

# 基于时空域相移法的高精度三维形状测量

李志远\*, 王庆华, 夏鹏

产业技术综合研究所分析测量标准研究部门, 日本 筑波 305-8568

**摘要** 相移法是分析条纹图案相位信息的一种有力工具。介绍新开发的时空域相移法(ST-PSM)的基本原理和在非接触式三维形状测量中的应用。模拟结果表明,ST-PSM可以大幅减少随机噪声,同时可以消除图像传感器的非线性响应、动态范围小等对测量结果的影响。实验结果表明ST-PSM在曝光极端不足的情况下可以进行稳定的非接触形状测量。

**关键词** 三维光学测量; 相位分析; 傅里叶变换; 时空分析; 形状测量

中图分类号 TB96 文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP223427

## High-Precision 3D Shape Measurement Using Spatiotemporal Phase-Shifting Method

Ri Shien\*, Wang Qinghua, Xia Peng

Research Institute for Measurement and Analytical Instrumentation, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, Tsukuba 305-8568, Japan

**Abstract** The phase-shifting method is a powerful tool for analyzing the phase information of fringe patterns. This paper presents the fundamental principle of the newly developed spatiotemporal phase-shifting method (ST-PSM) and its applications in non-contact three-dimensional shape measurement. The simulation results show that ST-PSM can significantly reduce random noise, and eliminate the influence of nonlinear response and small dynamic range of image sensor on the measurement results. The experimental results show that ST-PSM can perform stable non-contact shape measurement under extremely low exposure conditions.

**Key words** three-dimensional optical metrology; phase analysis; Fourier transform; spatiotemporal analysis; shape measurement

## 1 引言

人体测量、元件检查、自动生产等很多领域对物体的三维形状测量技术有着极大的需求<sup>[1-2]</sup>。目前三维形状测量技术大致可分为接触式和非接触式。接触式方法一般利用探针在物体表面进行机械式的扫描以获取三维坐标。该方法虽然可以实现稳定的高精度测量,但很难适用于表面较软或探针扫描无法完全覆盖到的物体。

条纹投影技术是一种广泛使用的非接触的三维形状测量技术<sup>[3-4]</sup>。这种方法一般将均匀的条纹或网格图案投射到要测量的物体表面,由于物体表面高低的变化会使投射的条纹发生扭曲,通过对这些扭曲的条纹图案进行相位分析便可以获得物体表面的轮廓信息。比较常用的相位分析技术有基于空域的傅里叶

变换解析法和基于时域的相移法。在基于空域的傅里叶变换法中,对条纹图像进行傅里叶变换使背景项与形状项信号发生分离,然后提取形状项信号以获取相位信息。该方法只需要 1 幅条纹图便可进行相位分析,适用于测量动态的物体。基于空域的相位分析方法除了傅里叶变换法<sup>[5]</sup>外,代表性的还有加窗傅里叶变换法<sup>[6]</sup>和采样云纹(摩尔条纹)法<sup>[7]</sup>。基于时域的相移技术<sup>[8-11]</sup>通过在时域改变光场的相位,同时使用摄像机记录并储存这些变化的条纹图像,随后通过相移逐个像素地分析,解调相位信息。该方法可以充分利用条纹图中的灰度信息,与基于空域的方法相比,有着更高的分辨率。但是,该技术因为逐个像素地解调相位信息,易受到相机随机噪声的影响。对此,本课题组开展了进一步研究,提出了一种时空域相移技术<sup>[12-13]</sup>。该技术结合了基于空域的采样云纹法和基于时域的相

收稿日期: 2022-12-29; 修回日期: 2023-02-04; 录用日期: 2023-03-01; 网络首发日期: 2023-03-09

基金项目: 日本学术振兴会(JSPS)科学研究费补助金(20H02038)

通信作者: \*ri-shien@aist.go.jp

移法,充分利用了空域与时域的灰度信息,可实现高精度的三维形状测量。另外相位分析可以应用于各种领域,如基于云纹技术的高灵敏和全场变形测量<sup>[14]</sup>、基于相移激光显微镜的非接触折射率测量<sup>[15]</sup>、基于相移数字全息技术的三维重建<sup>[16]</sup>或纳米级变形测量<sup>[17]</sup>、用于非破坏性测试和生物医学的 X 射线干涉仪<sup>[18-19]</sup>。因此,时空域相移法(ST-PSM)可以为这类应用提供一个有力的分析工具。

本文将介绍时空域相移技术的原理和特点。模拟和实验结果表明,与传统的相移方法相比,ST-PSM在减少相机的随机噪声、降低非线性响应、减小动态范围方面有着更出色的表现。该方法即使在物体反射率很低和很高的混合条件下也能实现稳定的三维形状测量。

## 2 条纹图像的相位分析技术

### 2.1 相位分析的概述和类型

如图 1 所示,条纹图像的相位分析技术可分为基于空域的与基于时域的技术两大类。基于空域的相位分析技术从 1 幅条纹图的灰度信息中便可计算出相位分布,适用于动态测量。除了傅里叶变换法<sup>[5]</sup>,加窗傅里叶变换法<sup>[6]</sup>和采样云纹法<sup>[7]</sup>都是代表性的空域相位分析方法。

另一方面,基于时域的相位分析方法通常称为相移法(PSM)<sup>[8-11]</sup>。该方法通过采集多幅相移的条纹图并对其进行相移计算来获取相位信息,可以实现更高的分辨率。目前,学者们已经提出了多种相移计算方法,其中具有代表性的有恒速相移法、三步相移法和四步相移法。通过增加相移条纹图的数量可以减小强度非线性带来的误差,因此五步和七步相移法也得到了讨论。然而,并不是采集的相移条纹图的数量越多越好,同时需要考虑系统的测量速度与计算资源的问题。因此,以较少的相移数量实现精确、稳定测量的技术更

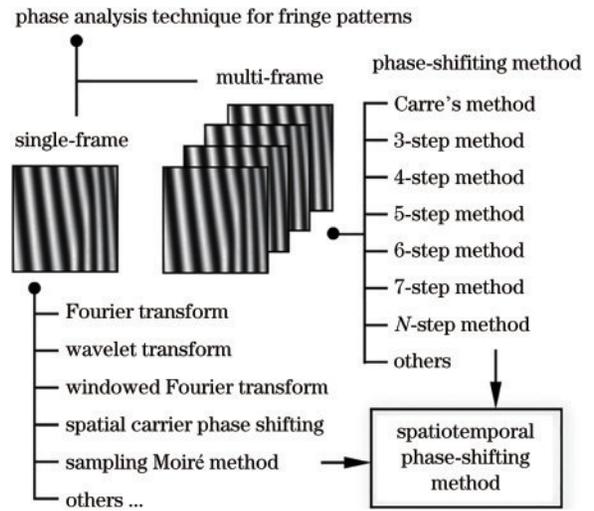


图 1 条纹图像的相位分析方法

Fig. 1 Phase analysis methods for fringe pattern

受青睐。

首先,介绍  $N$  步相移法的计算原理。这是一种常见的基于时域的相位分析方法<sup>[4]</sup>。这种方法对具有余弦分布的光栅图案进行  $N$  步等相移量相移,同时用摄像机拍摄并储存每次相移的光栅图案。拍摄的光栅图像的光强度分布为

$$I(x, y; n) = a(x, y) \cos \left[ 2\pi \frac{x}{P(x, y)} + \frac{2\pi n}{N} + \varphi_0 \right] + b(x, y) \cos \left[ \varphi(x, y) + \frac{2\pi n}{N} \right] + b(x, y), \quad n = 0, 1, 2, \dots, N-1, \quad (1)$$

式中:  $(x, y)$  为相机上拍摄图像的坐标;  $N$  为相移步数;  $2\pi n/N$  为第  $n$  幅条纹的相移量;  $P$  为条纹间距。基于最小二乘方法的原理,可以从这些相移的条纹分布中解出振幅  $a$ 、背景  $b$  和相位值  $\varphi$ , 分别为

$$a(x, y) = \frac{2}{N} \sqrt{\left[ \sum_{n=0}^{N-1} I(x, y; n) \cos \frac{2\pi n}{N} \right]^2 + \left[ \sum_{n=0}^{N-1} I(x, y; n) \sin \frac{2\pi n}{N} \right]^2}, \quad (2)$$

$$b(x, y) = \frac{1}{N} \left[ \sum_{n=0}^{N-1} I(x, y; n) \right], \quad (3)$$

$$\varphi(x, y) = \arg \left[ \sum_{n=0}^{N-1} I(x, y; n) \exp \left( -j \frac{2\pi n}{N} \right) \right] = \arctan \frac{\text{Im} [F(x, y; 1)]}{\text{Re} [F(x, y; 1)]} - \arctan \frac{\sum_{n=0}^{N-1} f(x, y; n) \sin(2\pi n/N)}{\sum_{n=0}^{N-1} f(x, y; n) \cos(2\pi n/N)}. \quad (4)$$

其次,描述采样云纹法的原理<sup>[7, 20]</sup>。该方法是一种基于空域的分析方法,只用 1 幅条纹图像就可以进行相位分析。在采样云纹法中,以最接近于条纹间距

$P$  的整数  $M$  为采样间隔对条纹图像进行降采样,并对降采样过程中缺失的数据进行内插值。通过改变采样的起点便可获得多幅光滑的相移云纹图像,如图 2 所示,其灰度分布为

$$I_m(x, y; m) = a \cos \left[ 2\pi \left( \frac{1}{P} - \frac{1}{M} \right) x + 2\pi \frac{m}{M} + \varphi_0 \right] + b = a \cos \left[ \varphi_m(x, y) + 2\pi \frac{m}{M} \right] + b, \quad m = 0, 1, \dots, M-1. \quad (5)$$

利用式(4)对相移的云纹灰度分布进行相移计算,可得到云纹条纹的相位分布,即

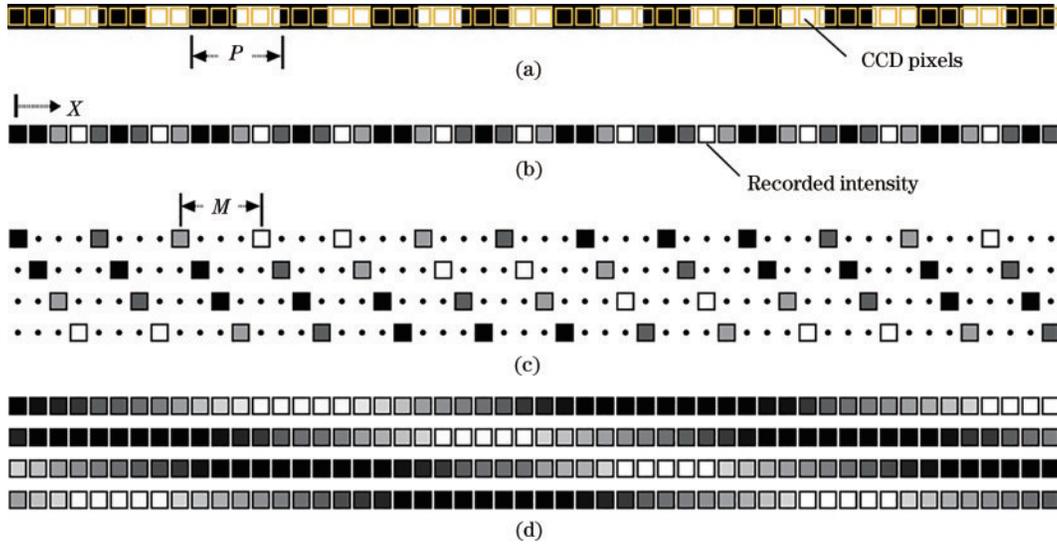


图 2 采样云纹法的原理<sup>[21]</sup>。(a) CCD 相机的一行像素；(b) 降采样处理；(c) 内插处理；(d) 生成的多个相移云纹  
 Fig. 2 Principle of the sampling Moiré method<sup>[21]</sup>. (a) One line of pixels from a CCD camera; (b) down-sampling; (c) intensity interpolation; (d) generated multiple phase-shifting Moiré fringes

$$\varphi_m(x, y) = -\arctan \frac{\sum_{m=0}^{M-1} I_m(x, y; m) \sin\left(2\pi \frac{m}{M}\right)}{\sum_{m=0}^{M-1} I_m(x, y; m) \cos\left(2\pi \frac{m}{M}\right)} \quad (6)$$

由于采样云纹相位是通过从光栅的相位分布中减去降采样相位得到的,在云纹相位分布加上降采样相位便可得到原始条纹图像的相位分布,公式为

$$\varphi(x, y) = \varphi_m(x, y) + 2\pi \frac{x}{M} \quad (7)$$

### 2.2 时空域相移法的分析原理

将相移法和采样云纹法相结合,提出了性能更稳定的时空域相移法(ST-PSM)<sup>[12-13]</sup>。传统相移法和时空域相移法的测量原理如图 3 所示。传统的相移方法只使用了条纹图中时域上的灰度信息,而时空域方法

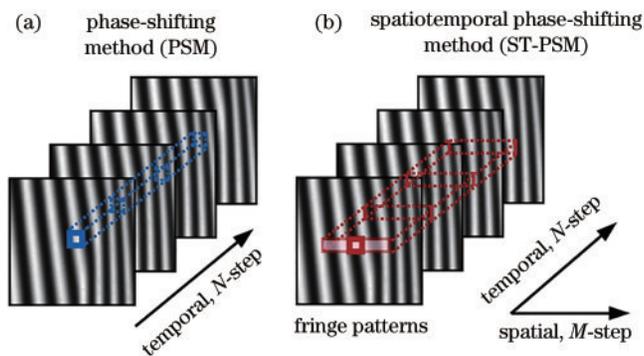


图 3 传统相移法和时空域相移法的原理。(a) 传统相移法；(b) 时空域相移法  
 Fig. 3 Measurement principles of the conventional phase-shifting method and the spatiotemporal phase-shifting method. (a) Conventional phase-shifting method; (b) spatiotemporal phase-shifting method

在此基础上又利用了每一幅条纹图中空域上的灰度信息。时空域相移法的数据处理共分 4 个步骤,如图 4 所示。第一步与传统的相移法相同,首先采集  $N$  幅相移的条纹图像。其次,利用传统的相移法通过式(2)和式(3)得到条纹图案的振幅和背景,然后对这些相移的条纹图像进行归一化处理,其灰度分布可写为

$$\bar{I}(x, y; n) = \frac{I(x, y; n) - b(x, y)}{a(x, y)} = \cos\left\{2\pi \frac{x}{P(x, y)} + \varphi_0(x, y) + 2\pi \frac{n}{N}\right\} \quad (8)$$

下一步,对  $N$  幅归一化后的相移条纹图像分别进行采样云纹处理。假定降采样间隔为  $M$  像素,则经过降采样与内插值处理后,可以获得  $M \times N$  幅相移云纹图像,其灰度分布为

$$\bar{I}_m(x, y; m, n) = \cos\left[2\pi \left(\frac{1}{P(x, y)} - \frac{1}{M}\right)x + 2\pi \frac{m}{M} + 2\pi \frac{n}{N} + \varphi_0(x, y)\right] = \cos\left[\bar{\varphi}_m(x, y) + 2\pi \frac{m}{M} + 2\pi \frac{n}{N}\right], \quad m = 0, 1, \dots, M-1, n = 0, 1, \dots, N-1. \quad (9)$$

通过对  $M \times N$  幅云纹图像进行二维离散傅里叶变换,可得云纹条纹的相位分布,为

$$\bar{\varphi}_m(x, y) = -\arctan \frac{\sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} \bar{I}_m(x, y; m, n) \sin\left(2\pi \frac{m}{M} + 2\pi \frac{n}{N}\right)}{\sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} \bar{I}_m(x, y; m, n) \cos\left(2\pi \frac{m}{M} + 2\pi \frac{n}{N}\right)} \quad (10)$$

与式(7)原理相同,原始条纹相位的计算公式为

$$\bar{\varphi}(x, y) = \bar{\varphi}_m(x, y) + 2\pi \frac{x}{M} \quad (11)$$

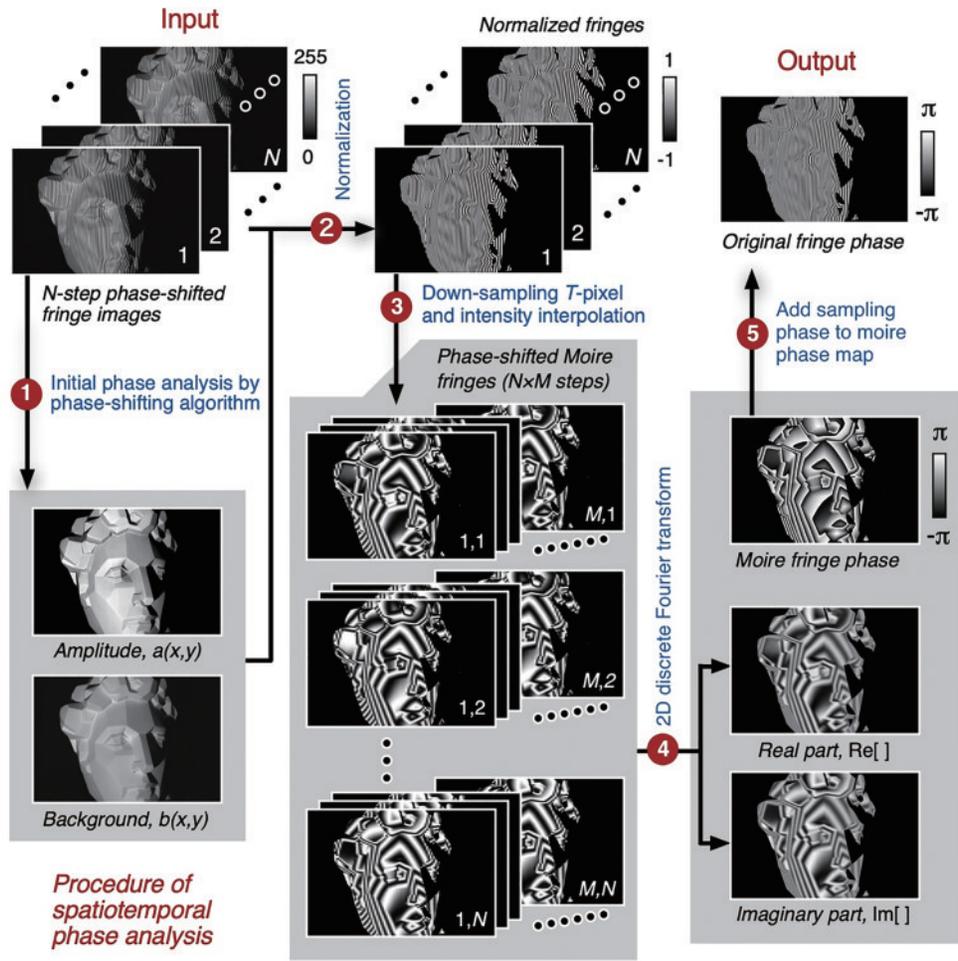


图 4 时空域相移法的数据处理步骤<sup>[12]</sup>

Fig. 4 Image processing procedure of the ST-PSM<sup>[12]</sup>

### 3 模拟实验

时空域相移法同时利用时域和空域上的灰度信息来计算条纹图像的相位分布,成为一种可对抗随机噪声的稳健分析方法,即使在恶劣的测量条件下也能进行准确的相位分析。为了确认该方法抗干扰的特性,进行以下模拟。

模拟条件如下:首先创建一个条纹间距  $P$  为 10 个像素的余弦条纹图像,并将其相移 4 步,之后分别用传统相移法和时空域相移法进行分析,确定分析结果与理论相位值间的误差。

$$g_0(x, y; n) = 0.5 + 0.5 \cos\left(2\pi \frac{x}{P} + \varphi_0 + 2\pi \frac{n}{N}\right), \quad (12)$$

式中:  $g_0$  为灰度范围从 0 到 1 的理想的余弦条纹图像的灰度分布。在条纹投影形状测量的实验中,由于相机或投影仪的特性,输入光强和输出光强的关系往往不是线性的。为了研究这种非线性响应导致的相位分析误差,通过改变非线性因子  $\gamma$ , 在  $\gamma = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1, 2, 3, 4, 5$  的 9 种条件下,得到了包含 2% 随机噪声(模拟实验中的相机噪声)的条纹图像的相位的均方根(RMS)误差。

$$g_1(x, y; n) = \{g_0(x, y; n)\}^\gamma + \sigma_{\text{noise}}, \quad (13)$$

式中:  $g_1$  为引入亮度非线性系数后的条纹图像。此外,在测量局部高反射率物体的形状时,由于相机动态范围的限制,会发生局部过度饱和的现象。因此,比较了饱和度  $S$  增量为 0.05、范围从 0 到 0.95 的不同亮度饱和度和水平下的 RMS 相位误差,表达式为

$$g_2(x, y; n) = 255 \{g_1(x, y; n) + S\}, \quad (14)$$

$$g_s(x, y; n) = \begin{cases} g_2(x, y; n), & g_2(x, y; n) \leq 255 \\ 255, & g_2(x, y; n) > 255 \end{cases}, \quad (15)$$

式中:  $g_2$  为引入亮度饱和度后的条纹图像;  $g_s$  为像素深度为 8 位的灰度图像。图 5(a) 为当非线性因子  $\gamma$  从 0.2 到 5 变化时, RMS 相位误差的比较结果。当使用传统的相移方法进行分析时,非线性越强,相位周期性误差越大。相比之下,时空域相移法的相位误差小于 0.01 rad, 这结果表明时空域相移法受非线性的影响很小,可实现更稳定的测量。另外,为了确认对较复杂物体的测试效果,在亮度饱和度的模拟中利用 Matlab 软件的 peaks 函数使物体表面产生了微小的扭曲。图 5(b) 为当亮度饱和度从 0 到 0.95 改变时的 RMS 相位误差的比较结果。虽然相位误差随着亮度饱和度的

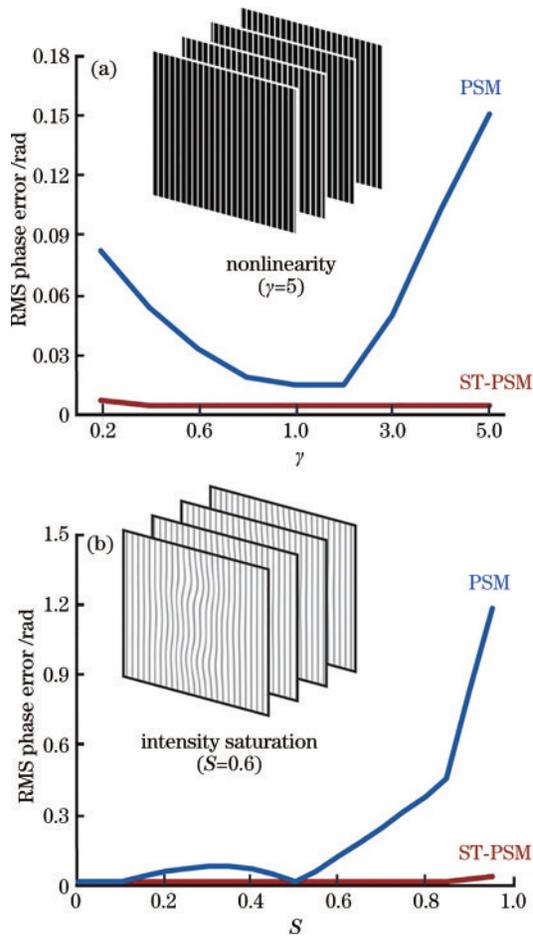


图 5 模拟结果。(a)亮度非线性;(b)亮度饱和度  
Fig. 5 Simulation results. (a) Intensity nonlinearity;  
(b) intensity saturation

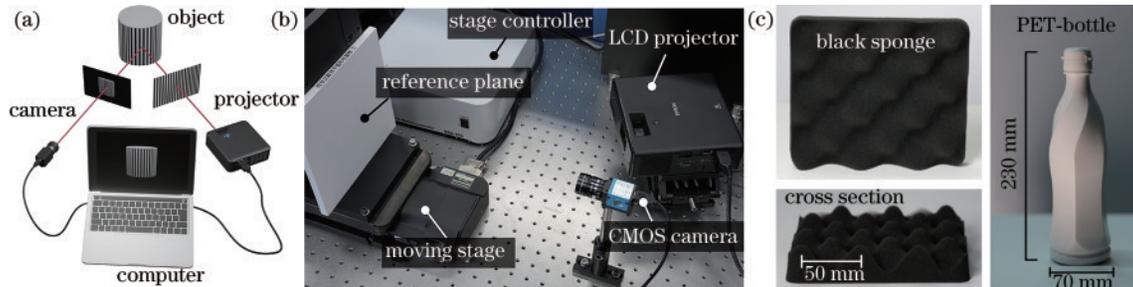


图 6 基于条纹投影法的非接触式三维形状测量装置。(a) 实验示意图;(b) 实验设备图;(c) 被测量物体  
Fig. 6 Non-contact three-dimensional shape measuring device based on fringe projection method. (a) Experiment diagram; (b) device photo; (c) measured object

图 7(a)为相机曝光时间为 0.02 s 时拍摄的条纹图像(只显示了条纹间距为 16 pixel 的四步相移图像中的第一张)。具有高反射率的白色 PET 瓶的条纹图像有良好对比度,具有低反射率的黑色海绵的条纹图像有极低对比度。当增加相机曝光时间到 0.2 s 时,拍摄的条纹图像中具有低反射率的黑色海绵有更好的对比度,而具有高反射率的白色 PET 瓶则发生过度饱和的现象,如图 7(d)所示。采用 19 pixel 的降采样间距,对图 7(a)和图 7(d)进行降采样,获得的采样云纹如图 7(b)和图 7(e)所示(仅显示  $M \times N$  幅相移云纹图像

增加而增加,但从结果可以看出,时空域相移法受亮度饱和度的影响小于传统相移法。

#### 4 形状测量实验

基于条纹投影法的非接触式三维形状测量的系统和装置照片如图 6(a)和图 6(b)所示。在实验中,一台投影仪(EPSON EF-11, 1920×1080 像素)用于投射条纹图案,一台相机(DMK23UP1300, ImagingSource 公司)用于采集条纹图像,一个精密自动平移台(HST-100X, Sigma Koki 公司,定位精度为 7  $\mu\text{m}$ )用于移动参考平面,一个平移台控制器(HSC-103, Sigma Koki 公司)用于控制平移台。此外,一个表面高度平整的陶瓷参考平面被用来校准相位差和高度间的关系。在实验中分别投射了条纹间距为 16 pixel 和 18 pixel(间距比为 8:9)的两种条纹图案,基于双频外差的计算原理<sup>[22]</sup>,通过对两种条纹间距图像的相位分布进行相位连接计算,扩大了深度方向上的测量范围。

在校准实验中,参考平面在高度方向从 0 mm 到 100 mm 逐步移动 10 mm。在每个位置上,分别投射了两种条纹间距的 4 幅相移的条纹图案,其相移量为  $\pi/2$ 。因此,在每个位置上采集了条纹间距为 16 pixel 的 4 幅相移的条纹图像,和条纹间距为 18 pixel 的 4 幅相移的条纹图像。然后,分别使用传统相移法、采样云纹法和时空域相移法对两种条纹间距的条纹图像进行相位分析,并通过相位连接计算得到相位解包络后的相位分布。图 6(c)为实验中被测量物体的照片。黑色海绵的表面有着周期性的起伏变化。

的第一张)。图 7(c)和图 7(f)分别为图 7(b)和图 7(e)中云纹条纹的相位分布的测量结果。

图 8 为相机曝光时间为 0.02 s 和 0.2 s 时的利用 3 种相位解析方法得到的条纹相位分布的比较结果。图 9 为图 8 的梯度分布结果。实验中被测量物体的面形变化较为平缓,理论上其相位的梯度分布应该较为平滑。但从图 9 的梯度分布中可以看出,PSM 和 SM 得到的相位梯度的变化远大于 ST-PSM。因此 ST-PSM 可以实现更高精度的相位分析。

图 10 为 3 种方法对高反射率的白色 PET 塑料瓶

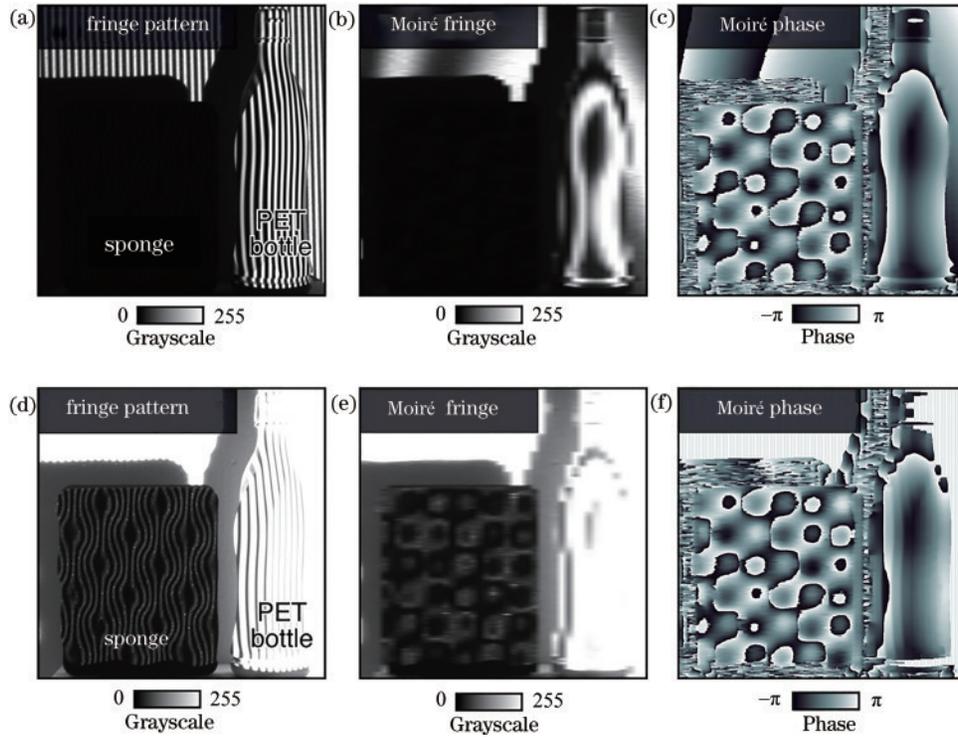


图 7 对采样云纹的分析结果。(a)~(c)相机曝光时间为 0.02 s 时拍摄的条纹图像、采样云纹图像和采样云纹的相位分布；  
(d)~(f)相机曝光时间为 0.2 s 时拍摄的条纹图像、采样云纹图像和采样云纹的相位分布

Fig. 7 Analysis results of Moiré fringe and Moiré phase. (a)~(c) Recorded image, Moiré fringe, and Moiré phase distribution when the camera exposure time is 0.02 s; (d)~(f) recorded image, Moiré fringe, and Moiré phase distribution when the camera exposure time is 0.2 s

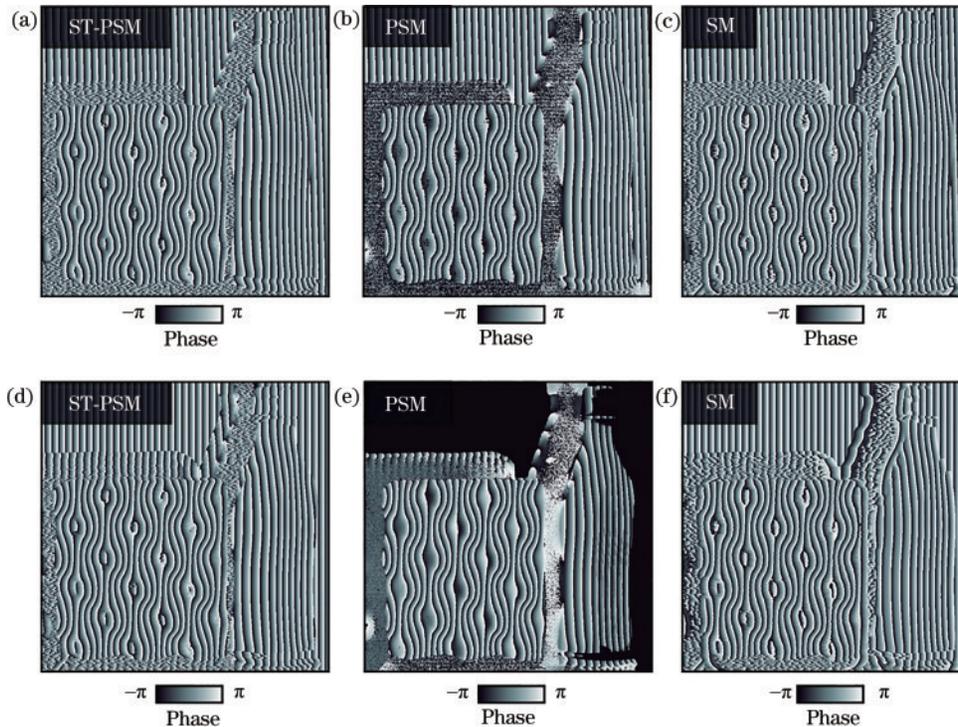


图 8 相位分布结果。(a)~(c)相机曝光时间为 0.02 s 时 ST-PSM、PSM 和 SM 得到的相位分布结果；(d)~(f)相机曝光时间为 0.2 s 时 ST-PSM、PSM 和 SM 得到的相位分布结果

Fig. 8 Phase distribution results. (a)~(c) Phase distribution results obtained by ST-PSM, PSM, and SM when the camera exposure time is 0.02 s; (d)~(f) phase distribution results obtained by ST-PSM, PSM, and SM when the camera exposure time is 0.2 s

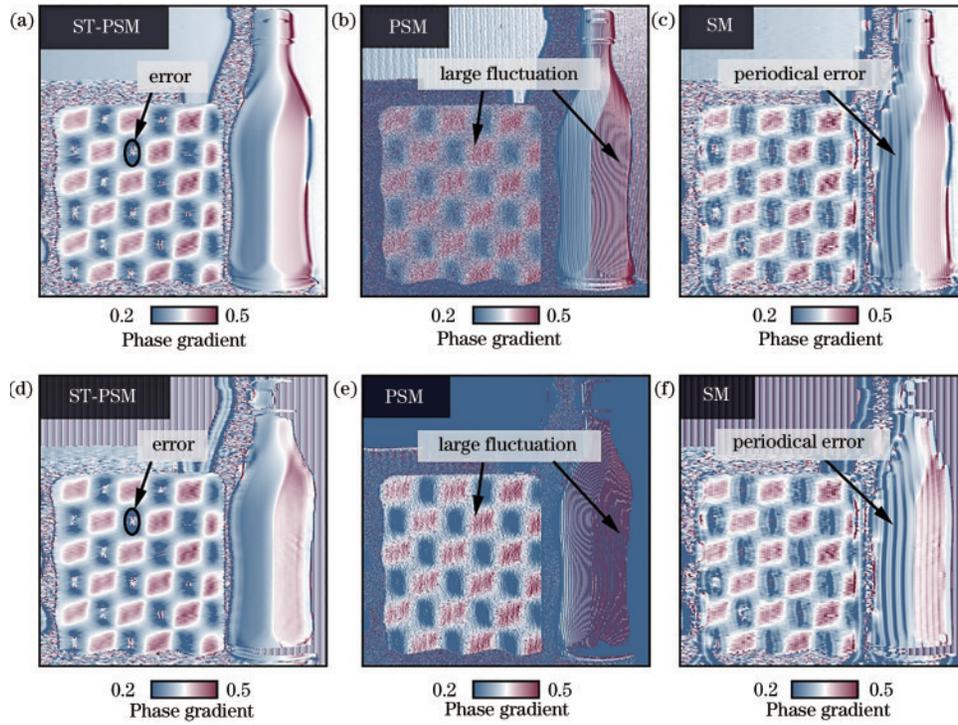


图 9 相位梯度分布结果。(a)~(c)相机曝光时间为 0.02 s 时 ST-PSM、PSM 和 SM 得到的相位梯度分布结果；(d)~(f)相机曝光时间为 0.2 s 时 ST-PSM、PSM 和 SM 得到的相位梯度分布结果

Fig. 9 Phase gradient distribution results. (a)~(c) Phase gradient distribution results obtained by ST-PSM, PSM, and SM when the camera exposure time is 0.02 s; (d)~(f) phase gradient distribution results obtained by ST-PSM, PSM, and SM when the camera exposure time is 0.2 s

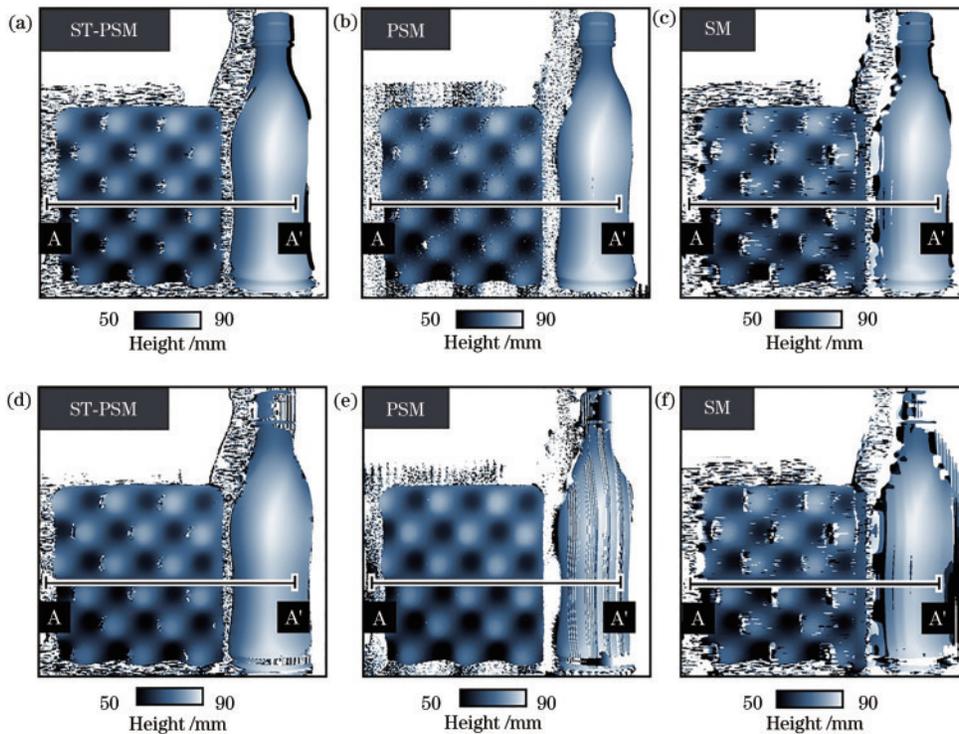


图 10 高度分布结果。(a)~(c)相机曝光时间为 0.02 s 时 ST-PSM、PSM 和 SM 得到的高度分布结果；(d)~(f)相机曝光时间为 0.2 s 时 ST-PSM、PSM 和 SM 得到的高度分布结果

Fig. 10 Height distribution results. (a)~(c) Height distribution results obtained by ST-PSM, PSM, and SM when the camera exposure time is 0.02 s; (d)~(f) height distribution results obtained by ST-PSM, PSM, and SM when the camera exposure time is 0.2 s

和低反射率的黑色海绵同时测量的高度分布的测量结果。在这些条件下,传统相移法分析的结果如图 10(b)和图 10(e)所示,可以看出,传统相移法在图 7(a)左侧条纹图像的低对比度区域和图 7(d)右侧亮度过度饱和区域存在较大的测量误差。如图 10(c)和图 10(f)所示,只利用空域灰度信息的采样云纹法得到的结果中同样存在大量的误差。相比之下,时空域相移法都可以精确地测量海绵和 PET 瓶的高度分布,如图 10(a)和图 10(d)所示。但应该注意的是,与传统相移法相比,时空域相移法在时域的基础上利用了空域上的灰度信息,这略微降低了测量的空间分辨率。此外,对于网格间距小于采样间距的 1/2 或大于 2 倍的条纹图像,ST-PSM 不能正确分析其相位。因此,ST-

PSM 不适用于测量面形变化非常陡峭的物体。

沿图 10 中水平线 AA' 的横截线数据如图 11 所示。可以看出:时空域相移法在相机曝光时间为 0.02 s 和 0.2 s 时都能提供精确的高度数据;传统相移法在相机曝光时间为 0.02 s 时可以测量出 PET 塑料瓶的形状,但在低反射率的海绵区域却有大量周期性误差,另外,当相机曝光时间为 0.2 s 时,对海绵的形状测量结果较好,而高反射率的 PET 瓶由于亮度过度饱和而出现较大的测量误差;如图 11(e)和图 11(f)所示,采样云纹法很难获得正确的形状测量结果。实验结果表明,在被测量物体同时存在高反射率和低反射率区域时,即使在传统相移方法难以测量的条件下,所开发的时空域相移法也可实现精确的形状测量。

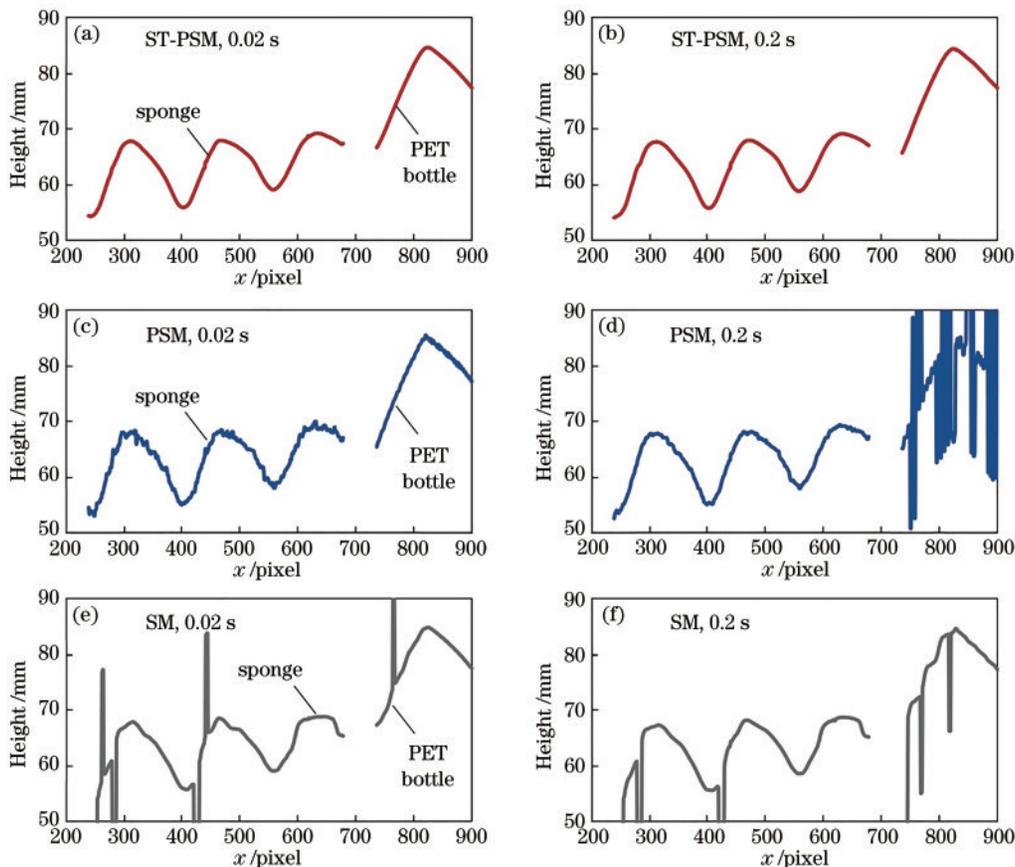


图 11 横截线 AA' 处的高度分布结果。(a)(b)相机曝光时间为 0.02 s 和 0.2 s 时,时空域相移法得到的结果;(c)(d)相机曝光时间为 0.02 s 和 0.2 s 时,相移法得到的结果;(e)(f)相机曝光时间为 0.02 s 和 0.2 s 时,采样云纹法得到的结果

Fig. 11 Results of height distribution at cross-sectional AA'. (a)(b) Results obtained by ST-PSM at camera exposure times of 0.02 s and 0.2 s; (c)(d) results obtained by PSM at camera exposure times of 0.02 s and 0.2 s; (e)(f) results obtained by SM at camera exposure times of 0.02 s and 0.2 s

## 5 结 论

介绍了时空域相移法的原理。这种方法的特点是:除了利用每个像素在时域上的相移灰度信息外,还利用每幅条纹图像空域上相移的云纹条纹的灰度信息。利用基于时域与空域的二维离散傅里叶变换来计算相位分布,从而对条纹图像的相位分析更为稳定和

精确。时空域相移法被应用于条纹投影法中,对物体进行三维非接触式形状测量,模拟和实验结果表明,即使在低反射率或灰度过度饱和的情况下,时空域相移法也能实现稳定的三维形状测量。

## 参 考 文 献

- [1] Chen F, Brown G M, Song M M. Overview of 3-D

- shape measurement using optical methods[J]. *Optical Engineering*, 2000, 39(1): 10-22.
- [2] Gorthi S S, Rastogi P. Fringe projection techniques: whither we are? [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2010, 48(2): 133-140.
- [3] Zhang S. Recent progresses on real-time 3D shape measurement using digital fringe projection techniques[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2010, 48(2): 149-158.
- [4] Zuo C, Feng S J, Huang L, et al. Phase shifting algorithms for fringe projection profilometry: a review[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2018, 109: 23-59.
- [5] Takeda M, Ina H, Kobayashi S. Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1982, 72(1): 156-160.
- [6] Qian K M. Windowed Fourier transform for fringe pattern analysis[J]. *Applied Optics*, 2004, 43(13): 2695-2702.
- [7] Ri S, Fujigaki M, Morimoto Y. Sampling Moiré method for accurate small deformation distribution measurement [J]. *Experimental Mechanics*, 2010, 50(4): 501-508.
- [8] Bruning J H, Herriott D R, Gallagher J E, et al. Digital wavefront measuring interferometer for testing optical surfaces and lenses[J]. *Applied Optics*, 1974, 13(11): 2693-2703.
- [9] Morimoto Y, Fujisawa M. Fringe pattern analysis by a phase-shifting method using Fourier transform[J]. *Optical Engineering*, 1994, 33(11): 3709-3714.
- [10] Buytaert J A N, Dirckx J J J. Study of the performance of 84 phase-shifting algorithms for interferometry[J]. *Journal of Optics*, 2011, 40(3): 114-131.
- [11] Hack E, Burke J. Invited review article: measurement uncertainty of linear phase-stepping algorithms[J]. *The Review of Scientific Instruments*, 2011, 82(6): 061101.
- [12] Ri S, Wang Q H, Xia P, et al. Spatiotemporal phase-shifting method for accurate phase analysis of fringe pattern[J]. *Journal of Optics*, 2019, 21(9): 095702.
- [13] Ri S, Takimoto T, Xia P, et al. Accurate phase analysis of interferometric fringes by the spatiotemporal phase-shifting method[J]. *Journal of Optics*, 2020, 22(10): 105703.
- [14] Wang Q H, Ri S, Tsuda H. Digital sampling Moiré as a substitute for microscope scanning Moiré for high-sensitivity and full-field deformation measurement at micron/nano scales[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(25): 6858-6865.
- [15] Endo J, Chen J, Kobayashi D, et al. Transmission laser microscope using the phase-shifting technique and its application to measurement of optical waveguides[J]. *Applied Optics*, 2002, 41(7): 1308-1314.
- [16] Tahara T, Mori R, Arai Y, et al. Four-step phase-shifting digital holography simultaneously sensing dual-wavelength information using a monochromatic image sensor[J]. *Journal of Optics*, 2015, 17(12): 125707.
- [17] Xia P, Wang Q H, Ri S, et al. Calibrated phase-shifting digital holography based on a dual-camera system[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(23): 4954-4957.
- [18] Bonse U, Hart M. An X-ray interferometer with long separated interfering beam paths[J]. *Applied Physics Letters*, 1965, 7(4): 99-100.
- [19] Momose A, Takeda T, Itai Y, et al. Phase-contrast X-ray computed tomography for observing biological soft tissues[J]. *Nature Medicine*, 1996, 2(4): 473-475.
- [20] Ri S, Muramatsu T. Theoretical error analysis of the sampling Moiré method and phase compensation methodology for single-shot phase analysis[J]. *Applied Optics*, 2012, 51(16): 3214-3223.
- [21] Ri S, Muramatsu T, Saka M, et al. Accuracy of the sampling Moiré method and its application to deflection measurements of large-scale structures[J]. *Experimental Mechanics*, 2012, 52(4): 331-340.
- [22] Gushov V I, Solodkin Y N. Automatic processing of fringe patterns in integer interferometers[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 1991, 14(4/5): 311-324.