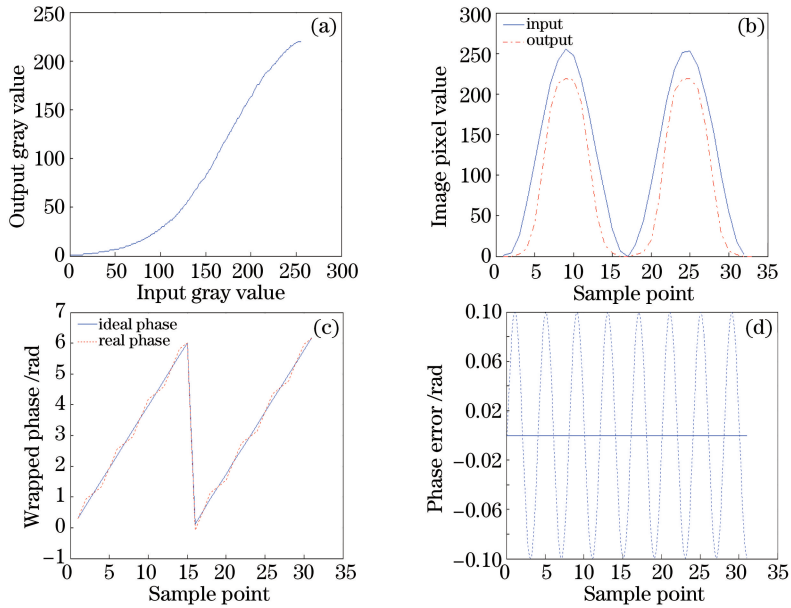


图 1 伽马非线性对相位的影响。(a)投影仪的灰度响应曲线;(b)输入的正弦信号和输出信号;  
(c)理想相位和实际相位的相位主值;(d)投影仪的伽马非线性引起的相位误差

Fig. 1 Effect of gamma nonlinearity on the phase. (a) Gray response curve of projector; (b) input sinusoidal signal and output signal; (c) principal values of ideal phase and real phase; (d) phase error caused by the gamma nonlinearity of the projector

## 2.2 相位波动误差消除

针对以上问题本文提出了用八步相移法消除伽马非线性误差,以  $\gamma=4$  为例,假设投影仪的响应函数为

$$f(x) = a + bx + cx^2 + dx^3 + ex^4, \quad (7)$$

将(1)式代入(7)式并化简,得到存在伽马非线性时光栅强度分布为

$$I''_i = \alpha \cos^4(\phi'' + \delta_i) + \beta \cos^3(\phi'' + \delta_i) + \mu \cos^2(\phi'' + \delta_i) + \nu \cos(\phi'' + \delta_i) + A, \quad (8)$$

式中  $\alpha, \beta, \mu, \nu, A$  为常数,其值分别为  $\alpha = \frac{eM^4}{16}$ ,  $\beta = \frac{eM^4}{4} + \frac{dM^3}{8}$ ,  $\mu = \frac{3eM^4}{8} + \frac{3dM^3}{8} + \frac{cM^2}{4}$ ,  $\nu = \frac{eM^4}{4} + \frac{3dM^3}{8} + \frac{cM^2}{2} + \frac{bM}{2}$ ,  $A = \frac{eM^4}{16} + \frac{dM^3}{8} + \frac{cM^2}{4} + \frac{bM}{2} + a$ 。

为了消除投影仪伽马非线性和环境光对相位的影响,相位解析表达式中需要消除  $\alpha, \beta, \mu, \nu, A$  等系数,利用八步相移法,每步偏移  $\frac{\pi}{4}$ ,则可得到

$$\begin{cases} I_1'' = \alpha \cos^4(\phi'') + \beta \cos^3(\phi'') + \mu \cos^2(\phi'') + \nu \cos(\phi'') + A \\ I_2'' = \alpha \cos^4\left(\phi'' + \frac{\pi}{4}\right) + \beta \cos^3\left(\phi'' + \frac{\pi}{4}\right) + \mu \cos^2\left(\phi'' + \frac{\pi}{4}\right) + \nu \cos\left(\phi'' + \frac{\pi}{4}\right) + A \\ I_3'' = \alpha \cos^4\left(\phi'' + \frac{\pi}{2}\right) + \beta \cos^3\left(\phi'' + \frac{\pi}{2}\right) + \mu \cos^2\left(\phi'' + \frac{\pi}{2}\right) + \nu \cos\left(\phi'' + \frac{\pi}{2}\right) + A \\ I_4'' = \alpha \cos^4\left(\phi'' + \frac{3\pi}{4}\right) + \beta \cos^3\left(\phi'' + \frac{3\pi}{4}\right) + \mu \cos^2\left(\phi'' + \frac{3\pi}{4}\right) + \nu \cos\left(\phi'' + \frac{3\pi}{4}\right) + A \\ I_5'' = \alpha \cos^4(\phi'' + \pi) + \beta \cos^3(\phi'' + \pi) + \mu \cos^2(\phi'' + \pi) + \nu \cos(\phi'' + \pi) + A \\ I_6'' = \alpha \cos^4\left(\phi'' + \frac{5\pi}{4}\right) + \beta \cos^3\left(\phi'' + \frac{5\pi}{4}\right) + \mu \cos^2\left(\phi'' + \frac{5\pi}{4}\right) + \nu \cos\left(\phi'' + \frac{5\pi}{4}\right) + A \\ I_7'' = \alpha \cos^4\left(\phi'' + \frac{3\pi}{2}\right) + \beta \cos^3\left(\phi'' + \frac{3\pi}{2}\right) + \mu \cos^2\left(\phi'' + \frac{3\pi}{2}\right) + \nu \cos\left(\phi'' + \frac{3\pi}{2}\right) + A \\ I_8'' = \alpha \cos^4\left(\phi'' + \frac{7\pi}{4}\right) + \beta \cos^3\left(\phi'' + \frac{7\pi}{4}\right) + \mu \cos^2\left(\phi'' + \frac{7\pi}{4}\right) + \nu \cos\left(\phi'' + \frac{7\pi}{4}\right) + A \end{cases}, \quad (9)$$

化简(9)式,可得

$$\begin{cases} I_1'' - I_5'' = 2\beta \cos^3 \phi'' + 2\nu \cos \phi'' \\ I_7'' - I_3'' = 2\beta \sin^3 \phi'' + 2\nu \sin \phi'' \\ I_2'' - I_6'' = \frac{\sqrt{2}}{2} \beta (\cos \phi'' - \sin \phi'')^3 + \sqrt{2} \nu (\cos \phi'' - \sin \phi''), \\ I_8'' - I_4'' = \frac{\sqrt{2}}{2} \beta (\cos \phi'' + \sin \phi'')^3 + \sqrt{2} \nu (\cos \phi'' + \sin \phi'') \end{cases}, \quad (10)$$

继续化简(10)式,消除  $\beta$  和  $\nu$ ,可得

$$w(\phi'') = \arctan \left[ \frac{-\sqrt{2}(I_2'' - I_6'') + \sqrt{2}(I_8'' - I_4'') + 2(I_7'' - I_3'')}{\sqrt{2}(I_2'' - I_6'') + \sqrt{2}(I_8'' - I_4'') + 2(I_1'' - I_5'')} \right]. \quad (11)$$

(11)式即为投影仪伽马值为4的情况下,利用八步相移法求解的包裹相位表达式,当伽马值小于4时,即(7)式中  $e$  为零时,(11)式是不受影响的。可见,此时相位只与采集到图片灰度值  $I_i''$  有关,与伽马非线性和背景光强无关。因此消除了伽马非线性引起的相位误差,对于环境光也有较强的稳定性。

### 3 实验结果与分析

为了验证误差消除方法的正确性和有效性,搭建了单目结构光测量系统。测量系统由一台相机和一台投影仪构成,相机为映美精 DMK 31BU03 黑白工业相机,分辨率为  $1024 \text{ pixel} \times 768 \text{ pixel}$ 。投影仪型号为 NEC NP43+,分辨率为  $1024 \text{ pixel} \times 768 \text{ pixel}$ 。根据八步相移法解包裹相位,相位展开及三维重建原理参考文献[18]。使用该系统测量一个标准平板。图2表示由计算机根据(1)式生成的8幅正弦光栅图像  $I_i, \delta_i$  为其相位初值。

将图2生成的图像依次投向一块标准平板,相机采集后用两种方法分别进行解算包裹相位。以相机采集标准平板的图片第300行中三个周期为例。图3(a)为四步相移法解出的三个周期的包裹相位,图3(b)为八步相移法解出的包裹相位,图3(c)表示两种方法对应的相位误差,即求解的真实相位与理想相位的差值,用相位误差平方和的平均数表示相位均方差。虚线表示利用四步相移法时的相位误差,误差最大值为  $0.095 \text{ rad}$ ,由计算可知其均方差为  $0.049 \text{ rad}$ ,实线表示八步相移法情况下的相位误差,误差最大值为  $0.011 \text{ rad}$ ,其均方差为  $0.0041 \text{ rad}$ ,由此可见相位均方差降低为原来的  $1/12$ 。

利用文献[18-19]中的方法进行解包运算,图4表示对采集图片的第300行进行相位展开的结果。图4(a)表示四步相移法解的解包裹相位,图4(b)表示八步相移法解的解包裹相位,可以看出利用八步相移法展开的相位更平滑而且更接近线性。

对标准平板的测量结果如图5所示,图5(a)显示的是四步相移法重建的平板平面,可见其表面有明显

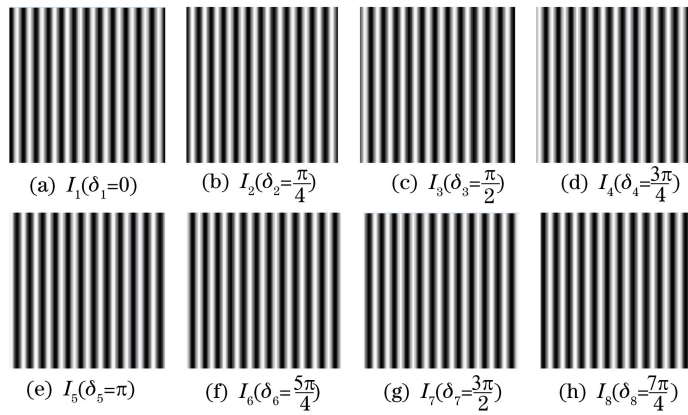


图2 计算机生成的8幅正弦光栅图像

Fig. 2 Eight sinusoidal grating patterns generated by computer

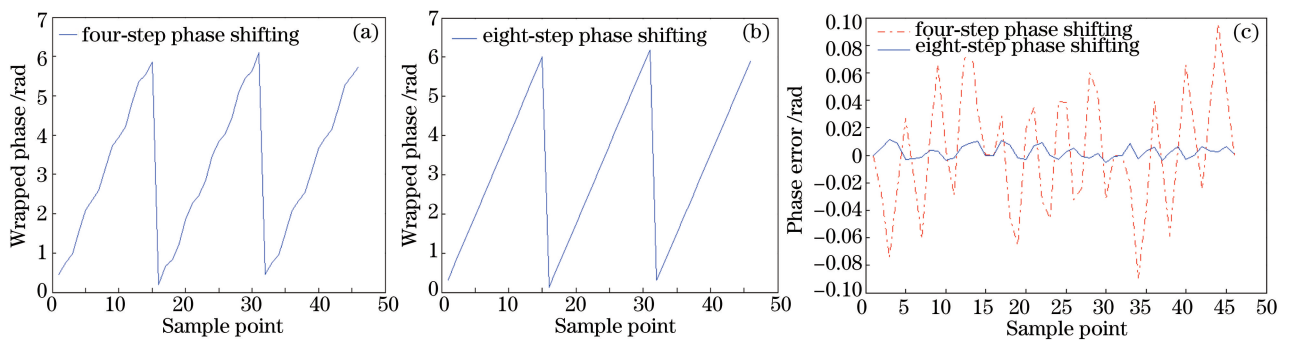


图3 标准平板的包裹相位及其误差。(a) 四步相移解包裹相位；(b) 八步相移解包裹相位；(c) 相位误差

Fig. 3 Wrapped phases and its errors of standard flat board. (a) Wrapped phase calculated by four-step phase-shifting algorithm; (b) wrapped phase calculated by eight-step phase-shifting algorithm; (c) phase error

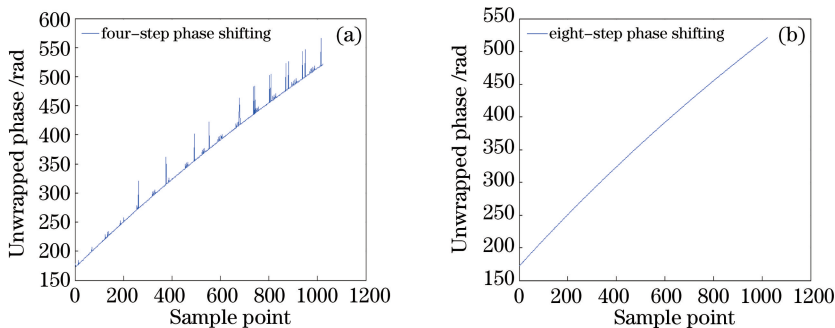


图4 采集图片第300行展开相位。(a) 四步相移情况下展开的绝对相位；(b) 八步相移情况下展开的绝对相位

Fig. 4 Unwrapped phases from the 300<sup>th</sup> line in the picture. (a) Unwrapped phase calculated by four-step phase-shifting algorithm; (b) unwrapped phase calculated by eight-step phase-shifting algorithm

的波动误差,这就是由相位波动误差引起的。测量得到的平面点云数据导入 Geomagic 软件中拟合出一个理想平面,并求出实际点云平面和拟合的理想平面之间的平均距离,即平面的标准方差,用来表示平面的测量精度。根据计算,四步相移重建的平面标准方差为 0.1523 mm。图 5(b)显示的是八步相移法重建的平板平面,其表面平滑很多,其标准方差为 0.0285 mm。标准方差降低了 18.5%。

另外,利用该系统对复杂曲面进行测量,以人脸模型为例,如图 6 所示。图 6(a)表示的四步相移重建的结果,人脸模型表面比较粗糙,还有较多的孔洞。图 6(b)表示的八步相移重建的结果,测量结果更光滑,孔洞较少,视觉效果更好。图 6(c)表示的是原始的人脸模型。



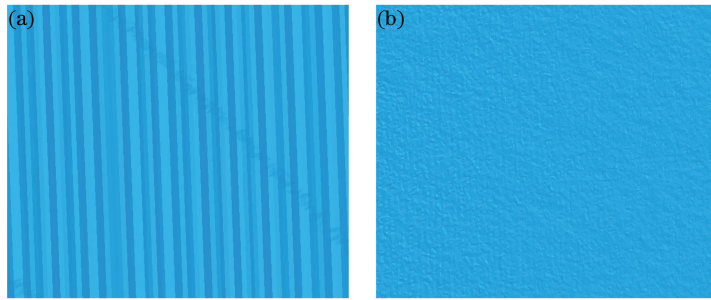


图 5 标准平板的测量结果。(a) 四步相移法重建的标准平板;(b) 八步相移法重建的标准平板

Fig. 5 Measurement results of the flat board. (a) Reconstruction of the flat board with four-step phase shifting algorithm; (b) reconstruction of the flat board with eight-step phase shifting algorithm

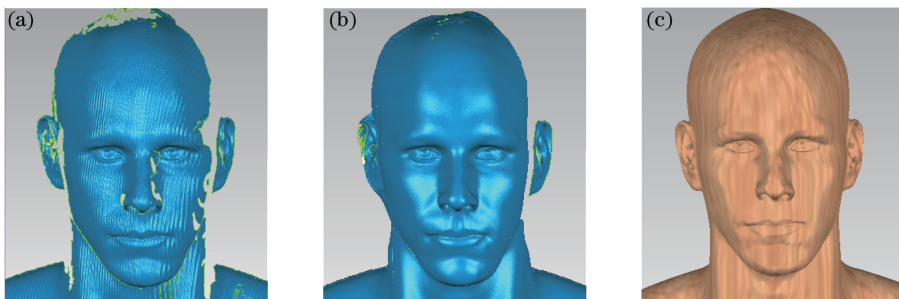


图 6 人脸模型的测量结果。(a) 四步相移法重建的人脸;(b) 八步相移法重建的人脸;(c) 原始模型

Fig. 6 Measurement results of a human face model. (a) Reconstruction of a human face model with four-step phase shifting algorithm; (b) reconstruction of a human face model with eight-step phase shifting algorithm; (c) original model

## 4 结 论

在基于数字投影的结构光三维测量系统中,投影仪的伽马非线性对测量精度有很大的影响。本文提出八步相移法,通过数学推导的方式直接在相位解析表达式上消除伽马非线性系数,从而消除了伽马非线性对相位的影响。实验结果表明,该算法精度高,不受环境和设备的影响,通用性强,对平板的测量结果显示,测量精度达到 0.0285 mm,相位误差降低为原来的 1/12,标准方差降低了 18.5%。

## 参 考 文 献

- Chen Yang. In 3D shape measurement using the mixture of fringe pattern in the relationship between phase-height method [J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2015, 36(9): 136-141.  
陈 扬. 在三维形状测量中运用条纹投影解决相位-高度关系的混合方法[J]. 四川兵工学报, 2015, 36(9): 136-141.
- Fan Jianying, Fu Yao, Wang Yang, *et al.* Dual three-step triangular phase-shifting coding structured light three-dimensional measurement technology [J]. Journal of Natural Science of Heilongjiang University, 2016, 33(2): 251-255.  
范剑英, 付 瑶, 王 洋, 等. 双三步三角形相移编码结构光三维测量技术[J]. 黑龙江大学自然科学学报, 2016, 33(2): 251-255.
- Pan Yuling. A 3-D shape measurement system based on phase-shifting method [D]. Chongqing: Chongqing University, 2013.  
潘玉玲. 相移法三维测量系统[D]. 重庆: 重庆大学, 2013.
- Liu J Y, Li Y F. Performance analysis of 3-D shape measurement algorithm with a short baseline projector-camera system [J]. Robotics and Biomimetics, 2014, 1: 1-10.
- Wu Shuyu, Yang Yimin, Zhong Zhenyu, *et al.* Phase error correction algorithm for grating projection measurement system [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(7): 0712005.  
吴蜀予, 杨宜民, 钟震宇, 等. 光栅投影测量系统中的相位误差校正算法[J]. 光学学报, 2014, 34(7): 0712005.
- Chen Chen, Liu Ke, Li Yanqiu, *et al.* Two-dimensional virtual grating phase shifting moiré fringe method of phase

- extraction[J]. *Chineses J Lasers*, 2015, 42(2): 0208004.
- 陈晨, 刘克, 李艳秋, 等. 二维虚光栅移相莫尔条纹相位提取算法[J]. *中国激光*, 2015, 42(2): 0208004.
- 7 Wu Feibin, Tang Feng, Wang Xiangzhao, *et al.* Phase retrieval errors analysis of Ronchi phase-shifting shearing interferometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(6): 0612004.
- 吴飞斌, 唐锋, 王向朝, 等. Ronchi 相移剪切干涉仪及其相位提取误差分析[J]. *光学学报*, 2015, 35(6): 0612004.
- 8 Liu Jian, Tian Ailing, Liu Bingcai, *et al.* A phase extraction algorithm in wavelength tuning interferometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(3): 0312001.
- 刘剑, 田爱玲, 刘丙才, 等. 一种变频相移干涉测量的相位提取算法[J]. *光学学报*, 2014, 34(3): 0312001.
- 9 Chen Zhao, Hou Yuanyuan, Xu Jiancheng. Sign determination and error analysis of phase extraction based on principal component analysis[J]. *Chineses J Lasers*, 2016, 43(1): 0108002.
- 陈翌, 侯园园, 徐建程. 主元分析相位提取算法的符号确定及误差分析[J]. *中国激光*, 2016, 43(1): 0108002.
- 10 Wang Chunli, Lei Zhenkun. On the inverse phase fringe projection profilometry with nonlinear phase error compensation[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2014, 29(4): 407-416.
- 王春莉, 雷振坤. 非线性相位误差补偿的反相条纹投影法[J]. *实验力学*, 2014, 29(4): 407-416.
- 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 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.
- 13 Zhang S, Yau S T. Generic nonsinusoidal phase error correction for 3D shape measurement using a digital video projector [C]. *SPIE*, 2006, 6292: 62920R.
- 14 Liu K, Wang Y C, Lau D L, *et al.* Gamma model and its analysis for phase measuring profilometry[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2010, 27(3): 553-562.
- 15 Pan B, Kemaq 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.
- 16 Huang P S, Hu Q J, Chiang F P. Double three-step phase-shifting algorithm[J]. *Applied Optics*, 2002, 41(22): 4503-4509.
- 17 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.
- 18 Wu Yonghui. Research on phase of 3D measurement using phase-shifting structured light [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012.
- 吴勇辉. 结构光三维测量中相位相关技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
- 19 Cui Haihua. Key technologies research and application of micro digital dental 3D scanning system [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012.
- 崔海华. 微小型数字化口腔测量关键技术研究及应用[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.