

一种提升反向条纹测量精度的方法

肖朝 陈锋* 钟敏

成都信息工程大学光电技术学院, 四川 成都 610225

摘要 为了提升反向条纹测量系统的精度,提出了利用三频时间相位补偿算法来改善投影机-相机测量系统非线性误差的测量方法。在测试物体上投影两套具有特定相位偏移的结构光条纹,基于三频时间相位展开方法获得展开相位。具有特定相位偏移的两套条纹测量得到的系统非线性相位误差具有大小相等、符号相反的特性,因此可以通过简单的算术计算来消除或减弱系统的非线性影响,从而提升测量精度。设计了模拟仿真和实物对比实验对所提方法进行验证,实验得到的相位标准差分别为 6.6122×10^{-4} rad 和 0.0087 rad。实验结果表明,所提方法使反向条纹测量的精度有了大幅改进,验证了该方法的有效性。

关键词 测量; 反向条纹投影; 非线性相位误差补偿; 三频时间相位展开

中图分类号 O438 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP53.111204

Method for Improving Measurement Accuracy of Inverse Fringe

Xiao Chao Chen Feng Zhong Min

College of Optoelectronic Technology, Chengdu University of Information Technology, Chengdu, Sichuan 610225, China

Abstract In order to improve the measurement accuracy of inverse fringe, the measurement method based on the three frequencies temporal phase compensation algorithm is proposed to alleviate the nonlinear error of projector-camera measurement system. Two sets of structured light fringes with specific phase offset are projected onto the testing object, and three frequencies temporal phase unwrapping method is used to obtain the unwrapped phase. The system nonlinear phase errors measured by the two sets of fringes with specific phase offset have the characteristics of the same absolute value and opposite sign. So the effect of the system nonlinear error can be eliminated or alleviated by the simple arithmetic calculation, and the measurement accuracy can be improved. The analog simulation and real object contrast experiments are designed to verify the proposed method. Phase standard deviations in the experiments are 6.6122×10^{-4} rad and 0.0087 rad, respectively. The experiments results show that the proposed method has a great improvement in inverse fringe measurement accuracy, and the validity of proposed method is verified.

Key words measurement; inverse fringe projection; nonlinear phase error compensation; three frequencies temporal phase unwrapping

OCIS codes 120.6650; 120.2650; 120.5050; 100.5088

1 引言

反向条纹投影技术^[1-6]是一种典型的条纹投影测量轮廓术(FPP),需要用投影机投射结构光条纹并用相机拍摄物体表面的变形条纹。反向条纹投影技术除了具有传统条纹投影技术的非接触、高精度、高速度等优势外,还具有对微小形变异常敏感的特性,被广泛应用于工业生产流水线的产品检测、多投影机拼接校正^[7-8]

收稿日期: 2016-06-17; 收到修改稿日期: 2016-07-15; 网络出版日期: 2016-10-25

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项(2013YQ49087905)、成都信息工程大学科研基金(KYTZ201516)、大学生创新创业训练计划资金(CX2015033,201610621056)

作者简介: 肖朝(1982—),男,博士,讲师,主要从事信息光学和三维数字图像处理方面的研究。

E-mail: xiaochao@cuit.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: robinchan@cuit.edu.cn

等领域中。

为了实现更好的视觉显示效果,常见的商用投影机以及相机系统对输入输出做了非线性映射变换,这种非线性特性不可避免地会导致拍摄到的结构光条纹正弦性产生畸变而引起相位计算误差。这种误差对于通常的3步或4步相移的FPP系统来说,是一种主要的误差源^[9]。为了消除或减弱这种非线性误差,许多学者做了大量研究并取得了一系列成果^[10-13],其中的典型算法是测量系统的非线性响应曲线(Gamma曲线),然后计算出其逆曲线,通过亮度查找表(LUT)的方式将输入亮度根据逆曲线进行非线性映射,映射后的图像再通过投影测量系统后即可消除系统的非线性效应影响^[14-15]。

已有的反向条纹投影技术在进行相位计算时均未考虑测量系统的非线性效应对测量结果的影响。为了进一步提升反向条纹测量方法的精度,本文提出一种基于三频时间相位补偿的反向条纹测量方法。传统的反向条纹投影测量方法需要投影一套水平和垂直方向的条纹进行测量,所提方法需要额外再投影一套水平和垂直方向的条纹,其中第二套条纹与第一套条纹具有特定的相位差。在进行投影测量时,由第一套条纹计算得到的系统非线性误差与第二套条纹计算得到的误差大小相等、符号相反,因此通过简单的运算即可减弱投影机-相机测量系统的非线性测量误差。由于在实际测量时反向条纹不需要实时生成,相位补偿以及反向条纹的生成均在测量前完成,因此额外增加的测量条纹并不影响该方法的实用性。此外,相比于常见的基于LUT的非线性校正方法,所提方法无需针对每套不同的测量系统都要进行非线性响应曲线的测量,避免繁琐测量过程的同时具有更好的普适性。实验结果表明,所提方法能够提升反向条纹的生成精度。

2 基本原理

2.1 反向条纹投影技术

传统的结构光条纹投影技术是投射标准条纹到待测物体上,然后用相机拍摄被物体表面调制后的变形条纹,进行相位展开后根据相位-高度对应关系即可恢复出三维物体的面形。反向条纹投影技术则是首先根据变形条纹计算出反向条纹,并将反向条纹投射到物体上,如果反向条纹计算准确则会在物体表面上得到无形变的期望条纹(通常为直条纹),否则在有缺陷的位置上条纹会产生扭曲变形。因此该方法能够直观且高效地检测出物体上的微小形变。

在利用反向条纹投影技术进行测量时,为了在二维相位图中精确定位,通常需要垂直和水平两套结构光条纹。为了得到条纹图上每个像素点的相位值,需要使用相移技术生成具有固定相位差的一组标准条纹。将生成的标准相移条纹图依次投射到物体上,可得到被物体表面调制后的变形条纹图。结构光变形条纹光强为

$$\begin{cases} I_v(x, y) = \frac{M}{2} \left\{ 1 + \cos \left[\frac{2\pi x}{p} + \frac{2\pi i}{N} + \varphi(x, y) \right] \right\} \\ I_h(x, y) = \frac{M}{2} \left\{ 1 + \cos \left[\frac{2\pi y}{p} + \frac{2\pi i}{N} + \varphi(x, y) \right] \right\} \end{cases}, i = 0, 1, \dots, N-1, \quad (1)$$

式中 $I_v(x, y)$ 和 $I_h(x, y)$ 分别表示垂直和水平方向的结构光变形条纹光强, M 是最大灰度值, p 为条纹的周期, N 是最大相移次数, $\varphi(x, y)$ 为测量物体的真实相位。为了后续讨论的便捷性,测量条纹强度可进一步简化如下:

$$I_i = \sigma_0 + \sigma_1 \cos(\varphi + \delta_i), i = 0, 1, \dots, N-1, \quad (2)$$

式中 $\delta_i = 2\pi i/N$ 。 σ_0 可视为背景光强, σ_1 为条纹调制度。从变形条纹图中可以计算出相位取值在 $(-\pi, \pi)$ 区间内的截断相位,可进一步利用相位展开算法^[16-18]将截断相位展开成连续相位分布。

2.2 三频时间相位展开方法

为了提升测量的稳定性并兼顾效率,使用文献^[16]中提出的三频时间相位展开方法求解相位。三频展开法仅需三套条纹频率不同的条纹 $t = 1, \sqrt{s}, s$ (s 为最大投影条纹数量)做时间相位展开,大幅缩短了测量时间,能够保证较高相位展开精度的同时具有较高的效率。以每组条纹进行4次相移为例,利用以下公式进行相位展开:

$$\varphi_{u(i+1)} = \varphi_{w(i+1)} + \text{INT} \left[\frac{\varphi_{u(i)} \times (f_{i+1}/f_i) - \varphi_{w(i+1)}}{2\pi} \right] \times 2\pi, i = 1, 2, \quad (3)$$

式中 i 表示条纹的套数, $\text{INT}[\cdot]$ 表示四舍五入取整, $\varphi_{u(\cdot)}$ 为展开后的连续相位, $\varphi_{w(\cdot)}$ 为展开前的截断相位, f_i 和 f_{i+1} 是条纹频率。由于条纹频率为 1 的截断相位相当于已经展开的相位, 因此起始展开相位值 $\varphi_{u(1)} = \varphi_{w(1)}$ 。在整个相位展开过程中, 只需要做两次计算即可。其展开过程如图 1 所示。图 1 中, $\varphi_{w(1)}$ 、 $\varphi_{w(\sqrt{s})}$ 、 $\varphi_{w(s)}$ 分别为三套不同频率条纹的截断相位, 根据 (3) 式可计算得到最终的相位展开结果 $\varphi_{u(s)}$ 。

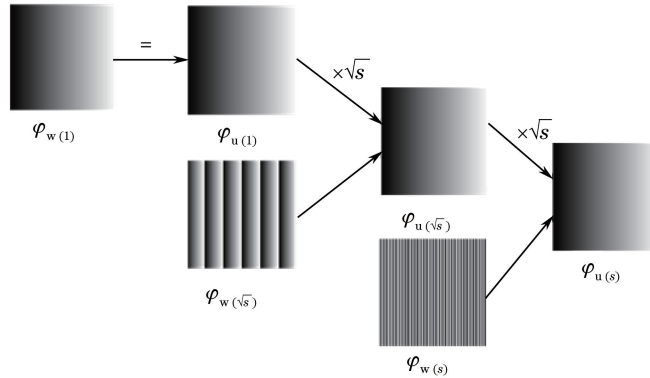


图 1 三频法时间相位展开原理

Fig. 1 Principle of three frequencies temporal phase unwrapping

2.3 非线性相位误差补偿方法

在基于投影机-相机的条纹投影测量系统中, 投影机和相机的非线性特性会导致拍摄的正弦性变差, 从而影响测量结果的精度。使用一种新的相位补偿机制来减小测量系统的非线性。针对常见的 4 步相移测量轮廓术, 该方法需要投影两套初始相位差相差 $\pi/4$ 的正弦条纹, 由于第二套条纹测量得到的系统非线性误差与第一套条纹的测量误差符号相反, 因此通过简单的算术计算就可以补偿该误差。以下以 4 步相移 ($N=4$) 为例给出相位补偿算法的推导:

$$\begin{cases} I_n(x, y) = \sigma_0 + \sigma_1 \cos(\varphi + 2\pi i/N) \\ J_n(x, y) = \sigma_0 + \sigma_1 \cos(\varphi + 2\pi i/N + \pi/4) \end{cases}, i = 0, 1, 2, 3, \quad (4)$$

式中 $J_n(x, y)$ 相对于 $I_n(x, y)$ 有 $\pi/4$ 的相移。考虑投影机和相机的非线性响应, 光场输出 $f(x)$ 与输入 x 之间存在如下关系:

$$f(x) = \epsilon_0 + \epsilon_1 x + \epsilon_2 x^2 + \epsilon_3 x^3, \quad (5)$$

式中 ϵ_0 和 ϵ_1 是系统的线性响应系数, ϵ_2 和 ϵ_3 则为非线性系数。将代表结构光条纹的 (2) 式代入 (5) 式中, 简化后可得:

$$I'_i = \sigma_0 + \sigma_1 \cos(\varphi + \delta_i) + \sigma_2 \cos 2(\varphi + \delta_i) + \sigma_3 \cos 3(\varphi + \delta_i), \quad (6)$$

式中 I'_i 是包含非线性误差影响的第 i 帧相移图像的强度, 也就是实际测量结果, σ_0 、 σ_1 、 σ_2 和 σ_3 均为常数, 且 σ_2 和 σ_3 为非线性残差系数。则实际测量物体的相位可以表示为

$$\begin{cases} \varphi' = f\left(\arctan \frac{I'_3 - I'_1}{I'_0 - I'_2}\right) = f\left(\frac{\sigma_1 \sin \varphi - \sigma_3 \sin 3\varphi}{\sigma_1 \cos \varphi + \sigma_3 \cos 3\varphi}\right) \\ \sigma_1 = \frac{M}{2} \epsilon_1 + 2\epsilon_2 \left(\frac{M}{2}\right)^2 + \frac{15\epsilon_3}{4} \left(\frac{M}{2}\right)^3, \sigma_3 = \frac{\epsilon_3}{4} \left(\frac{M}{2}\right)^3 \end{cases}, \quad (7)$$

式中 $f(\cdot)$ 表示相位展开, φ 为真实相位。由非线性引起的相位误差可表示为

$$\Delta\varphi = \varphi' - \varphi, \quad (8)$$

即相位误差等于测量得到的相位减去真实相位, 进一步地, 有

$$\tan \Delta\varphi = \frac{\tan \varphi' - \tan \varphi}{1 + \tan \varphi' \tan \varphi} = -\frac{\sigma_3 \sin 4\varphi}{\sigma_1 + \sigma_3 \cos 4\varphi} = -\frac{\sin 4\varphi}{\sigma_1/\sigma_3 + \cos 4\varphi}, \quad (9)$$

由于 $\sigma_1/\sigma_3 \gg 1$, (9) 式可简化为

$$\Delta\varphi = -f \left[\arctan \left(\frac{\sin 4\varphi}{\sigma_1/\sigma_3} \right) \right], \quad (10)$$

当使用(4)式中的 $J_n(x, y)$ 进行测量时, 将经过 $\pi/4$ 相移后的第二套条纹代入(5)式中, 考虑 $\sigma_1/\sigma_3 \gg 1$ 的情况下, 可计算出第二套条纹的非线性测量误差为

$$\Delta\varphi' = \varphi'' - \varphi - \frac{\pi}{4} = -f \left\{ \arctan \left[\frac{\sin 4(\varphi + \pi/4)}{\sigma_1/\sigma_3} \right] \right\} = f \left[\arctan \left(\frac{\sin 4\varphi}{\sigma_1/\sigma_3} \right) \right], \quad (11)$$

可见, 经过 $\pi/4$ 相移后的第二套条纹测量出的系统误差与第一套条纹测量出的系统误差大小相等, 符号相反, 即有:

$$\Delta\varphi = -\Delta\varphi', \quad (12)$$

联立(8)、(11)、(12)式, 可得测量系统的真实相位 φ 与两次测量结果 φ' 和 φ'' 有以下的关系:

$$\varphi = (\varphi' + \varphi'' - \pi/4)/2, \quad (13)$$

利用(13)式可将两次测量获得的具有非线性误差的相位 (φ' 和 φ'') 通过简单的运算进行补偿, 获得更加接近于无误差的真实相位值 φ 。系统非线性测量误差 φ_e 的计算方法为

$$\varphi_e = (\varphi'' - \varphi' - \pi/4)/2, \quad (14)$$

将相位补偿算法与三频时间相位展开算法相结合, 可得到图 2 所示的算法流程。

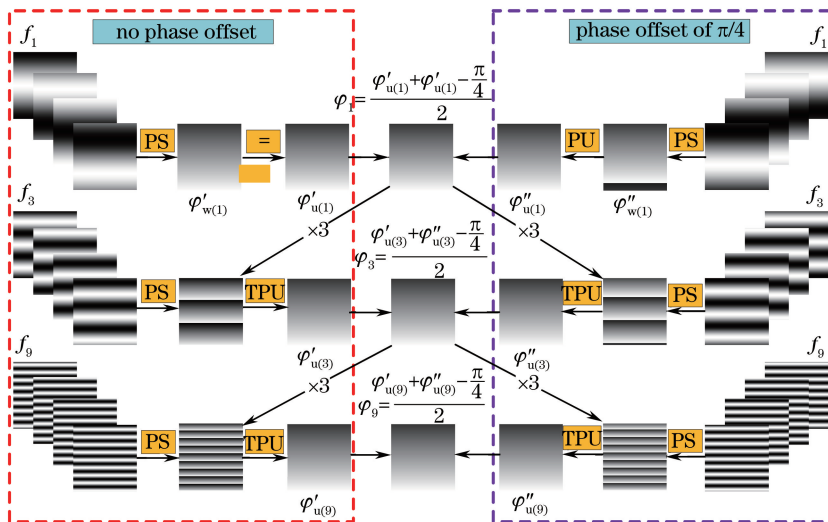


图 2 基于三频时间相位展开的相位补偿方法

Fig. 2 Phase compensation method based on three frequencies temporal phase unwrapping

在图 2 中, 以水平方向的结构光条纹为例, 给出了条纹频率为 1、3、9 的基于 4 步相移的相位补偿计算方法示意图。其中 PS 表示相移, PU 表示相位展开, TPU 表示三频时间相位展开。图 2 左侧红色区域内为未经过相位补偿的展开过程, 右侧紫色区域内为补偿 $\pi/4$ 后的相位展开过程, 中间则为根据(13)式计算得到的相位补偿后的结果。

2.4 基于相位补偿的反向条纹投影测量方法

图 3 为所提方法的实现原理流程图。为了显示的简洁性, 图 3 中只画出了每组 4 步相移条纹图中的第 1 幅。在垂直和水平两个方向上根据三频时间相位测量原理分别生成一系列条纹周期频率不同的标准结构光条纹, 并且对应生成相位差为 $\pi/4$ 的另外一组条纹图, 这样就一共生成了 48 幅正弦条纹图。然后将这些条纹依次投射到待测物体上, 用相机拍摄由于被物体表面调制而生成的变形条纹图。将垂直和水平方向的标准条纹和变形条纹基于时间相位展开算法展开后, 利用相位补偿原理可得到在两个方向上连续分布的相位, 利用展开后的标准相位和变形相位, 根据反向条纹生成方法^[19]即可生成两个方向上的反向条纹。

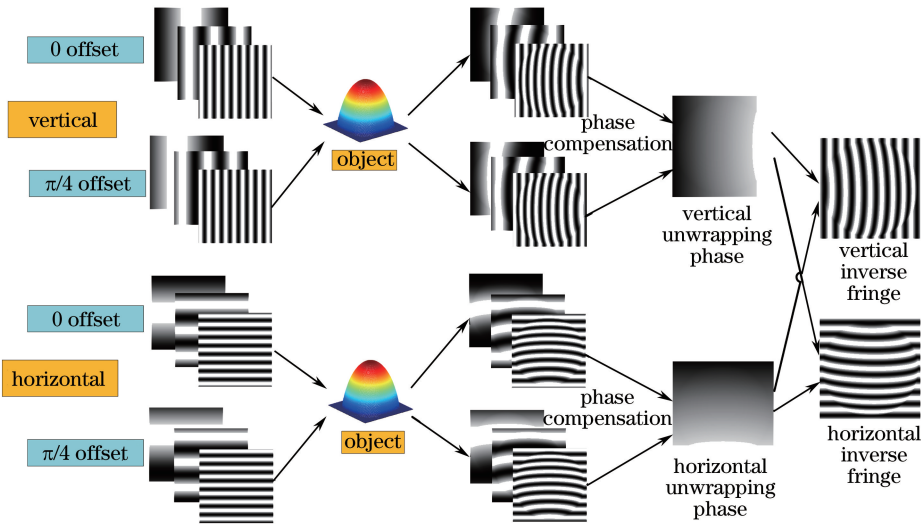


图 3 基于相位补偿的反向条纹投影测量方法原理

Fig. 3 Principle of inverse fringe projection measurement method based on phase compensation

3 实验与结果讨论

3.1 计算机模拟实验

实验平台为 Windows 7 64 位操作系统, CPU 为 Core i5 4570, 主频 3.2 GHz, 内存 4 GB, 在 Matlab 2014a 环境下编程实现。测试物体为 Matlab 内置的山峰。采用斜投影正拍摄的方式, 投影机和拍摄相机的分辨率均为 $256 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$, 投影的两套条纹在垂直和水平方向上分别投影三组条纹频率为 1、7、49 的结构光条纹, 每组条纹均基于 4 步相移技术生成, 第二套条纹相比第一套具有 $\pi/4$ 的固定相位偏移。为了模拟投影机-相机测量系统的非线性特性, 使用常见的指数模型来近似估计该变换:

$$z(x, y) = [I_i(x, y)]^\gamma, i = 0, 1, 2, 3. \quad (15)$$

参考已有的经验, 在实验中取 $\gamma = 2.3$ 来模拟投影机-相机测量系统的非线性效应。图 4~6 给出了仿真实验结果。图 4(a) 是待测物体山峰, 图 4(b) 和 (c) 分别是条纹频率为 1 和 7 时根据 (14) 式计算得到的非线性相位误差, 图中均为第 100 行的数据。从图中可以看出, 非线性误差的频率大约为投影条纹频率的 4 倍。

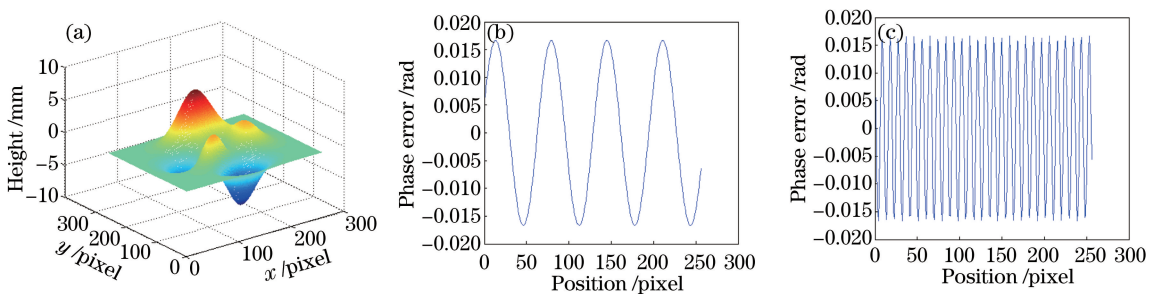


图 4 (a) 模拟物体; (b)、(c) 条纹频率为 1 和 7 时的非线性相位误差分布

Fig. 4 (a) Simulated object; (b), (c) nonlinear phase error distributions with fringe frequencies of 1 and 7

图 5(a) 是一幅频率为 1 的垂直变形条纹; 图 5(b) 是一幅频率为 7 的垂直变形条纹; 为了直观体现系统的非线性效应的影响, 图 5(c) 为图 5(b) 未使用非线性模型时的效果图。图 5(d) 为一幅频率为 49 的水平变形条纹。图 5(e) 和 (g) 分别是未进行相位补偿时的垂直和水平方向反向条纹; 图 5(f) 和 (h) 为进行相位补偿后的垂直和水平方向反向条纹。

图 6(a) 和 (c) 分别是未进行相位补偿时的垂直和水平方向上的标准相位差三维分布图; 图 6(b) 和 (d) 分别为进行相位补偿后的垂直和水平方向上的标准相位差三维分布图。该标准相位差是利用投影反向条纹后得到的直条纹的相位与未施加非线性响应的标准相位进行计算的结果。进行相位补偿前, 垂直和水平方向

的相位标准差分别为 0.0122 rad 和 0.0124 rad ; 相位补偿后, 垂直和水平方向的相位标准差分别为 $6.6122 \times 10^{-4} \text{ rad}$ 和 $6.5195 \times 10^{-4} \text{ rad}$ 。可见, 进行相位补偿后, 测量精度有了大幅提高。

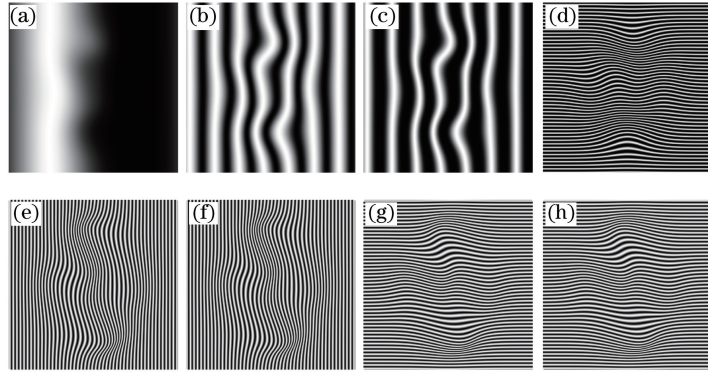


图 5 (a) 频率为 1 的垂直变形条纹; (b)、(c) 使用(15)式前后的频率为 7 的垂直变形条纹; (d) 频率为 49 的水平变形条纹; (e)、(f) 相位补偿前后的垂直反向条纹; (g)、(h) 相位补偿前后的水平反向条纹

Fig. 5 (a) Vertical deformed fringe with frequency of 1; (b), (c) vertical deformed fringes with frequency of 7 without and with using equation (15); (d) horizontal deformed fringe with frequency of 49; (e), (f) vertical inverse fringes before and after phase compensation; (g), (h) horizontal inverse fringes before and after phase compensation

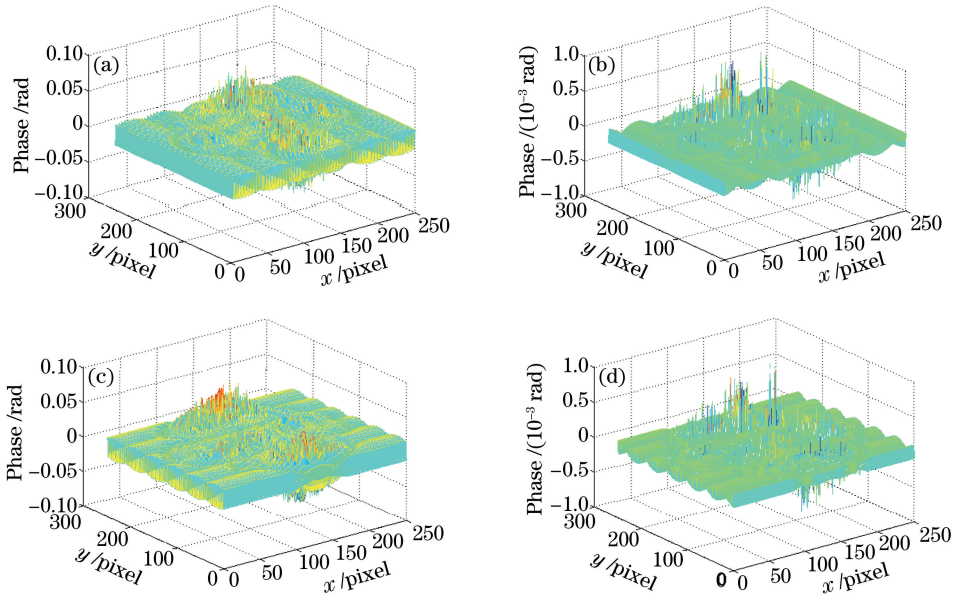


图 6 条纹相位标准差。(a)、(b) 相位补偿前后的垂直条纹相位标准差; (c)、(d) 相位补偿前后的水平条纹相位标准差

Fig. 6 Standard deviation of fringe phase. (a), (b) Standard deviations of vertical fringe phase before and after phase compensation; (c), (d) standard deviations of horizontal fringe phase before and after phase compensation

3.2 实物仿真实验

实验平台为 Windows 7 64 位操作系统, CPU 为 Core i5 4570, 主频 3.2 GHz, 内存 4 GB, 在 Matlab 2014a 环境下编程实现。测试物体为一个人脸面具和一个喜羊羊面具, 如图 7(a) 所示。采用斜投影正拍摄的方式, 投影机和拍摄相机的分辨率均为 $1280 \text{ pixel} \times 960 \text{ pixel}$, 垂直和水平方向上分别投影三组频率分别为 1、8、64 的结构光条纹, 每组条纹均为基于 4 步相移技术生成, 图 7 为实验拍摄的待测物体和部分变形条纹。图 7(b) 为一幅条纹频率为 8 的垂直变形条纹, 图 7(c) 为一幅频率为 64 的水平变形条纹。

图 8(a) 和 (b) 分别是未经过相位补偿和进行相位补偿后生成的垂直方向反向条纹图。图 8(c) 为经过相位补偿后生成的水平方向反向条纹图。

为了验证相位补偿方法的有效性, 从图 8(a) 和 (b) 生成的反向条纹图中选取纵坐标为 400、横坐标为 200~500 的一段区域(在图 8 中已用红色线标出)进行条纹强度分析, 图 9(a) 为未进行相位补偿的结果, 可

以看到条纹的正弦性较差;图 9(b)为进行相位补偿后的结果,条纹的正弦性得到了很大的改善。

图 10 为投影反向条纹后拍摄得到的直条纹,图 10(a)~(c)分别是投影图 8(a)~(c)后的效果。可以看到,虽然测量物体存在孔洞(眼睛位置),但经过三频时间相位展开后能得到正确的相位结果。

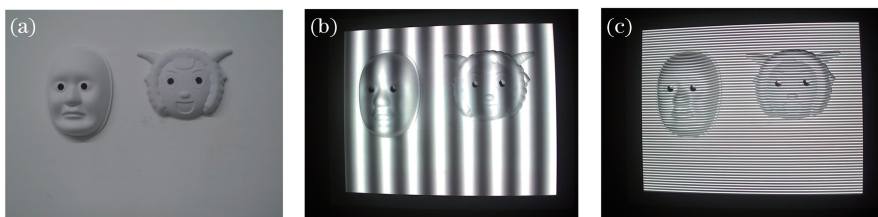


图 7 (a)测试物体;(b)频率为 8 的垂直变形条纹;(c)频率为 64 的水平变形条纹
Fig. 7 (a) Testing object; (b) vertical deformed fringe with frequency of 8;
(c) horizontal deformed fringe with frequency of 64

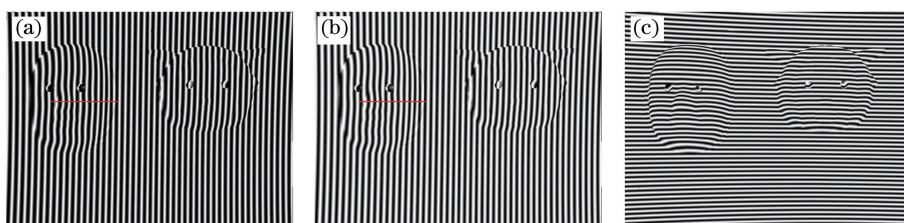


图 8 (a)、(b)相位补偿前后的垂直反向条纹图;(c)相位补偿后的水平反向条纹图
Fig. 8 (a), (b) Vertical inverse fringes before and after phase compensation; (c) horizontal inverse fringe after phase compensation

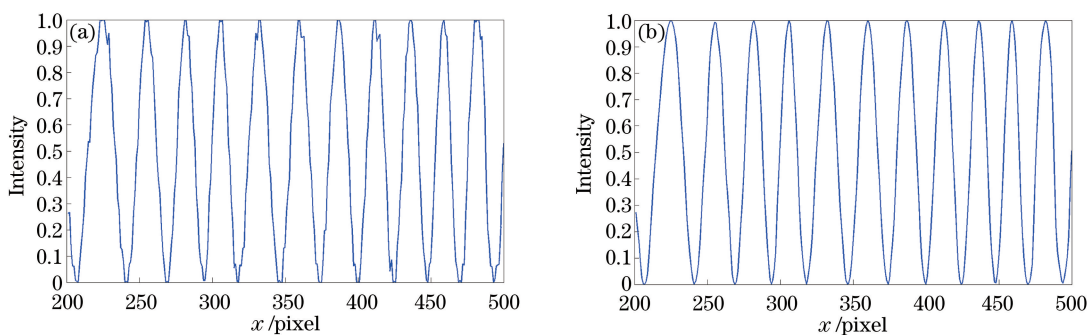


图 9 (a)、(b)图 8(a)、(b)中红色线段对应的条纹强度剖面图
Fig. 9 (a), (b) Fringe intensity sectional views corresponding to the red line in Fig. 8 (a) and (b)

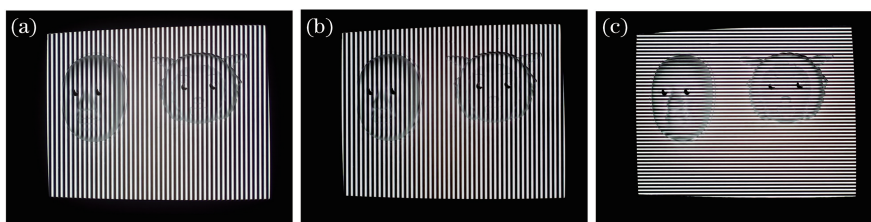


图 10 投影反向条纹后得到的直条纹。(a)、(b)、(c)分别为投影图 8(a)、(b)、(c)后得到的效果
Fig. 10 Straight fringe after projecting the inverse fringe. (a), (b) and (c) are the straight fringe after projecting Fig. 8 (a), (b) and (c), respectively

图 11(a)和(b)分别是相位补偿前和补偿后垂直方向的标准相位差三维分布图。相位补偿前后的相位标准差分别为 0.0146 rad 和 0.0087 rad,测量精度有了一定的提升。

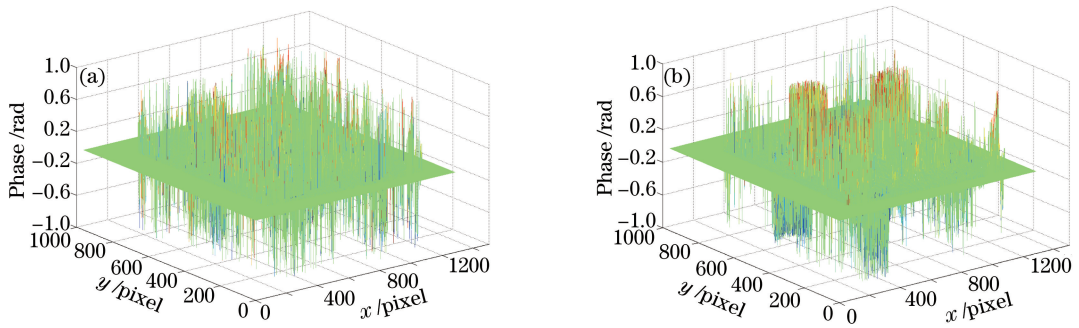


图 11 垂直方向的标准相位差分布图。(a)相位补偿前;(b)相位补偿后

Fig. 11 Standard phase deviation distribution of vertical direction. (a) Before phase compensation; (b) after phase compensation

4 结 论

提出了一种基于三频时间相位展开和相位补偿的反向条纹投影测量方法。该方法补偿了由于测量系统的非线性特性导致的相位误差,同时时间相位展开算法的应用将反向条纹投影技术的测量范围拓展到非连续物体。由于反向条纹的工作可以在测量前完成,因此该方法并不影响在线测量的实时性。实物测量对比实验结果表明,所提方法能够有效地降低由于测量系统的非线性引起的相位误差,并且能够对不连续物体进行测量。

参 考 文 献

- Schönenleber M, Tiziani H J. Fast and flexible shape control with adaptive LCD fringe masks[C]. SPIE, 1997, 3098: 35-42.
- Bothe T, Li W S, von Christoph K, *et al.* Object-adapted inverse pattern projection: generation, evaluation, and applications[C]. SPIE, 2003, 4933: 291-296.
- Li W S, Bothe T, Osten W, *et al.* Object adapted pattern projection-Partn I : generation of inverse patterns[J]. Optics & Lasers in Engineering, 2004, 41(1): 31-50.
- Cai Y Y, Su X Y. Inverse projected-fringe technique based on multi projectors[J]. Optics & Lasers in Engineering, 2007, 45(10): 1028-1034.
- Cai Yuanyuan, Su Xianyu, Li Yong, *et al.* Inverse fringe projection technique based on the coordinate transformation using cubic interpolation[J]. Opto-Electronic Engineering, 2006, 33(5): 85-90.
蔡元元, 苏显渝, 李 勇, 等. 基于三次插值坐标变换的反向条纹投影技术[J]. 光电工程, 2006, 33(5): 85-90.
- Xiao Chao, Su Xianyu, Jing Hailong. A new method for generation of inverse projected fringe[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(11): 2120-2124.
肖 朝, 苏显渝, 荆海龙. 一种新的反向投影条纹生成方法研究[J]. 光学学报, 2008, 28(11): 2120-2124.
- Cai Yuanyuan, Su Xianyu. Inverse fringe projection technique using multi-projectors simultaneously[J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26(11): 1641-1646.
蔡元元, 苏显渝. 采用多投影器的反向条纹投影技术[J]. 光学学报, 2006, 26(11): 1641-1646.
- Xiao Chao, Yang Hongyu, Liang Haijun, *et al.* Geometric calibration for multi-projector display system based on structured light[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2013, 25(6): 802-808.
肖 朝, 杨红雨, 梁海军, 等. 多投影显示系统结构光几何校正算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2013, 25(6): 802-808.
- Pan Bing, Qian Kema, Huang Lei, *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.
- Lei Zhenkun, Wang Chunli, Zhou Canlin. Multi-frequency inverse-phase fringe projection profilometry for nonlinear phase error compensation[J]. Optics & Lasers in Engineering, 2015, 66: 249-257.
- Liu Kai, Wang Yongchang, 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.
- 12 Zhou Ping, Liu Xinran, He Yi, *et al.* Phase error analysis and compensation considering ambient light for phase measuring profilometry[J]. Optics & Lasers in Engineering, 2014, 55(7): 99-104.
- 13 Tian Zixia, Chen Wenjing, Su Xianyu. Method for improving accuracy and measurement speed of PMP using error diffusion binary encoded sinusoidal grating[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(12): 121201.
田紫霞, 陈文静, 苏显渝. 采用二元编码的正弦光栅提高 PMP 测量速度和精度的方法[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(12): 121201.
- 14 Cui Yanjun, Zhang Wenfeng, Li Jianxin, *et al.* A method of Gamma correction in fringe projection measurement[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(1): 0112002.
崔艳军, 张文峰, 李建欣, 等. 条纹投影三维测量的 Gamma 畸变校正方法[J]. 光学学报, 2015, 35(1): 0112002.
- 15 Guo Hongwei, He Haitao, Chen Mingyi. Gamma correction for digital fringe projection profilometry[J]. Applied Optics, 2004, 43(14): 2906-2914.
- 16 Xu Zhenhua, Su Xianyu. An algorithm of temporal phase unwrapping[J]. Journal of Sichuan University (Natural Science Edition), 2008, 45(3): 537-540.
徐珍华, 苏显渝. 一种时间相位展开算法[J]. 四川大学学报(自然科学版), 2008, 45(3): 537-540.
- 17 Ma Xiao, Zhang Zibang, Zhong Jin'gang. Improved three-step spatial quasi-phase-shifting technique for single-frame fringe analysis[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(9): 091203.
马 骁, 张子邦, 钟金钢. 改进的三步空域准相移单帧条纹位相解调技术[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(9): 091203.
- 18 Zhao Wenjing, Chen Wenjing, Su Xianyu. The comparison of several time phase unwrapping methods[J]. Journal of Sichuan University (Natural Science Edition), 2016, 53(1): 110-117.
赵文静, 陈文静, 苏显渝. 几种时间相位展开方法的比较[J]. 四川大学学报(自然科学版), 2016, 53(1): 110-117.
- 19 Xiao Chao, Chen Feng, Zhong Min, *et al.* Generating method of inverse fringes based on Delaunay triangulation[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(7): 0712001.
肖 朝, 陈 锋, 钟 敏, 等. 基于 Delaunay 三角剖分的反向条纹生成方法[J]. 光学学报, 2016, 36(7): 0712001.