

# 条纹投影测量系统的相位误差抑制方法

金晖<sup>1,3</sup>, 张明<sup>1\*</sup>, 周国鹏<sup>2,3</sup>, 肖啸<sup>2,3</sup>, 祝禹骏<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 武汉纺织大学电子与电气工程学院, 湖北 武汉 430200;

<sup>2</sup> 湖北科技学院工程技术研究院, 湖北 咸宁 437100;

<sup>3</sup> 湖北香城智能机电产业技术研究院有限公司, 湖北 咸宁 437100

**摘要** 针对投影仪和相机的伽马非线性效应会使解包裹相位结果产生周期性误差的问题, 提出一种基于均值模板的相位误差抑制方法。首先对解包裹相位进行傅里叶变换, 计算出相位误差的周期值。之后, 设计出长度可变的一维均值滤波模板, 模板的长度与相位误差的周期相关。最终用此模板对解包裹相位进行均值滤波, 消除周期性误差。实验结果显示, 所提方法使解包裹相位的周期性误差平均减少 94%, 消除了采用结构光测量平坦物体深度信息时出现的失真波纹, 在没有复杂的数学模型和增加条纹图案的前提下提高了相位测量和深度信息测量的准确度, 更适用于实际应用。

**关键词** 测量; 相位误差; 条纹投影轮廓术; 周期性噪声; 均值滤波

中图分类号 TP391.4

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1412001

## Phase Error Restraint Method for Fringe Projection Measurement System

Jin Hui<sup>1,3</sup>, Zhang Ming<sup>1\*</sup>, Zhou Guopeng<sup>2,3</sup>, Xiao Xiao<sup>2,3</sup>, Zhu Yutao<sup>3</sup>

<sup>1</sup> School of Electronic and Electrical Engineering, Wuhan Textile University, Wuhan, Hubei 430200, China;

<sup>2</sup> Institute of Engineering & Technology, Hubei University of Science and Technology, Xianning, Hubei 437100, China;

<sup>3</sup> Hubei Xiangcheng Intelligent Electromechanical Industry Technology Research Institute Limited Company, Xianning, Hubei 437100, China

**Abstract** Aiming at the problem that the Gamma nonlinear effect of the projector and the camera will cause periodic errors in the unwrapping phase results, a phase error suppression method based on the mean template is proposed. First, Fourier transform is performed on the unwrapping phase to calculate the period value of the phase error. Then, a one-dimensional mean filter template with variable length is designed. The length of the template is related to the period of the phase error. Finally, this template is used to perform mean filtering on the unwrapping phase to eliminate periodic errors. Experimental results show that the proposed method reduces the periodic error of the unwrapping phase by an average of 94%, eliminates the distortion ripples that appear when measuring the depth information of flat objects with structured light, and improves the accuracy of phase measurement and depth information measurement without complex mathematical models and increasing fringe patterns. The proposed method is more suitable for practical applications.

**Key words** measurement; phase error; fringe projection profilometry; periodic noise; mean filtering

**OCIS codes** 120.5050; 100.2000; 120.6650

收稿日期: 2020-09-27; 修回日期: 2020-11-01; 录用日期: 2020-11-14

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51976199, 51976198)、湖北省科技计划项目(2019BEC206, 2018ABA076)、湖北省教育厅优秀青年科技创新团队项目(T201817)

通信作者: \*zhangming@wtu.edu.cn

## 1 引言

条纹投影轮廓技术(FPP)是一种空间编码技术,可以用于多种物品的检测、定位和三维测量<sup>[1-3]</sup>。移动相位算法(PSA)是FPP的核心,相位测量结果的准确性直接影响了测量目标物体的准确性。相机与投影仪的伽马效应会使拍摄的条纹投影图案存在非线性的畸变<sup>[4-5]</sup>。PSA使用这种带有畸变的图片进行相位测量,会使结果出现周期性的噪声,最终对物体的测量结果造成严重影响。而补偿此类误差的方法主要分为主动法、被动法和反向误差补偿法<sup>[6-8]</sup>。

主动法通过减小投影图案的畸变减小相位误差。Yu等<sup>[9]</sup>通过深度学习的方法对投影出的条纹进行调制,得到误差较小的条纹图;Xu等<sup>[10]</sup>建立了一个生成小误差小谐波失真条纹图的框架;石础<sup>[11]</sup>提出一种标定伽马系数并校正条纹图案的方法,但是该方法需要拍摄更多条纹图案。以上方法都能得到准确的编码条纹,进行准确快速的相位误差补偿。但无论深度学习、建立条纹图生成框架还是增加条纹图都是很费时的,在环境或系统有较大变动时还需重新建立模型和标定参数,这限制了以上方法在实际中的广泛应用。

被动法直接对相位误差进行修正或补偿。Cho等<sup>[12]</sup>提出了一种自适应误差补偿算法;刘超等<sup>[13]</sup>针对伽马系数的随机误差进行了优化,提高了误差补偿的精度;Song等<sup>[14]</sup>提出一种通过自动建立误差查找表完成相位误差补偿的方法。被动法也需要额外的步骤对算法中的参数进行标定。被动法虽然比主动法耗时少,但是被动法更易受到环境和系统参数变动影响而导致精度下降,需要重新标定以保证误差补偿的效果。

反向误差补偿法通过获得相位误差的相反数以抵消原有的相位误差。毛翠丽等<sup>[15]</sup>通过增加投影图案获得相位误差的相反数;Cai等<sup>[16]</sup>通过希尔伯特变换获得相位误差的相反数;Chen等<sup>[17]</sup>进行了进一步的改进,弥补了希尔伯特变换法带来系统误

差的弊端。上述方法存在投影图案数量增加或测量时间较长的问题。

虽然有多种方法可处理相位误差,但是这些方法要达到好的效果,往往要借助复杂的数学模型,而且需要额外的操作步骤进行参数标定和运算。本文提出一种相位误差抑制方法,该方法通过对解包裹相位进行傅里叶变换,计算出相位图的频谱,得到相位误差的频率,从而得到相位误差的周期。同时设计出一种长度可变的一维均值模板,根据相位误差的周期大小为均值模板设置一个合适的长度,使用此模板对解包裹相位进行均值滤波,该方法在测量表面平坦的物体时可以减小相位误差。此方法避免了建立复杂的误差补偿模型、伽马系数标定、拍摄额外的条纹投影图像等繁琐的操作,且消除了相位误差,提高了解包裹相位计算结果和深度信息测量结果的准确性。

## 2 相位误差的特性分析

标准  $N$  步相移法<sup>[18]</sup>通过向目标投影一系列相移为  $2\pi/N$  的条纹图像,并通过逐一拍摄得到  $N$  幅图像  $I_1(x, y), I_2(x, y), \dots, I_N(x, y)$ , 其中,  $x$  为图像像素的横坐标,  $y$  为图像像素的纵坐标。标准  $N$  步法的包裹相位为

$$\phi(x, y) = \arctan \frac{\sum_{n=0}^{N-1} I_n(x, y) \cdot \sin(2\pi n/N)}{\sum_{n=0}^{N-1} I_n(x, y) \cdot \cos(2\pi n/N)}, \quad (1)$$

式中:  $n$  为从 0 到  $N-1$  的整数。包裹相位值都在  $-\pi$  到  $\pi$  之间, 是不连续的。下一步需要对包裹相位进行解包裹, 获得实际的相位值——解包裹相位。

双频法是一种时间相位解包裹算法<sup>[19]</sup>, 可以通过对同一目标投影两组频率不同的条纹实现包裹相位的解包裹。如图 1(a) 所示, 低频条纹频率为  $f_1$ , 由(1)式计算出包裹相位  $\phi_1(x, y)$ , 高频条纹投影频率为  $f_2$ , 由(1)式计算出包裹相位  $\phi_2(x, y)$ 。进行相位解包裹的公式为

$$\begin{cases} n(x, y) = \text{INT} \left\{ \frac{1}{2\pi} \cdot \left[ \frac{f_2}{f_1} \cdot \phi_1(x, y) - \phi_2(x, y) \right] \right\}, \\ \varphi(x, y) = \phi_2(x, y) + 2\pi \cdot n(x, y) \end{cases}, \quad (2)$$

式中:  $\text{INT}(x)$  为取整函数。相位解包裹过程如图 1(b) 所示, 由(2)式计算出条纹级次  $n(x, y)$  后,

计算出解包裹相位  $\varphi(x, y)$ 。每一个坐标  $(x, y)$  都对应一个相位值, 相位值储存于矩阵中。

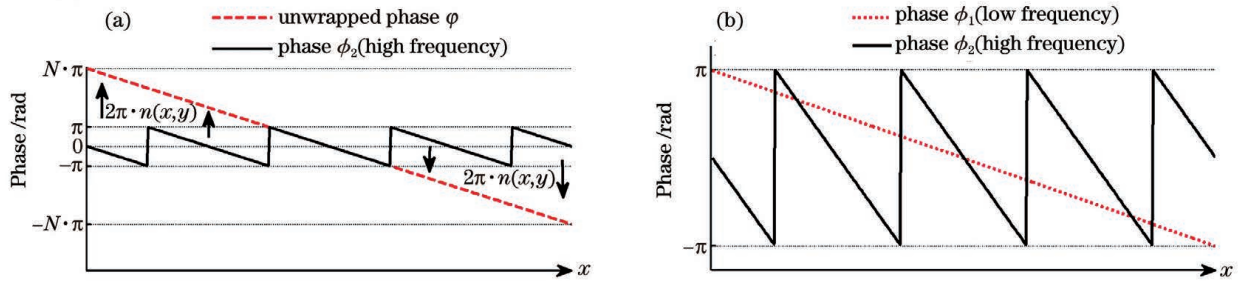


图 1 相位解包裹示意图。(a)包裹相位  $\phi_1$  与  $\phi_2$ ; (b)包裹相位  $\phi_2$  和解包裹得到的  $\phi$

Fig. 1 Sketch maps of phase unwrapping. (a) Wrapped phases  $\phi_1$  and  $\phi_2$ ; (b) wrapped phase  $\phi_2$  and unwrapped phase  $\phi$

伽马效应引起的相位误差会随着相移步数的增加而减小<sup>[11]</sup>。理论上 PSA 的步数越多,实测的相位越接近于理论值。但是误差衰减的速度随着步数的增大而越来越小,同时所需的运算时间和数据的存储空间也会呈线性增加。故实际运用条纹投影技术进行三维测量时更倾向于使用 4 步法,通过增加最少的步数获得最好的误差衰减效果。但是 4 步法的相位误差仍然不可忽视。如图 2 所示,取实际得到的解包裹相位  $\varphi(x, y)$  的第 1 行进行比较,16 步法的解包裹相位明显近似以线性分布,形如表达式为  $y = kx + b$  的一次函数,其中,  $k$  为斜率,  $b$  为截距。通过将 4 步法的解包裹相位与 16 步法的解包裹相位相减,可以得到相位误差。如图 3 所示,相位误差形似正弦函数。

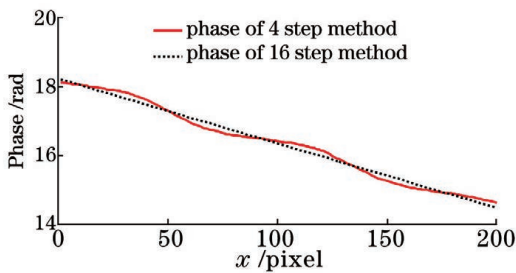


图 2 4 步法与 16 步法的解包裹相位

Fig. 2 Unwrapped phases of 4 step method and 16 step method

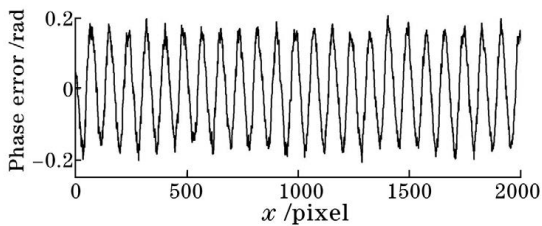


图 3 4 步法得到的解包裹相位的误差

Fig. 3 Error of unwrapped phase of 4 step method

Yao 等<sup>[20]</sup>提出一种相位误差的数学模型,认为相位误差  $\Delta\varphi$  近似于以解包裹相位  $\varphi(x, y)$  为自变量的正弦函数,即

$$\Delta\varphi \approx q \cdot \sin[4\varphi(x, y)] + \frac{q^2}{2} \cdot \sin[8\varphi(x, y)], \quad (3)$$

式中:  $q$  为常数系数,需要其他方法进行求解。通过对图 3 的数据进行拟合,可以得到正弦函数  $f(x) = 0.159\sin(0.07482x - 3.523)$ ,拟合误差的均方根为 0.02308。理论与仿真结果均表明相位误差近似于正弦函数。

### 3 均值模板相位误差抑制方法

相位误差的函数表达式为:  $\Delta\varphi(x) = A \sin(\omega x)$ ; 理想状态下无误差的绝对相位的表达式为:  $g(x) = k_1x + b_1$ 。  $\omega$  为频率,  $A$  为幅值,  $T$  为正弦函数  $\Delta\varphi(x)$  的周期,  $k_1, b_1$  分别为理想无误差的相位的斜率和截距。将  $F(x) = g(x) + \Delta\varphi(x)$  作为实际测得的相位的数学模型,公式中的各项的纵坐标  $y$  都取同一个值  $y_0$  时,正弦函数  $f(x)$  有如下性质:

$$f\left(x - \frac{T}{4}, y_0\right) + f\left(x + \frac{T}{4}, y_0\right) = 0. \quad (4)$$

一次函数  $g(x)$  有如下性质:

$$g\left(x - \frac{T}{4}, y_0\right) + g\left(x + \frac{T}{4}, y_0\right) = 2g(x, y_0). \quad (5)$$

将(4)式和(5)式相加,可以得到

$$\frac{1}{2} \left[ F\left(x - \frac{T}{4}, y_0\right) + F\left(x + \frac{T}{4}, y_0\right) \right] = g(x, y_0). \quad (6)$$

由(6)式可知,在测量出带有相位误差的绝对相位  $F(x)$  后,其对应的理想相位  $g(x)$  可以通过求  $F(x)$  的平均值得出。

均值滤波模板是一种用于图像处理的工具。图 4(a)所示的均值滤波模板可用于抑制图像的高斯噪声。模板的形式通常不固定,根据具体的需要调整模板的大小和模板内像素的权重以达到不同的

图像处理效果。图 4(b)是一种一维均值滤波模板，模板中间像素的灰度值由左右两边的像素灰度值的平均值决定。将(6)式以模板的形式写出，则得到如

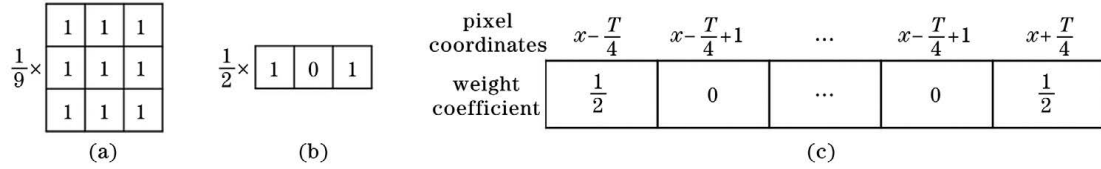


图 4 均值滤波模板。(a) 一种普通的  $3 \times 3$  均值滤波模板；(b) 一种一维均值滤波模板；(c) 用于降低相位误差的均值滤波模板  
Fig. 4 Mean filtering templates. (a) Normal  $3 \times 3$  mean filtering template; (b) a kind of one-dimension mean filtering template; (c) mean filtering template to decrease phase error

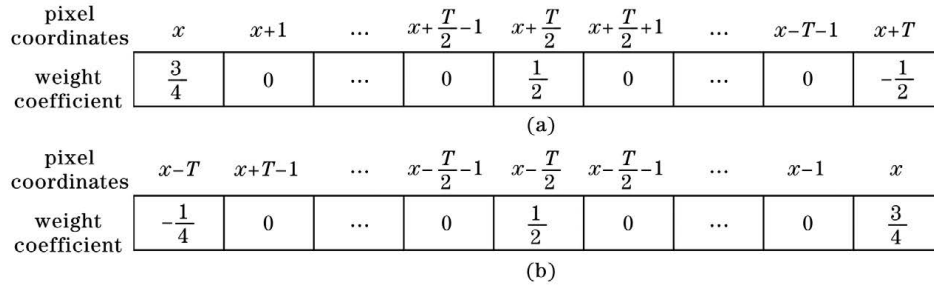


图 5 新增的均值滤波模板。(a) 图像每一行像素开头的均值滤波模板；(b) 图像每一行像素末尾的均值滤波模板  
Fig. 5 New mean filtering templates. (a) Mean filtering template for head of each row of pixels; (b) mean filtering template for end of each row of pixels

此模板的运算涉及到中心像素的左右邻域，但是图像边界附近是不存在左邻域或右邻域的，模板不能完成计算。一般在这种情况下有两种解决办法：1) 创造出不存在的邻域，将邻域内的像素灰度赋值为零，然后进行计算；2) 图像边界附近的像素不用模板进行计算。经过测试发现这两种方法都存在较

图 4(c)所示的一维线性均值滤波模板。由于对同一行的像素进行处理，各像素的纵坐标相同，故图中只写出了横坐标  $x$ ，图 5(a)、(b)同理。

大的问题。第一种方法会使相位严重偏离真实值；第二种方法导致只有中间部分的相位误差被抑制，图像左侧和右侧边缘的相位误差仍然存在。这一问题可以利用相位及其误差函数的数学性质来解决。任意选定图像的某一行像素，行坐标为  $y_0$ ， $F(x, y)$  具有如下性质：

$$\frac{3}{4}F(x, y_0) + \frac{1}{2}F\left(x + \frac{T}{2}, y_0\right) - \frac{1}{4}F(x + T, y_0) = F(x, y_0), \quad (7)$$

$$\frac{3}{4}F(x, y_0) + \frac{1}{2}F\left(x - \frac{T}{2}, y_0\right) - \frac{1}{4}F(x - T, y_0) = F(x, y_0). \quad (8)$$

对(7)式、(8)式的左边进行简单的四则运算即可得出公式右边的结果。结合这一性质对均值模板进行改进，对图像每一行像素的开头使用图 5(a)所示的模板，对图像每一行像素的结尾使用图 5(b)所示的模板，形成了一个分三段描述的

均值模板组。  
将这三个模板应用于一个大小为  $m \times n$  的矩阵上， $x \in [1, n], y \in [1, m], x, y \in \mathbf{N}_+$ 。任意选定图像中的某一行像素，行坐标为  $y_0$ ，运算过程可以以分段函数的形式进行描述，即

$$\varphi_1(x, y_0) = \begin{cases} \frac{1}{2} \left[ \varphi(x, y_0) + \varphi\left(x + \frac{T}{2}, y_0\right) \right] + \frac{1}{4} [\varphi(x, y_0) - \varphi(x + T, y_0)], & 1 \leq x \leq \frac{T}{4} \\ \frac{1}{2} \left[ \varphi\left(x - \frac{T}{4}, y_0\right) + \varphi\left(x + \frac{T}{4}, y_0\right) \right], & \frac{T}{4} < x \leq n - \frac{T}{4} \\ \frac{1}{2} \left[ \varphi\left(x - \frac{T}{2}, y_0\right) + \varphi(x, y_0) \right] - \frac{1}{4} [\varphi(x - T, y_0) - \varphi(x, y_0)], & n - \frac{T}{4} < x \leq n \end{cases} \quad (9)$$

运用傅里叶变换和采样定理计算离散信号的周期  $T$ , 对带有相位误差的相位图的任一行进行傅里叶变换并得到其频谱。相位  $g(x) = kx + b$  属于低频量, 会出现在频率的零频率点附近; 相位误差为频率恒定的周期量, 会以波动或者尖峰的形式出现在对应的频率上。误差的尖峰或波动在频谱上的坐标为  $F_n$ , 采样点数为  $N$ , 采样频率  $f_s = 1$ 。根据采样定理,  $f_s$  与  $N$  的商被定义为频率分辨率, 频谱上坐标为  $F_n$  的点对应的频率为

$$f_x = \frac{f_s}{N} \cdot F_n, \quad (10)$$

$f_x$  的倒数即(9)式中的参数——周期  $T$ 。应当说明, 图像上的离散信号的量纲不同于时间离散信号。使用一维离散傅里叶变换分析图像时, 采样点  $N$  变为每一行像素的个数  $m_0$ , 时间频率(单位:  $s^{-1}$ )变为空间频率(单位:  $pixel^{-1}$ ), 时间周期  $t$ (单位:  $s$ )变为空间周期  $T$ (单位:  $pixel$ )。相应地, (10)式变形为

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{m_0} \cdot F_n. \quad (11)$$

## 4 实验与分析

### 4.1 使用均值模板抑制相位误差

结构光测量实验装置如图 6(a)所示, 其主要设备包括: 索尼相机(型号 XCG-CG510), DLP 微型投影仪(型号 RD-606, LED 灯泡), 以及计算机[配置为 Intel(R)Core(TM)i5-7500CPU 和 8 GB 内存]。实验中拍摄图像的灰度值在 50~255 之间, 且经过了过高斯滤波, 以减小相机灰度映射的非线性特性带来的误差和相机感光时产生的随机噪声<sup>[21]</sup>。另外, 数字条纹投影技术几乎不存在相移装置带来的相移误差<sup>[10]</sup>。通过排除以上误差来源来确保实验中

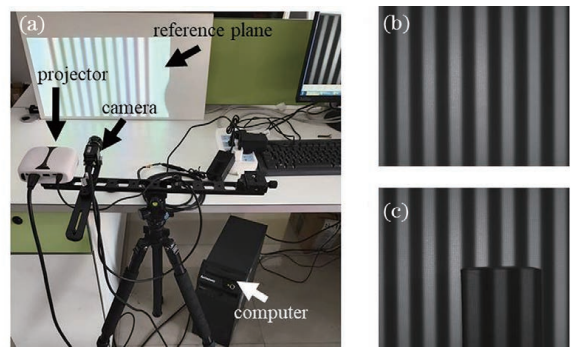


图 6 实验装置与图像采集。(a)结构光测量实验装置; (b)投影条纹到背景平面; (c)投影条纹到纸盒

Fig. 6 Experimental device and image collection. (a) Experimental device of structure light measurement; (b) projected fringes on background plane; (c) projected fringes on carton

测定的相位误差主要由投影仪的伽马效应而产生。

图 6(b)、(c)为 4 幅高频条纹图中的一幅, 其频率是低频条纹的 10 倍。首先研究背景平面上的相位, 运用第二节所介绍的 4 步法计算出带有误差的相位, 用 16 步法计算出近似于理想无误差的相位。将以上两个相位相减得到相位误差。对相位误差和解包裹相位的中间一行进行快速离散傅里叶变换, 计算出其频谱并且将频率为零的点移动至频谱图像的正中间。图 7(a)为相位误差的频谱,  $y$  轴为线性坐标, 图中有三个峰值分别落在横坐标为 29, 58, 87 的三处位置。这表明相位误差的频率主要集中于这三处。根据(11)式可以计算出以上三个点对应的正弦量在图像上的周期分别为  $T_1 = 84.4$ ,  $T_2 = 42.2$ ,  $T_3 = 28.1$ (单位:  $pixel$ , 结果精确至小数点后一位)。图 7(b)为解包裹相位的频谱,  $y$  轴为对数坐标, 可以看出解包裹相位分别在横轴坐标为 29 和 58 的两个点上有波动, 而坐标为 87 的点几乎看不

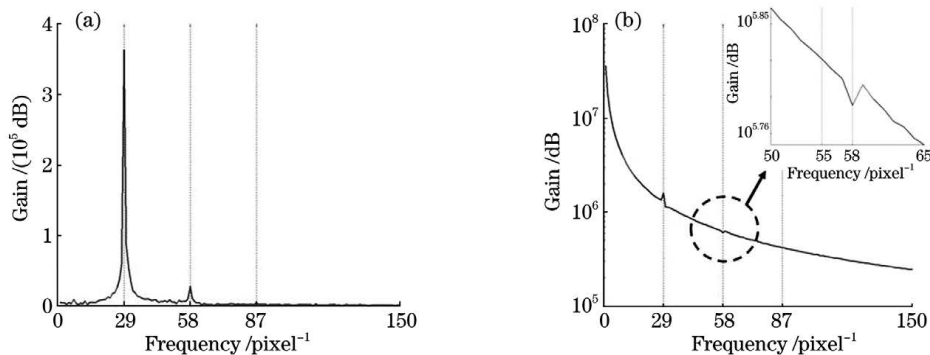


图 7 频谱。(a) 相位误差的频谱(显示的频率 0~150); (b) 4 步法解包裹相位的频谱(显示的频率 0~150)

Fig. 7 Frequency spectra. (a) Frequency spectrum of phase error (displayed frequency range is 0~150); (b) frequency spectrum of unwrapped phase obtained by 4 step method (displayed frequency range is 0~150)

出波动;零频率的分量为解包裹相位  $g(x)=kx+b$ 。这表明相位误差中频率为 29 和 58 的正弦分量可以在实测相位的频谱中观察到,增益太小的频率分量可能观察不到。本文为了进行更加完备的研究,将这三个周期都用于误差抑制实验,以验证方法是否可靠。

对解包裹相位使用本文中设计的模板处理三次,第一次处理的参数  $T=84$ ,第二次处理的参数  $T=42$ ,第三次处理的参数  $T=28$ 。进行三次相位误差抑制的结果如图 8 所示,经过处理后的相位误

差(实线)与原先的相位误差(虚线)相比大大减小了。统计了第 100 行的 2448 个像素点,对误差处理结果进行量化。表 1 列出了样本误差的最大值和最小值,并对每个像素上误差的绝对值进行累加再除以像素数量,得出平均的相位误差,结果均精确至小数点后 4 位,如表 1 所示。可以看出误差的最大值与最小值的绝对值和误差的均值在经过误差抑制后明显减小,随着处理次数的增加,误差衰减的幅度也越来越小。

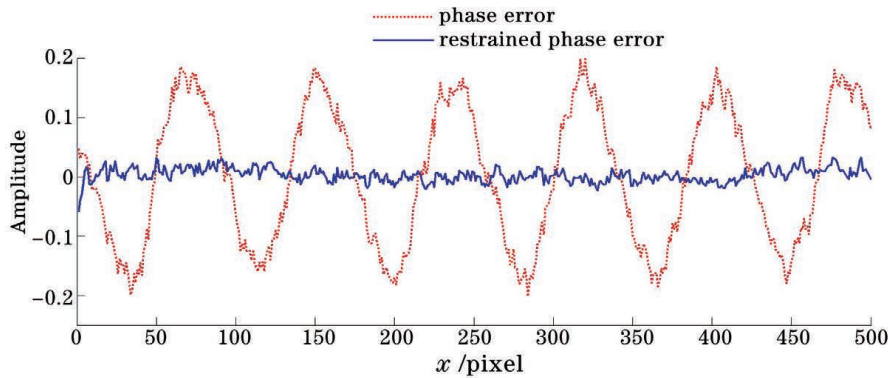


图 8 第 100 行像素上的相位误差与抑制后的相位误差

Fig. 8 Phase error and restrained phase error of pixels in 100th row

表 1 相位误差抑制实验结果

Table 1 Experimental result of phase error restraining

Phase error	Maximum /rad	Minimum /rad	Average error /( $\text{rad} \cdot \text{pixel}^{-1}$ )
Without phase error restraining	0.2079	-0.2076	0.1019
1st restraining ( $T=84$ )	0.0526	-0.0488	0.0127
2nd restraining ( $T=42$ )	0.0471	-0.0597	0.0075
3rd restraining ( $T=28$ )	0.0253	-0.0548	0.0057

对参考平面进行多次投影,每次实验均小幅度改变环境光强度,并改变参考面到相机的距离。以(7)式为数学模型生成查找表,用查表(LUT)法进行误差补偿实验并将其与本文所提出的方法进行对照。一共重复了 5 次实验,计算误差衰减比率的平均值。实验结果如表 2 所示,可以看出:本文提出的

方法在  $2048 \times 2448$  大小的图像上的相位误差平均减少 94.0301%,用时约 0.7314 s;对照的 LUT 方法用时约 0.1097 s,相位误差平均减少 80.0347%。本文提出的方法有效地抑制了相位误差,与基于相位误差模型的 LUT 方法相比,在牺牲一定速度的前提下提高了精度。

表 2 重复 5 次相位误差抑制实验的结果统计

Table 2 Statistics of results of 5 phase error restraining experiments

Experiment No.	Average error /( $\text{rad} \cdot \text{pixel}^{-1}$ )		Decline rate/%	
	Without error restraining	LUT method	Proposed method	LUT method
①	0.0998	0.0179	0.0034	82.0641
②	0.1021	0.0203	0.0057	80.1175
③	0.1065	0.0231	0.0089	78.3099
④	0.1068	0.0218	0.0049	79.5880
⑤	0.1060	0.0211	0.0076	80.0943

## 4.2 深度信息测量实验

为了验证相位误差抑制方法应用于表面测量的可行性,对表面平坦的物体进行深度信息测量,测量的目标物体为方形纸盒。向纸盒投影条纹并计算相位,所得结果如图 6(c)所示,图中纸盒表面到参考平面的垂直距离为 9.0 cm。

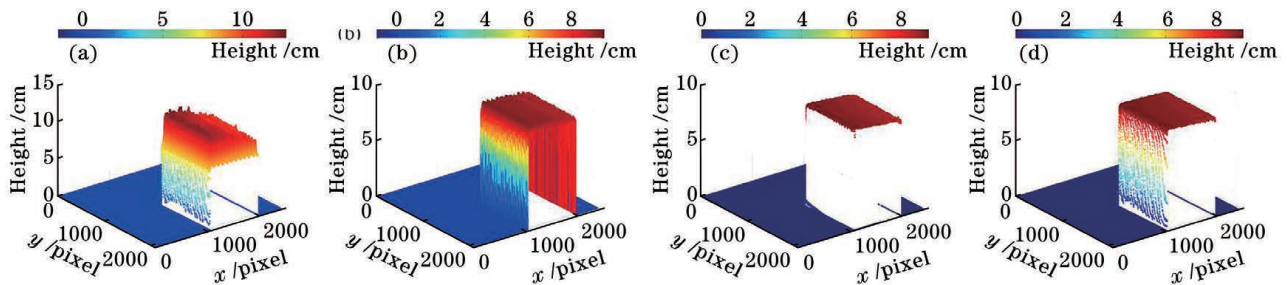


图 9 三维点云图测量结果(纸盒到参考平面的高度)。(a) 4 步法;(b) LUT 方法进行误差补偿后的 4 步法;(c) 抑制相位误差后的 4 步法;(d) 16 步法

Fig. 9 Three dimensional (3D) point cloud measurement results (height from carton to reference plane). (a) 4 step method; (b) 4 step method with error compensation by LUT method; (c) 4 step method with phase error restraining; (d) 16 step method

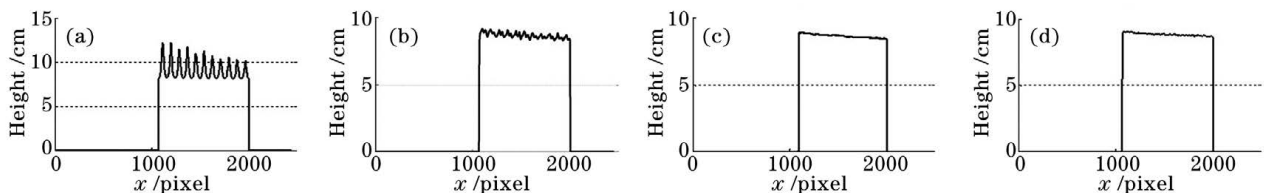


图 10 测得的三维点云图的横截面(第 1500 行)。(a) 4 步法;(b) LUT 方法进行误差补偿后的 4 步法;(c) 抑制相位误差后的 4 步法;(d) 16 步法

Fig. 10 Cross sections of measured 3D point cloud (1500th row). (a) 4 step method; (b) 4 step method with phase error compensation by LUT method; (c) 4 step method with phase error restraining; (d) 16 step method

图 9(a)、图 10(a)显示,使用 4 步法的测量结果因受到相位误差的影响而失真。图 9(b)、图 10(b)显示,经过误差补偿后测量结果向 9.0 cm 的位置收敛,但是仍然存在失真。图 9(c)和图 10(c)显示,经过相位误差抑制以后,测量结果表面的失真波纹消失。图 9(d)与图 10(d)显示,使用 16 步法的测量结果在实际测量结果 9.0 cm 附近,而且存在系统误差,经过统计发现误差最大达到了约 0.2 cm。

从以上结果可以看出,伽马效应引起的相位周期性误差会作用于深度信息测量的结果之上,通过减小相位误差可以有效地解决这个问题。使用 4 步法和均值模板抑制误差得到的测量结果接近于 16 步法得到的测量结果;另外统计了这两组测量实验的代码的运行时间,其中前者用时 9.7124 s,后者用时 15.8411 s。本文提出的方法在提高测量精度的同时,用时也较短。因为测量结果存在明显的系统

先对图像中的纸盒进行图像分割,测量纸盒表面上投影条纹的相位值,再抑制相位误差,通过处理后的相位计算出图像中纸盒表面上每一点到参考平面的垂直距离,并对结果进行了中值滤波,去除超出量程的异常数据,最终绘出深度信息的点云图,如图 9 所示。取其中一行进行展示,结果如图 10 所示。

误差,所以不能定量地分析相位误差对于深度信息测量结果的影响,这一点有待进一步研究。

## 5 结 论

针对投影仪伽马畸变引起的周期性相位误差的问题,提出了一种相位误差抑制方法。经过相位误差抑制测试可以得出结论:相比于目前常用的误差补偿算法,所提出的方法在不使用复杂相位误差模型或者不增加额外的相移步数的情况下达到了良好的相位误差抑制效果,整体的误差下降率超过 90%。经过相位深度信息测量实验可以得出结论:投影仪的伽马畸变引起的相位误差会使测量结果出现失真,通过对物体表面的相位进行误差抑制可以消除平整物体表面失真的测量结果。所提出的方法可以有效地消除移相法中的周期性相位误差,提高深度信息测量系统的准确性。

## 参 考 文 献

- [1] Tao T Y, Chen Q, Da J, et al. Real-time 3-D shape measurement with composite phase-shifting fringes and multi-view system[J]. *Optics Express*, 2016, 24(18): 20253-20269.
- [2] Yin L, Wang X J, Qin G Y. Dynamic measurement method of large-scale surface based on visual structured light technology[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(13): 131202.  
阴雷, 王向军, 秦贯宇. 基于视觉结构光的大型曲面动态测量方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(13): 131202.
- [3] Wu Q W, Fan H D, Guan J, et al. Surface profile measurement of coal based on structured light multifrequency phase-shifting technique[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(4): 041102.  
吴庆尉, 范海东, 关键, 等. 基于结构光多频相移法的煤块表面形貌测量[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(4): 041102.
- [4] Cai W J, Cao Y P, Fu G K, et al. A full-field compensation method for nonlinear phase error[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(3): 0312001.  
蔡文娟, 曹益平, 付光凯, 等. 一种非线性相位误差的全场补偿方法[J]. *光学学报*, 2019, 39(3): 0312001.
- [5] Cui Y J, Zhang W F, Li J X, 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.
- [6] Song Z. Comparative study on passive and active projector nonlinear Gamma calibration[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(13): 3834-3841.
- [7] Shi B, Liu H L, Ma Z J. Phase error correction method based on multi-level fringe order correction[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(17): 171201.  
石博, 刘宏立, 马子骥. 基于多级条纹级数修正的相位误差校正方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(17): 171201.
- [8] Liu F, Li J X, Lai J L, et al. Full-frequency phase unwrapping algorithm based on multi-frequency heterodyne principle[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(1): 011202.  
刘飞, 李佳鑫, 赖俊霖, 等. 基于多频外差的全频解相方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(1): 011202.
- [9] Yu H T, Zheng D L, Fu J A, et al. Deep learning-based fringe modulation-enhancing method for accurate fringe projection profilometry[J]. *Optics Express*, 2020, 28(15): 21692-21703.
- [10] 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.
- [11] Shi C. Research on three dimensional reconstruction of multi frequency phase shifted structured light[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2019.  
石础. 多频相移结构光的三维重建技术研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2019.
- [12] Cho C S, Han J. Phase error reduction for multi-frequency fringe projection profilometry using adaptive compensation[J]. *Current Optics and Photonics*, 2018, 2(4): 332-339.
- [13] Liu C, Gai S Y, Da F P. Sub-regional phase error compensation for structural light measurement[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(6): 0604002.  
刘超, 盖绍彦, 达飞鹏. 结构光测量中分区域相位误差补偿方法研究[J]. *中国激光*, 2018, 45(6): 0604002.
- [14] Song J W, Lau D L, Ho Y S, et al. Automatic look-up table based real-time phase unwrapping for phase measuring profilometry and optimal reference frequency selection[J]. *Optics Express*, 2019, 27(9): 13357-13371.
- [15] Mao C L, Lu R S. Inverse error compensation method for improvement of phase recovery accuracy of multi-frequency fringe projection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(4): 0412005.  
毛翠丽, 卢荣胜. 提高多频条纹投影相位提取精度的反向误差补偿法[J]. *光学学报*, 2018, 38(4): 0412005.
- [16] 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.
- [17] Chen H L, Yin Y K, Cai Z W, et al. Suppression of the nonlinear phase error in phase shifting profilometry: considering non-smooth reflectivity and fractional period[J]. *Optics Express*, 2018, 26(10): 13489-13505.
- [18] Srinivasan V, Liu H C, Halioua M. Automated phase-measuring profilometry of 3-D diffuse objects[J]. *Applied Optics*, 1984, 23(18): 3105-3108.



- [19] Huntley J M, Saldner H. Temporal phase-unwrapping algorithm for automated interferogram analysis[J]. *Applied Optics*, 1993, 32(17): 3047-3052.
- [20] Yao J, Xiong C, Zhou Y, et al. Phase error elimination considering gamma nonlinearity, system vibration, and noise for fringe projection profilometry [J]. *Optical Engineering*, 2014, 53(9): 094102.
- [21] Cai Z W, Liu X L, Peng X, et al. Phase error compensation methods for high-accuracy profile measurement[J]. *Measurement Science and Technology*, 2016, 27(4): 045201.