

提高多频条纹投影相位提取精度的反向误差补偿法

毛翠丽^{1,2}, 卢荣胜¹

¹合肥工业大学仪器科学与光电工程学院, 安徽 合肥 230009;

²南阳理工学院机械与汽车工程学院, 河南 南阳 473004

摘要 为了减小光栅投影三维测量系统中数字投影仪的非线性响应引起的相位误差, 提出了一种提高物体相位测量精度和速度的多频条纹反向相位误差补偿方法。该方法通过投影与最高频率相同且具有特定相移量的补偿移条纹图, 获取相位误差大小相等, 符号相反的两幅主值相位图, 二者运算后误差得以抵消, 与多频法相结合从而得到精确的绝对相位值。采用标准平面对提出的方法进行实验验证, 并与最近提出的希尔伯特变换补偿方法以及典型相位补偿方法进行比较。实验结果表明, 所提方法能有效提高相位测量的精度和速度。通过对自由曲面以及表面不连续物体进行相位误差补偿, 进一步验证了该方法的可行性和有效性。

关键词 测量; 相移条纹轮廓术; 非线性相位误差; 反向误差补偿法; 多频法

中图分类号 TP391.4

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0412005

Inverse Error Compensation Method for Improvement of Phase Recovery Accuracy of Multi-Frequency Fringe Projection

Mao Cuili^{1,2}, Lu Rongsheng¹

¹ School of Instrument Science and Opto-Electronics Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China;

² School of Mechanical & Automotive Engineering, Nanyang Institute of Technology, Nanyang, Henan 473004, China

Abstract In order to reduce the phase error caused by the nonlinear response of digital projectors in three-dimensional measurement system of grating projection, a multi-frequency fringe inverse-phase error compensation method is proposed for improving the accuracy and speed of the object phase measurement. By projecting the compensated phase-shifted fringe pattern with the same maximum phase frequency and the same phase shift, the two phased phase diagrams with the same phase error and opposite signs are obtained. After the operation, their errors are canceled and compared with the multi-frequency method to get the exact absolute phase value. A standard plane is used for verifying the proposed method, the comparisons are done with recently proposed Hilbert transform compensation method and classical phase compensation method. The experiments results show that the proposed method can improve the accuracy and speed of phase measurement effectively. The feasibility and validity of the proposed method is verified by phase error compensation for a free form surface and object of discontinuous surface.

Key words measurement; phase shifting profilometry; nonlinear phase error; inverse-error compensation; multi-frequency method

OCIS codes 120.6650; 050.5080; 100.2650; 100.5070

1 引 言

随着精密测量技术的发展, 非接触式结构光投

影三维形貌测量方法在工业检测、反求工程、文物重建、医学检测等领域得到了广泛的应用, 其中条纹投影相位测量技术以其非接触、低成本、高效率、灵活

收稿日期: 2017-08-11; 收到修改稿日期: 2017-09-14

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项(2013YQ220749)

作者简介: 毛翠丽(1980—), 女, 博士研究生, 讲师, 主要从事光电检测和三维测量方面的研究。E-mail: tmpcl@126.com

导师简介: 卢荣胜(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事机器视觉和精密测量等方面的研究。

E-mail: rslu@hfut.edu.cn(通信联系人)

方便等优点越来越受到人们的关注^[1-2]。相位测量的基本原理是利用计算机生成结构光图案或用特殊的光学装置产生结构光,经过光学投影系统投射至被测物体表面,然后采用图像获取设备[电荷耦合器件(CCD)或互补金属氧化物半导体(CMOS)相机]采集被物体表面调制后的变形结构光图像,计算得到包裹相位图(主值相位图),再进行相位解包裹运算,解调得到反映物体表面变化的绝对相位图,最后通过系统结构模型及其标定技术,得出绝对相位、图像坐标与三维坐标的关系,计算得到被测物体的三维形貌信息^[3-6]。

条纹投影相位测量技术投射的结构光有多种形式,其中正弦光栅条纹以其独特的优势而成为使用频率最高的结构光。随着数字投影仪的迅速发展,利用数字投影仪在计算机控制下投射条纹,已成为最广泛使用的投影方式。该方法是利用计算机产生精确的数字光栅相移条纹图像,经过数字投影设备投影到被测物体表面。数字投影仪的非线性响应导致相位测量误差,严重影响了三维测量精度,因此得到国内外学者的广泛关注与研究,从而产生了各种各样的相位误差补偿方法^[7-22],主要可以归纳为三大类:被动相位误差补偿法、主动相位误差补偿法和反向补偿法。

被动相位误差补偿方法首先通过不同的标定方法在灰度值域或者相位值域求得相位误差分布规律,如单个或多个伽马系数、相位误差多项式、相位误差查找表等^[7-11],然后对相机采集得到的变形条纹图进行相位误差补偿。被动相位误差测量方法提出早,使用广,例如 Zhang 等^[8]提出的全场相位误差计算方法,根据实验标定结果可分别得到每一个子区域对应的相位误差曲线,建立一个全场误差查找表。被动相位误差补偿方法在针对不变的测量环境(如环境光照明、被测物体表面反射率等稳定不变)、测量系统参数稳定(投影仪、相机的主要参数不随使用时间的变化而变化)的情况下具有较好的效果。但是当环境光照、仪器参数、被测物体表面反射率等变化时,需要重新标定。同时测量精度和速度与误差补偿算法的复杂程度有关。对于全场误差补偿,需要标定出每一像素点的相位误差,精度较高,但标定过程复杂、耗时,如果采用全局或局部区域平均灰度相位误差标定方法,虽然可以提高误差标定和补偿速度,但是会降低精度。

主动相位误差补偿方法是根据标定出的系统伽马值或误差分布规律,对投影之前的条纹进行重新

编码,使该新编码条纹由投影仪投影,经相机采集后可以得到高精度的正弦条纹图^[12-16]。例如 Zheng 等^[12]使用两步法,得到系统在对应 γ 处某一行的相位误差平均值 φ_{error} ,利用最小二乘法从而获得系统的最佳预编码伽马值,最后由计算机对相移条纹进行重新编码。主动相位误差补偿方法的相位恢复精度与相位误差标定精度和条纹产生的模型准确性紧密相关。一旦得到比较准确的编码条纹,可采集得到高质量的正弦条纹图像。该方法测量速度快,无需进一步对测量结果进行相位误差补偿。但是其精度仍受系统参数、标定方法和使用环境的影响,当这些因素发生改变时,则需重新标定,并且要得到全场高质量的正弦条纹图比较困难。

反向误差补偿法^[17-22]根据相位误差的分布规律,投影具有与原始条纹相位误差相反的附加条纹,两次测得的相位结果平均后自动消除相位误差的影响。Huang 等^[17]首次提出了反向相位误差补偿方法。多频法和反向补偿法相结合,可以较大地提高相位测量精度,但是需要两倍于原始条纹幅数的投影图案进行相位误差补偿,降低了测量速度^[18-19]。为了提高速度和精度,Cai 等^[20]提出利用希尔伯特变换(HT)对条纹进行处理,获得与原始条纹相位误差大小相等,符号相反的相位值,进行平均后得到较高精度的相位测量值,但是要求被测物体连续无间断。二进制条纹测量速度较快,为了对二进制离焦条纹测量的相位误差进行补偿,Zheng 等^[21]对三步、希尔伯特三步、双三步、五步方法进行理论分析和实验比较,发现双三步方法对离焦条纹相位误差补偿具有比较好的综合特性(测量精度、速度、无效点的探测)。

研究表明大多数商用投影仪非线性误差并不简单遵循单伽马值的响应曲线。Zhang^[22]从灰度值域对其实验室使用的多个投影仪进行相位误差分析,通过比较主动与被动相位误差补偿结果,发现一般情况下主动校正方法比被动校正方法精度高,稳定性好,适用范围广,稳健性强。为了提高测量速度并减小相位非线性测量误差,Su 等^[23-24]提出了二进制条纹离焦测量方法,测量速度和稳定性得到较大提高,但是理想测量范围相对较小,因此出现了提高二进制条纹测量精度和范围的各种方法^[15,25]。

相移条纹为周期性条纹,空间相位展开过程中,各点的展开相位与周围像素点紧密相关,容易形成误差传递,并且得到的是相对相位。为了对孔洞、台阶或者相对分离的不连续物体进行测量,

需要得到无歧义的精确定绝对相位值并避免误差传递,常用多频条纹投影法。为了提高测量精度和速度,通过对相位误差模型进行分析,本文提出了一种非线性相位误差校正算法,该算法在主值相位图内进行反向相位误差补偿,并与倍频法相结合获取绝对相位。

2 相位测量原理、误差模型及补偿算法

相位测量轮廓术首先由计算机产生理想正弦相移条纹图,由数字投影仪投影至物体表面,再由相机采集变形条纹图,其投影正弦条纹的数学表达式可表示为:

$$I_n(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \cos[\varphi(x, y) + \delta_n], \quad (1)$$

式中 (x, y) 为空间坐标, $A(x, y)$ 为背景光强, $B(x, y)$ 为调制幅度, $\delta_n = 2\pi n/N$ 为投影光栅序列第 n 幅光栅的初始相位, $n = 0, 1, \dots, N-1, N$ 为相移步数, $\varphi(x, y)$ 为物体的实际待求相位,可表示为^[7]:

$$\varphi(x, y) = -\arctan \frac{\sum_{n=0}^{N-1} I_n(x, y) \sin \delta_n}{\sum_{n=0}^{N-1} I_n(x, y) \cos \delta_n}. \quad (2)$$

由于系统非线性的影响,相机拍摄得到带 k 次谐波的非正弦光栅相移条纹图,可表示为:

$$I_n^C(x, y) = B_0(x, y) + \sum_{k=1}^{\infty} \{B_k(x, y) \cos[k\varphi_n(x, y)]\}, \quad (3)$$

式中 $\varphi_n(x, y) = \varphi(x, y) - \delta_n$,为了简化,下面均省略 (x, y) 。根据文献[6-7]和三角函数公式 $\tan(\alpha - \beta) = (\tan \alpha - \tan \beta) / (1 + \tan \alpha \tan \beta)$,可以得到 N 步相移法的相位误差为:

$$\Delta\varphi_N = \varphi^C - \varphi = -\arctan \frac{\sum_{n=0}^{N-1} I_n^C \sin \delta_n}{\sum_{n=0}^{N-1} I_n^C \cos \delta_n} - \left(-\arctan \frac{\sum_{n=0}^{N-1} I_n \sin \delta_n}{\sum_{n=0}^{N-1} I_n \cos \delta_n} \right) = \arctan \left\{ \frac{\sum_{m=1}^{\infty} [B_{mN}^{-1} \sin(mN\varphi)]}{B_1 + \sum_{m=1}^{\infty} [B_{mN}^{+1} \cos(mN\varphi)]} \right\}. \quad (4)$$

根据傅里叶变换特征,对于单周期非线性信号,高次谐波的幅值远远小于低频项, $mN \geq 3$,所以上

式的分母近似为 B_1 ,因此可得:

$$\Delta\varphi_N \cong \frac{\sum_{m=1}^{\infty} [B_{mN}^{-1} \sin(mN\varphi)]}{B_1 + \sum_{m=1}^{\infty} [B_{mN}^{+1} \cos(mN\varphi)]} \cong \sum_{m=1}^{\infty} [c_m \sin(mN\varphi)]. \quad (5)$$

由此可以得到,相位误差仅包含各谐波误差,并且随着 m 的增大,其 mN 次谐波系数 c_m 会急剧减小,所以通常只关注低次谐波项。

随着相移步数的增加,相位恢复的精度会提高,但测量速度会下降,通常使用三步、四步、五步相移算法,可得:

$$\begin{cases} \Delta\varphi_3 \cong c_1 \sin(3\varphi) + c_2 \sin(6\varphi) + c_3 \sin(9\varphi) \approx c_1 \sin(3\varphi) \\ \Delta\varphi_4 \cong c_1 \sin(4\varphi) + c_2 \sin(8\varphi) \approx c_1 \sin(4\varphi) \\ \Delta\varphi_5 \cong c_1 \sin(5\varphi) + c_2 \sin(10\varphi) \approx c_1 \sin(5\varphi) \end{cases}, \quad (6)$$

式中 c_1, c_2, c_3 为常数。由此可见,由投影仪的非线性引起的相位误差近似为周期函数,并且其大小与相移步数及理想相位有关。根据误差理论知识,周期性系统误差可以使用半周期法(反向误差补偿法)进行消除,即如果能得到第二次测量结果,使得两次测量结果的误差相差半个周期,则两次所得的误差值大小相等,符号相反,那么取两次读数的平均值即可有效地消除周期性系统误差,达到不同位置处不同大小的误差自动消除的目的。观察相位误差公式,在此取 $N = 3$,由(6)式可知,相位误差周期为 $2\pi/3$,若第二次测量的初始相位为第一次测量相位误差的半个周期,即 $\pi/3$,且同上述分析, $mN \geq 3$,谐波次数以 N 的倍数快速增加,且高次谐波的幅值远远小于低频项,所以通常只关注低频项,则第二次相移条纹测量结果的相位误差为:

$$\Delta\varphi'_3 \cong c_1 \sin[3(\varphi + \pi/3)] + c_2 \sin[6(\varphi + \pi/3)] + c_3 \sin[9(\varphi + \pi/3)] = -c_1 \sin(3\varphi) + c_2 \sin(6\varphi) - c_3 \sin(9\varphi) \approx -c_1 \sin(3\varphi). \quad (7)$$

同理,当 $N = 4, 5$ 时,引入额外的初始相位应分别为 $\pi/4, \pi/5$,则:

$$\Delta\varphi'_4 \cong c_1 \sin[4(\varphi + \pi/4)] + c_2 \sin[8(\varphi + \pi/4)] = c_1 \sin(4\varphi + \pi) + c_2 \sin(8\varphi + 2\pi) = -c_1 \sin(4\varphi) + c_2 \sin(8\varphi) \approx -c_1 \sin(4\varphi), \quad (8)$$

$$\Delta\varphi'_5 \cong c_1 \sin[5(\varphi + \pi/5)] + c_2 \sin[10(\varphi + \pi/5)] \approx c_1 \sin(5\varphi + \pi) + c_2 \sin(10\varphi + 2\pi) = -c_1 \sin(5\varphi) + c_2 \sin(10\varphi) \approx -c_1 \sin(5\varphi). \quad (9)$$

由此可以得到,对于 $N = 3, 4, 5$ 步相移法,如果向被测物体投影两组初始相位差分别为 $\pi/3, \pi/4,$

$\pi/5$ 的相移条纹,则两次相位测量得到的相位误差正好平移半个周期,即误差值大小相等,符号相反,取两次相位测量结果的平均值即可消除低次谐波相移误差,获得较精确的相位测量结果。通过进一步观察(6)~(7)式可知,对于奇数相移步数 $N=3, 5, \dots, (2k+1)$ 的相移法, $(2m-1)N$ 次谐波误差同时被消除。 N 越大,相位误差谐波次数越高,则误差越小,因此提高相移步数可以提高相位测量精度^[26],但同时也较大地增加了投影和测量时间。

3 多频法求取绝对相位的基本原理

由(2)式得到相位主值 $\varphi(x, y)$ 以后,其范围为 $[-\pi, \pi)$,为了得到能够反映物点所在位置的连续相位,必须进行相位解包裹。解包裹算法为:

$$\Phi(x, y) = \varphi(x, y) + 2k(x, y)\pi, \quad (10)$$

式中 $\Phi(x, y)$ 为解包裹相位值, $k(x, y) = 0, 1, 2, \dots$ 为物面上每一点的条纹级数。准确获取 $k(x, y)$, 是相位解包裹成功的关键。

当物体表面有空洞、阶梯状、阴影等不连续区域时,空间相位解包裹算法获得无歧义的绝对相位值比较困难。利用低频光栅条纹投影时,只有不到半个周期的条纹落在物体发生突变的部分,相位才可以被唯一地解调出来。但此时测量精度会降低,物体形貌的细节被掩盖、丢失。当采用满足测量分辨率要求的高频光栅条纹投影时,提高了物体的细节分辨能力,但易发生大于半个周期的条纹被投影在物体突变或不连续区域,导致连续相位展开算法会发生拉丝、信息丢失等错误。为获取高精度测量结果,可以结合两种高低频率光栅的优点,利用低频光栅条纹投影时的测量结果确定高频光栅条纹投影时相位展开的级数,并利用高频光栅条纹提高相位恢复的精度,获得高可靠性的绝对相位。

绝对相位解包裹算法有多种形式,如倍频法、多频外差法等,文献[27]通过对不同方法进行了详细的比较,得出倍频法可提高绝对相位解包裹的精度和可靠性,其基本原理为:

$$\Phi_h(x, y) = (f_h/f_1)\Phi_1(x, y), \quad (11)$$

式中 f_h, f_1 分别为所采用的高、低频条纹的频率值。倍频法时, $f_h/f_1 = f$ 为一正整数,即倍频数。 $\Phi_h(x, y), \Phi_1(x, y)$ 分别是高、低频条纹图像在 (x, y) 处的解包裹相位值,且 $\Phi_h(x, y) = (f_h/f_1)\Phi_1(x, y)$ 。通过:

$$\begin{cases} \Phi_h(x, y) = \varphi_h(x, y) + 2k_h(x, y)\pi \\ \Phi_1(x, y) = \varphi_1(x, y) + 2k_1(x, y)\pi \end{cases}, \quad (12)$$

可以发现,当低频条纹 $f_1 = 1$ 时, $k_1 = 0$, 所以 $\Phi_1(x, y) = \varphi_1(x, y)$ 。联合(11)和(12)式得:

$$k_h = \text{Round} \left[\frac{(f_h/f_1)\Phi_1(x, y) - \varphi_h(x, y)}{2\pi} \right], \quad (13)$$

这样就可由高、低频主值相位图 φ_h, Φ_1 联合得到高频相位图里每一点的条纹级数,然后利用(10)式即可获得高频条纹绝对相位图。

4 多频法和反向相位误差补偿相结合的高效方法

传统的反向误差补偿方法是对解包裹相位图进行相位误差补偿,当使用频率为 f 倍频的三步相移和反向误差补偿法进行测量时,为了保证测量级数的准确性,通常 $f < 6$, 其中最高频率影响测量结果的精度。为了提高测量精度,需要增大投影条纹最高频率,使用 $1, f, f^2, f^3$ 这 4 种频率进行投影。文献[18-19]使用初相位为 0 的原始相移条纹和初相位为 $\pi/3$ 的相位误差补偿条纹各 $3 \times 4 = 12$ 幅,两组共计 24 幅相移条纹图,首先进行相位解包裹,然后对解包裹相位值进行相位误差补偿。若对最高频率的主值相位图进行相位误差反向补偿法,投影条纹幅数将变为 $3 \times (4+1) = 15$ 幅,比原来的 24 幅减少了 9 幅,减少了投影条纹幅数。这样既提高了测量精度,又提高了测量速度。

当 $N=3$ 时,相机采集相移前后两组高频条纹图,分别得到主值相位图为 φ'_1, φ'_2 ,则由 2.1 节分析得到 $\varphi'_1 = \varphi + \Delta\varphi_3, \varphi'_2 = \varphi + \pi/3 - \Delta\varphi_3$,直接利用两幅主值相位图进行相位误差补偿算法为:

$$\varphi(x, y) = \begin{cases} (\varphi'_1 + \varphi'_2 - \pi/3)/2 & \varphi'_1 < \varphi'_2 \\ (\varphi'_1 + \varphi'_2 - \pi/3 + 2\pi)/2 & \varphi'_1 > \varphi'_2 \end{cases}, \quad (14)$$

根据(6)~(9)式可得三步、四步、五步相移法反向误差补偿后的相位误差分别为:

$$\begin{cases} \Delta_3 = (\varphi'_1 + \varphi'_2 - \pi/3)/2 - \varphi = (\Delta\varphi_3 + \Delta\varphi'_3)/2 \approx c_2 \sin(6\varphi) \\ \Delta_4 = (\varphi'_1 + \varphi'_2 - \pi/4)/2 - \varphi = (\Delta\varphi_4 + \Delta\varphi'_4)/2 \approx c_2 \sin(8\varphi) \\ \Delta_5 = (\varphi'_1 + \varphi'_2 - \pi/5)/2 - \varphi = (\Delta\varphi_5 + \Delta\varphi'_5)/2 \approx c_2 \sin(10\varphi) \end{cases} \quad (15)$$

因此只需一次相位补偿算法即可得到高精度的解包裹相位图,同时可得:

$$2\Delta\varphi = \begin{cases} \varphi'_1 - \varphi'_2 - \pi/3 & \varphi'_1 < \varphi'_2 \\ \varphi'_1 - \varphi'_2 - \pi/3 + 2\pi & \varphi'_1 > \varphi'_2 \end{cases}. \quad (16)$$

据此可以设定一个相位误差极限 ε , 如果 $|2\Delta\varphi| > \varepsilon$, 例如 0.5 rad , 则可判断该点为无效点,

可以剔除将由背景、过大噪声等引起的包含粗大误差的测量结果。

5 误差补偿实验

5.1 实验方案

为了获取最佳的三维形貌测量结果,根据被测物体的表面形貌是否连续以及对测量结果的精度、速度要求,需要选择合适的相位测量方法,如下所列。

1) 当物体表面形貌无孔洞、阴影等不连续区域时,可利用 HT 非线性误差补偿方法来提高测量速度和精度。

2) 当物体有孔洞、台阶、阴影等不连续区域时,首选时间相位解包裹方法中的倍频法恢复绝对相位,再使用反向误差补偿算法提高相位测量精度,并根据测量精度的要求确定投影条纹最高频率的最小值。投影条纹频率越高,相位恢复精度越高,由于倍频数不能太大,否则会引起解包裹错误,所以投影条纹最高频率越高,使用文献[18]对解包裹相位图进行反向误差补偿法时,投影条纹幅数成倍增加,测量速度较低。因此,为了提高测量精度,同时减少投影条纹幅数,可以利用所提出的最高频率主值相位图进行反向误差补偿算法以提高测量精度和速度。

3) 当被测物体表面过于复杂,微小细节比较多,噪声比较大时,为了进一步提高测量可靠性,可牺牲一定的测量速度,对低频相位同样进行相位误差补偿。

4) 当测量仪器(投影仪和相机参数)非常稳定、测量环境和被测对象表面反射率基本不变时,可以使用主动相位补偿法来提高测量速度和精度,但需首先对相位误差进行全场精确标定。

为验证所提出的利用倍频法和在最高频率处对主值相位图进行反向误差补偿相结合的有效性,搭建了条纹投影轮廓术测量系统。该系统主要包括:数码光处理(DLP)投影仪(LightCrafter4500,分辨率:1024 pixel×768 pixel),相机(加拿大 PointGrey 分辨率:1280 pixel×800 pixel),计算机[Inter(R) Core(TM) i5-3470 CPU @3.2 GHz,4.0 GB 随机访问内存(RAM)]。共进行了三个实验用于说明本算法的实现过程,被测对象分别为一个标准平面,一个复杂面型的石膏人头像,一个有空洞且有不同花纹的茶杯。实验内容如下:

1) 对一标准平面分别利用伽马主动误差补偿

法、HT 两步误差校正算法和所提出的方法进行实验比对及进行误差模型验证;

2) 对一复杂面型的石膏人头像利用主动相位误差补偿法和所提出的方法进行相位恢复和误差补偿;

3) 对一有空洞、阴影等不连续区域的复杂曲面进行相位恢复和误差补偿,并用其说明实验操作步骤。

5.2 实验结果

对一标准平面用不同相位误差补偿算法得到的实验结果如图 1 所示,首先利用(2)式,取 20 步($N=20$)相移算法得到的相位作为理想相位近似值。使用不同测量方法得到的相位与理想相位的差值作为相位误差。多频条纹法使用频率为 1,4,16,64,因为三步相移法投影条纹幅数最少,误差最大,所以每个频率使用三步相移法得到主值相位,如果对测量速度无严格要求,当使用更高相移步数,如四步、五步相移法时,可获取更小的相位测量误差,更高的精度。图 1(a)中蓝色虚线和黑色点画线分别为相移前后的主值相位,红色实线为使用反向

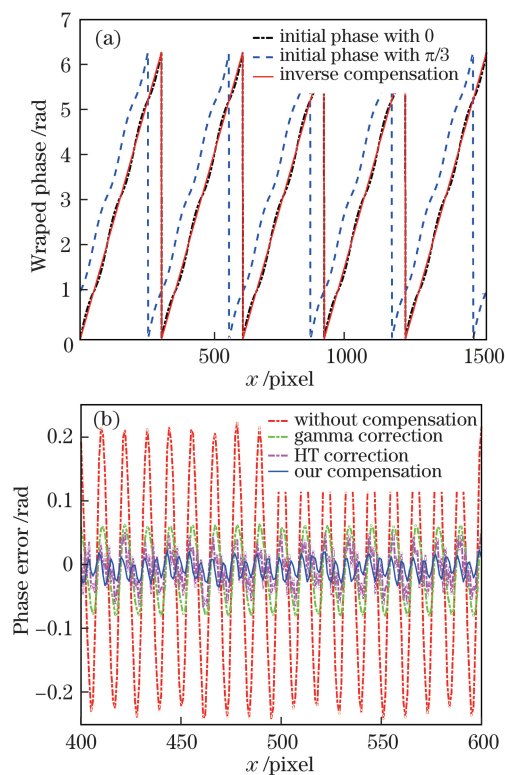


图 1 相位误差补偿结果图。(a)反向误差补偿方法;

(b)不同误差补偿方法的比较

Fig. 1 Compensation result diagram of phase error.

(a) Inverse error compensation method;

(b) comparison of different error compensation methods

误差补偿算法后某一行相位误差补偿结果曲线,可以看出非线性相位误差明显得到补偿。图 1(b)为不同相位误差补偿算法的补偿结果,红色虚线为无误差补偿、绿色点画线为伽马误差补偿结果、紫红色为 HT 误差补偿结果、蓝色实线为反向误差补偿算法得到的结果,具体计算结果如表 1 所示,其展示了不同方法的相位误差最大值和标准差。表 1 中 RMS 表示均方根。从图 1(b)和表 1 中可以看到反向误差补偿法补偿效果最好,精度最高。

表 1 相位误差比较

Table 1 Phase error comparison rad

Method	Without compensation	Gamma correction	HT correction	Proposed approach
Max	0.2186	0.0583	0.0483	0.0361
RMS	0.0623	0.0127	0.0096	0.0084

观察图 1(b)反向误差补偿算法补偿后的相位误差(蓝色实线),其基本为正弦周期分布,未补偿时误差频率(红色虚线)近似为原始条纹误差频率的三倍,补偿后的相位误差频率为未进行相位误差补偿时的两倍,也即信号频率的 6 倍,与(15)式相吻合。如果需要进一步提高精度,则根据测量原理可以再次投影附加条纹(初始相位分别为 $\pi/6, \pi/2$ 的两组附加条纹图)进一步减小相位误差。

为了对算法的有效性进行验证,对该标准平面用三步、四步相移法和所提出的在包裹相位图内利用(6)~(8)式得出误差补偿前相移前后两组相移条纹图的相位误差图,结果如图 2(a)所示为 $N=3$,相移前后两组相移条纹相位差为 $\pi/3$,图 2(b)为 $N=4$,两组相移前后相移条纹相位差为 $\pi/4$ 。从图中可以看到,相移前后相位误差大小相等,符号相反,并且从图中可以看出在 $600 \sim 700$ pixel 范围内,三步相移法误差频率与四步相移法误差频率之比为 $9T/12T=3/4$,与第 2 节理论分析结果一致。

图 3 显示了对该标准平面使用倍频法和最高频率的主值相位图反向误差补偿法进行相位误差补偿后的绝对相位三维点云图,可以看出补偿前有明显的周期性误差存在,补偿后相位误差得到显著减小。

为了检验本算法的效果,对一个石膏人头像进行绝对相位展开与误差补偿实验。如图 4 所示,图 4(a)和(b)为石膏头像和其中一幅主值相位图,图 4(c)为未进行相位误差补偿时得到的解包裹绝对相位图,图 4(d)为使用主动相位补偿方法标定得

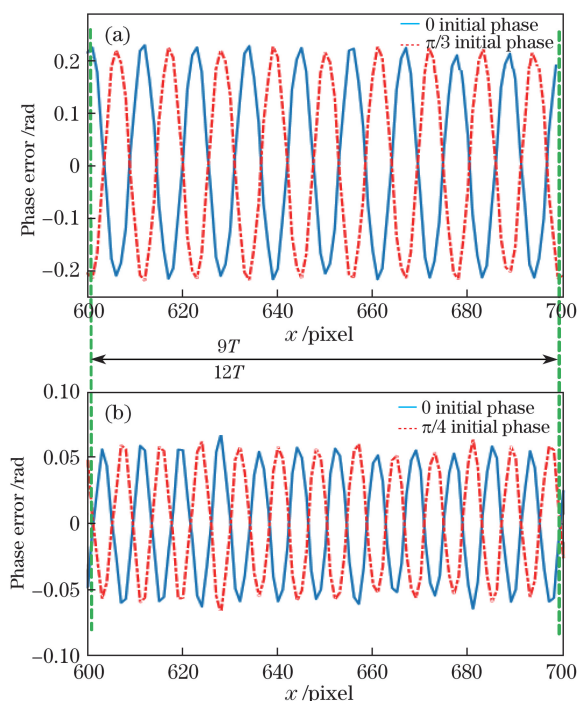


图 2 相移前后相位误差分布。(a)三步相移法; (b)四步相移法

Fig. 2 Phase error distribution before and after phase shifting. (a) 3-step phase shifting; (b) 4-step phase shifting

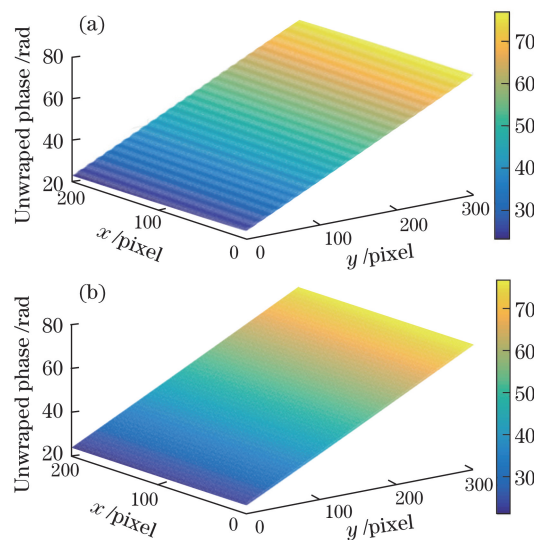


图 3 标准平面绝对相位恢复图。(a)补偿前;(b)补偿后

Fig. 3 Absolute phase recovery of the standard plane.

(a) Before compensation; (b) after compensation

到伽马值 1.712,并用其进行相位误差补偿后得到的解包裹绝对相位图;图 4(e)为使用所提出的方法得到的解包裹绝对相位图。从各图中可以看出,利用该方法进行相位恢复后对细节恢复比较清楚,相对比较平滑,相位误差比较小,误差补偿后相位恢复结果得到很好的改善。

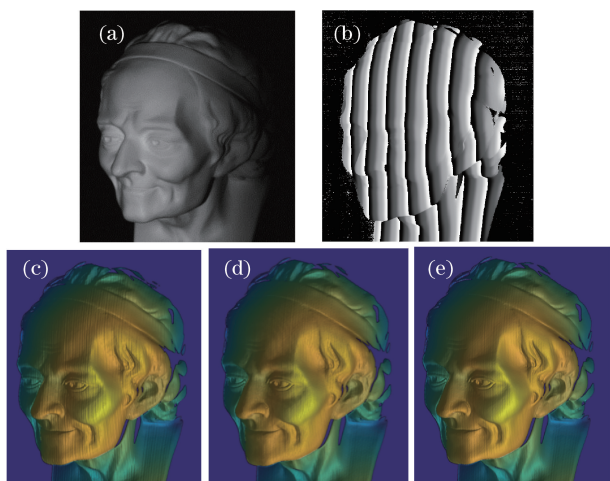


图 4 石膏像的绝对相位恢复。(a)原始石膏图像；(b)主值相位图；(c)未进行相位补偿；(d)主动相位误差补偿法 $V_{\gamma}=1.712$ 时绝对相位恢复；(e)所提方法进行相位补偿后

Fig. 4 Absolute phase recovery of plaster statue.

(a) Original plaster image; (b) principal phase map; (c) without phase compensation; (d) absolute phase recovery with active phase error compensation method at $V_{\gamma}=1.712$; (e) phase compensation with proposed method

5.3 实验步骤

为了更清楚地说明本相位误差补偿算法的实现原理,图 5 详细展示了此算法的工作过程及结果。

1) 投影并采集变形条纹图。首先投影图 5(a)~(e)初相位为 0,条纹频率分别为 1,4,16,64 的三步相移法条纹投影图,以及图 5(e)初相位为 $\pi/3$,条纹频率为最高频率 64 的条纹投影图;

2) 计算相位主值图。计算图 5(a)~(d)的相位主值图,分别为图 5(f)~(j);

3) 绝对相位解包裹。利用倍频法根据(11)~(13)式进行绝对相位解包裹。首先使用频率为 1 和 4 的主值相位图解包裹得到绝对相位图 5(k),再利用绝对相位图 5(k)和频率为 16 的主值相位图 5(h)求得频率为 16 的解包裹绝对相位图 5(l);

4) 主值相位图内非线性相位误差校正。在主值相位图内根据(14)式对频率为 64,初相位分别为 0 和 $\pi/3$ 的图 5(i)和 5(j)进行非线性相位误差补偿,得到全场高精度的主值相位图 5(m);

5) 绝对相位解包裹。再次利用倍频法根据(13)式、频率为 16 的解包裹绝对相位图 5(l)、频率为 64 的高精度主值相位图 5(m)进行绝对相位解包裹,得到高精度的解包裹绝对相位图 5(n),图 5(o)是绝对相位图 5(n)的三维显示。

图 6 显示了绝对相位去除相位所在斜面后的

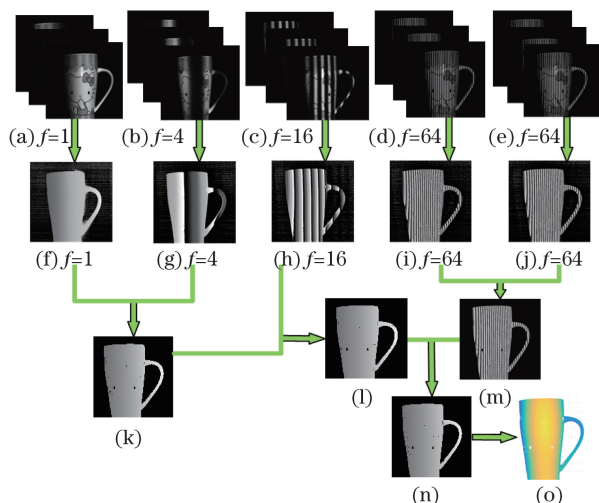


图 5 提出的方法对茶杯表面的相位恢复。(a)~(d)初相位为 0,条纹频率分别为 1,4,16,64 的三步相移法条纹投影图;

(e)初相位为 $\pi/3$,条纹频率为 64 的条纹投影图;

(f)~(j)分别为(a)~(e)的相位主值图;

(k)~(l)频率为 4 和 16 的解包裹绝对相位图;

(m)频率为 64,非线性误差补偿后的主值相位图;

(n)频率为 64 的高精度解包裹绝对相位图;

(o)误差修正后的解包裹绝对相位图三维显示

Fig. 5 Phase recovery of cup surface with proposed method.

(a)~(d) Fringe projection map of zero initial phase and 3-step phase shifting with fringe frequencies of 1, 4, 16 and 64 respectively; (e) fringe projection map of $\pi/3$ initial phase with fringe frequency of 64; (f)~(j) principal phase map of (a)~(e) respectively; (k)~(l) absolute unwrapped phase of frequencies of 4 and 16; (m) principal phase map of frequency of 64 with nonlinear error correction; (n) high resolution absolute unwrapped phase map of frequency of 64; (o) 3D represent of absolute unwrapped phase map after error correction

另一视角下的三维点云图,图 6(a)为未进行相位误差补偿时的绝对相位恢复点云图。从图中可以看出,周期性相位误差明显。图 6(b)为利用所提出的相位误差补偿方法进行相位误差校正后的绝对相位点云图,从图中可以看出,周期性相位误差明显被去除,一些细小的杂散点也得到消除。参考文献[18]的方法需要首先进行频率为 1、初相位为 $\pi/3$ 的空间相位解包裹,然后对解包裹相位进行反向误差补偿,空间相位解包裹过程较易出错,而所提出的方法无需任何空间相位解包裹,提高了测量成功率。

6 结 论

详细分析了相移法条纹三维形貌测量系统中降

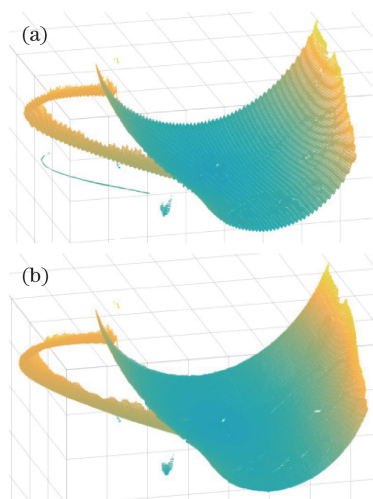


图 6 相位恢复结果图。(a)未进行相位补偿；
(b)所提方法进行相位补偿后

Fig. 6 Phase recovery result diagram.

(a) Without phase compensation;
(b) phase compensation with proposed method

低投影仪非线性相位测量误差,提高相位恢复精度的方法。提出了倍频法与反向误差法相结合,对最高频率主值相位图进行相位误差修正的新方法。该方法不仅提高了相位测量的精度,也提高了测量速度(仅对最高频率的相位主值进行全场非线性误差补偿),并且无需进行相位误差标定,补偿效果不会随着测量时间、测量环境的变化而变化,显著提高了相位测量的精度和稳定性。

参 考 文 献

- [1] Zhang S, Yau S T. High-resolution real-time 3D absolute coordinate measurement based on a phase-shifting method[J]. *Optics Express*, 2006, 14(7): 2644-2649.
- [2] Hu Q Y, Huang P S, Fu Q L, *et al.* Calibration of a three-dimensional shape measurement system[J]. *Optical Engineering*, 2003, 42(2): 487-93.
- [3] Jiang C F, Bell T, Zhang S. High dynamic range real-time 3D shape measurement[J]. *Optics Express*, 2016, 24(7): 7337-7346.
- [4] Geng J. Structured-light 3D surface imaging: a tutorial[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2011, 3(2): 128-160.
- [5] Da F P, Gai S Y. Three-dimensional precision measurement with raster projection[M]. Beijing: Science Press, 2011: 154-174.
达飞鹏, 盖绍彦. 光栅投影三维精密测量[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 154-174.
- [6] Liu K. Real-time 3-D reconstruction by means of structured light illumination[D]. Lexington: University of Kentucky, 2010.
- [7] 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.
- [8] Zhang C W, Zhao H, Zhang L, *et al.* Full-field phase error detection and compensation method for digital phase-shifting fringe projection profilometry[J]. *Measurement Science & Technology*, 2015, 26(3): 035201.
- [9] Xiong C, Yao J, Chen J B, *et al.* A convenient look-up-table based method for the compensation of nonlinear error in digital fringe projection[J]. *Theoretical and Applied Mechanics Letters*, 2016, 6(1): 49-53.
- [10] 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-Optics Image Science and Vision*, 2010, 27(3): 553-562.
- [11] Yatabe K, Ishikawa K, Oikawa Y. Compensation of fringe distortion for phase-shifting three-dimensional shape measurement by inverse map estimation[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(22): 6017-6024.
- [12] Zheng D L, Da F P. Gamma correction for two step phase shifting fringe projection profilometry[J]. *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, 2013, 124(13): 1392-1397.
- [13] Ma S, Quan C, Zhu R, *et al.* A fast and accurate gamma correction based on Fourier spectrum analysis for digital fringe projection profilometry[J]. *Optics Communications*, 2012, 285(5): 533-538.
- [14] Li Z W, Li Y F. Gamma-distorted fringe image modeling and accurate gamma correction for fast phase measuring profilometry[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(2): 154-156.
- [15] Xu Z X, Chan Y H. Removing harmonic distortion of measurements of a defocusing three-step phase-shifting digital fringe projection system[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2017, 90: 139-145.
- [16] Zuo C, Chen Q, Gu G H, *et al.* Optimized three-step phase-shifting profilometry using the third harmonic injection[J]. *Optica Applicata*, 2013, 43(2): 393-408.
- [17] Huang P S, Hu Q J, Chiang F P. Double three-step phase-shifting algorithm[J]. *Applied Optics*, 2002, 41(22): 4503-4509.
- [18] Lei Z K, Wang C L, Zhou C L. Multi-frequency inverse-phase fringe projection profilometry for nonlinear phase error compensation[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2015, 66: 249-257.
- [19] Xiao C, Chen F, Zhong M. Method for improving measurement accuracy of inverse fringe[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(11): 111204.
肖朝, 陈锋, 钟敏. 一种提升反向条纹测量精度的方

- 法[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53: 111204.
- [20] Cai Z W, Liu X L, Jiang H, *et al.* Flexible phase error compensation based on Hilbert transform in phase shifting profilometry[J]. Optics Express, 2015, 23(19): 25171-25181.
- [21] Zheng D L, Da F P, Qian K M, *et al.* Phase error analysis and compensation for phase shifting profilometry with projector defocusing[J]. Applied Optics, 2016, 55(21): 5721-5728.
- [22] Zhang S. Comparative study on passive and active projector nonlinear gamma calibration[J]. Applied Optics, 2015, 54(13): 3834-3841.
- [23] Su X Y, Zhou W S, von Bally G, *et al.* Automated phase-measuring profilometry using defocused projection of a Ronchi grating[J]. Optics Communications, 1992, 94(6): 561-573.
- [24] Lei S Y, Zhang S. Flexible 3-D shape measurement using projector defocusing[J]. Optics Letters, 2009, 34(20): 3080-3082.
- [25] Zhao L W, Da F P, Zheng D L. Method for binary grating generation using defocused projection for three-dimensional measurement[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(8): 0812005.
- 赵立伟, 达飞鹏, 郑东亮. 离焦投影三维测量的二值光栅生成方法[J]. 光学学报, 2016, 36(8): 0812005.
- [26] Yang L, Chen X S, Cui H H, *et al.* Eight-step phase shifting method being independent of gamma nonlinearity[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(11): 111202.
- 杨柳, 程筱胜, 崔海华, 等. 免疫于伽马非线性的八步相移法[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(11): 111202.
- [27] Zuo C, Huang L, Zhang M L, *et al.* Temporal phase unwrapping algorithms for fringe projection profilometry: a comparative review[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2016, 85: 84-103.