

# 随机相移阴影莫尔法研究

杜虎兵\*, 张少锋, 宇建红, 李军宁

西安工业大学机电工程学院, 陕西 西安 710021

**摘要** 相移阴影莫尔是一项成熟的物体表面三维轮廓测量技术,但是该技术的性能还有优化的空间。为了提高阴影莫尔技术的精度且不增加装置的复杂性,提出了一种随机相移阴影莫尔三维轮廓测量技术。所提方法采用立体视觉方法对阴影莫尔装置结构参数进行标定,运用 3 帧随机相移算法提取测量相位,从而极大地简化了现有阴影莫尔技术的测量过程。由于是基于随机相移思想,假定相邻帧条纹图间引入的相移不等且未知,因此所提方法可有效地降低相移器的应用要求。另外,所提方法在相位解调过程中不受背景光影响,且对条纹图非正弦光强分布不敏感,具有精度高、应用容易的特点。实验表明,所提方法精度高,速度快,优于现有的典型算法。

**关键词** 测量; 光学三维测量; 相位; 相移条纹图; 相移算法; 随机相移

中图分类号 O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0815010

## Research on Random Phase Shifting Shadow Moiré Technique

Du Hubing\*, Zhang Shaofeng, Yu Jianhong, Li Junning

School of Mechatronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an, Shaanxi 710021, China

**Abstract** The phase shifting shadow moiré is an efficient technique for three-dimensional (3D) object surface measurement, of which the performance can be improved further. This paper focuses on improving its measurement accuracy without adding the complication of the experimental set-up. An effective method, based on the idea of random phase shifting, is proposed. In the method, the parameters of shadow moiré system are calibrated by stereo vision technique and the phase of the fringe pattern is extracted by three-frame random phase shifting algorithm. We assume that the introduced phase shifting is unequal and unknown, so the stringent requirements for the shifter are relaxed. The proposed method can lower the application requirement of shadow moiré. Besides, the proposed method is not affected by the background light in the phase demodulation process, and is insensitive to the non-sinusoidal light intensity distribution of the fringe pattern, and has the advantages of high accuracy and easy application. Experiments show that the proposed method has high accuracy and high speed and is superior to the existing typical algorithms.

**Key words** measurement; optical three-dimensional measurement; phase; phase shifting fringe pattern; phase shifting algorithm; random phase shifting

**OCIS codes** 120.2650; 120.3940; 120.4120

## 1 引 言

阴影莫尔物体表面三维(3D)轮廓测量技术具有精度高、结构简单的特点,是一种高效的非接触测量方法。为了实现测量自动化,近年来,相移技术在阴影莫尔技术中得到了广泛的应用<sup>[1]</sup>。传统的相移阴影莫尔技术常采用多帧的  $\pi/2$  相移的方法,其原理为:改变实验参数,引起测量视场相位变化,使用摄像机记录该变化,最后经相位提取、相位展开、高

度映射等过程实现物体表面轮廓三维重建。传统的相移阴影莫尔技术在测量过程使用了较多的条纹图(如:3 帧、4 帧或者 5 帧),且使用了较多的测量信息,因此可获得精确的测量表面。但是该方法耗时长,需要事先精确地确定引入的相移量,同时还要求测量装置中使用的相移器重复性好、精度高<sup>[2-3]</sup>,从而在应用中增加了测量成本,且缺乏灵活性。

为了降低传统相移阴影莫尔技术对硬件性能和使用环境条件的要求,近年来,2 帧相移技术得到了

收稿日期: 2018-02-05; 修回日期: 2018-03-01; 录用日期: 2018-03-19

基金项目: 国家自然科学基金(61471288,51505361)、陕西省教育厅重点实验室基金(17JS059)

\* E-mail: duhubing@xatu.edu.cn

大量的研究<sup>[4-12]</sup>。假定空域上 2 帧相移技术各像素点引入的相移恒定,但时域上 2 帧相移条纹图间的相移可以是任意的,因而其又被称为随机相移技术<sup>[4-5]</sup>。由于引入的相移是随机的、未知的,随机相移技术极大地放宽了苛刻的测量要求,克服了上述多帧相移技术存在的问题。此外,相比单帧技术,随机相移技术的相位解调精度高,不存在符号模糊的问题,更容易满足一些场合的测量要求。Kreis 等<sup>[4]</sup>首先进行了随机相移技术相位解调研究,其方法基于傅里叶变换,简单、方便,但对噪音敏感。在螺旋相位变换(SPT)的基础上,Vargas 等<sup>[6]</sup>提出一种可靠的随机相移技术。该方法无须进行条纹图正则化处理,去除背景后,可直接获取测量相位。后来,为了减少计算时间,Vargas 等<sup>[7]</sup>又提出了基于克莱姆正交化技术的相位提取算法(GS)。GS 技术求解迅速,特性优良,但遗憾的是不能同时提取相移和测量相位,因而在需要输出相移的场合受到了限制。Trusiak 等<sup>[8]</sup>认为条纹背景去除、条纹图正则化和条纹图降噪等技术的性能对随机相移技术的测量结果至关重要,并发展了一种基于 Hilbert-Huang 变换的增强型 GS 方法。文献<sup>[9]</sup>对现有的 2 帧条纹图相移提取算法进行了详尽的综述,提出了一种基于反正弦函数的相移提取算法。Deng 等<sup>[10]</sup>提出了一种应用条纹图最大值与最小值比率的相位提取技术(EVI)。EVI 方法应用方便,即使在条纹图条纹数目小于 1 的条件下,也可快速地确定引入的相移。Liu 等<sup>[11]</sup>提出了一种 Lissajous 图和椭圆拟合算法,可同时实现相移和相位的解调。Wielgus 等<sup>[12]</sup>提出了一种相移面误差估计方法(TEE),有效地抑制了条纹图中线性不匀相移误差。该方法基于非线性函数优化,可减小相移线性全场不匀误差。

综上,至今研究人员基于数学变换和向量代数已经发展了大量的性能优良的 2 帧相移提取算法,且这些方法在一些光学测量方法中得到了成功的应用。虽然随机相移技术优势明显,但是受测量信息少、背景光调制、噪音等因素的影响,该技术的测量精度一般较低。特别是在背景光快变场合,随机相移技术的测量精度将进一步恶化。显然,为了提高测量精度、降低相移器标定要求并减少测量时间,在应用中发展一种 3 帧随机相移阴影莫尔技术比 2 帧随机相移技术或者多帧相移技术更重要。Xu 等<sup>[13]</sup>注意到了该问题,提出了一种基于欧氏距离的 3 帧一般相移技术。应当说明,在阴影莫尔三维轮廓技术中,摄取的条纹图具有复杂的光强分布<sup>[14]</sup>,然而

为了应用相移技术,又必须假定阴影莫尔条纹图光强具有正弦分布。该问题致使 Xu 等<sup>[13]</sup>提出的基于反正弦函数的算法在相移阴影莫尔技术中求解不稳定,从而产生了较大的测量误差。Yatabe 等<sup>[15]</sup>对椭圆拟合的相位提取技术进行了深入的研究和综述,结合主量分析(PCA)方法<sup>[5]</sup>,解决了在椭圆拟合相位提取技术中存在的计算复杂、速度慢、缺少明确的解析式等问题,发展了一种非迭代、灵活的相位提取技术。然而如何克服条纹图振幅空间变化对椭圆拟合精度影响的问题仍然没有得到很好的解决。

可见,虽然 3 帧随机相移技术较 2 帧随机相移技术应用性强,但是已发展算法还需要完善,无法为随机相移阴影莫尔技术的建立提供一种有效的途径。对此,本文对相移阴影莫尔技术进行了进一步研究,提出了一种基于 3 帧条纹图的随机阴影莫尔技术。该技术结合双目立体视觉方法对装置结构参数进行精确标定,通过不同帧条纹图差运算自然地去除条纹图背景光,运用反正切函数抑制条纹图光强非正弦性的影响,为发展一种随机的相移阴影莫尔技术提供了一种途径。另外,所提出的算法具有应用简单、精度高等特点,可应用于其他的光学测量方法中。

## 2 测量原理

### 2.1 相移阴影莫尔原理

所采用的阴影莫尔的实验结构原理如图 1 所示,其中包括:一个点光源,两个 CCD 摄像机和置于测量面上的罗奇光栅。在图 1 中主摄像机 CCD1 和辅助摄像机 CCD2 构成了双目视觉系统,其世界坐标系的原点设计为主相机的中心。光源置于双目视觉系统基线的中点处。测量时,通过控制光栅沿垂直光栅面方向运动为测量系统引入相移。

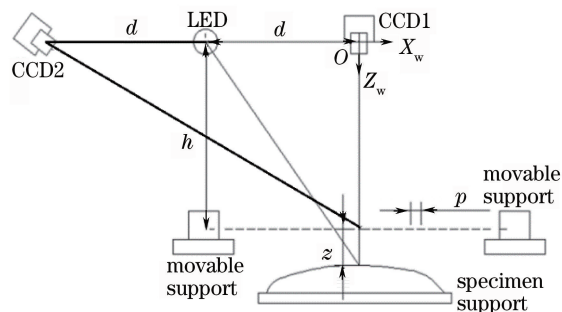


图 1 阴影莫尔测量系统原理图

Fig. 1 Schematic Block diagram of shadow moiré measurement system

与投影莫尔方法不同,阴影莫尔由于使用了一

个光栅,不能在光栅平面内通过移动光栅产生相移。如果改变其他参数,如改变光栅与被测物体间距,则引入的相移与高度相关,即全场相移不匀<sup>[15]</sup>。然而,在测量深度远小于摄像机中心与光栅间距的条件下,该非线性问题引起的误差可在一些测量任务中忽略。此时相机观察到的条纹图光强可以表述为<sup>[16-17]</sup>

$$I_n(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos[\phi(x, y) + \Delta_n] \quad (1)$$

式中: $a(x, y)$ 、 $b(x, y)$ 、 $\phi(x, y)$ 和 $\Delta_n$ 分别为背景、振幅、测量相位和引入的相移; $n=1, 2, 3$ 。不失一般性,可假定 $\Delta_0=0$ 。 $\phi(x, y)$ 和 $\Delta_n$ 可表述为

$$\phi(x, y) = \frac{2\pi dz}{p(h+z)}, \quad (2)$$

$$\Delta_n(x, y) = \frac{2\pi d \Delta h_n}{p(h+z)} \approx \frac{2\pi d \Delta h_n}{ph}, \quad (3)$$

式中: $p$ 为光栅周期; $h$ 为相机与光栅间距; $d$ 为摄像机中心与光源中心间距; $z$ 为被测的深度函数; $\Delta h_n$ 为移相时光栅移动的距离。可见,忽略相移-高度非线性关系后,引入的相移仅与光栅的移动距离成正比。为了表述清楚,文中省略了空间坐标 $(x, y)$ 。

显然已知结构参数和测量相位,被测的深度函数 $z$ 可表述为

$$z = \frac{ph\phi}{2\pi d - p\phi}. \quad (4)$$

## 2.2 结构参数标定

从图1可知,摄像机中心、光源中心均为虚拟点。该问题使得结构参数的标定难以定位。对此,文献[18]提出了基于双目视觉的结构参数标定方法,为解决阴影莫尔装置参数精确标定问题提供了一种途径。然而,采用文献[18]的结构在进行光源中心与摄像机中心标定时,需要将光源进行旋转,其标定过程比较复杂。为此,文献[18]将结构改进为如图1所示的结构,即将辅助相机与主相机设计为

沿光源中心的对称结构,其原理为:

1)应用张氏摄像机标定方法<sup>[19]</sup>对图1中双目视觉系统进行标定;

2)由摄像机标定获得的基线距离的一半即为光源中心与摄像机中心间距;

3)向光栅表面投射标记点(如4个),使用双目系统确定其在世界坐标系中的坐标;

4)应用得到的标记点坐标拟合光栅平面坐标方程;

5)确定原点(主相机中心)与光栅平面的间距,即为光源中心与光栅平面的间距。

应当说明,虽然图1中的结构难以保证完全对称,但是考虑到立体视觉测量误差、摄像机标定误差以及其他误差源的作用,且摄像机的测量精度可达微米量级,故图1中的结构由于不对称产生的误差是可以忽略的。

由于摄像机标定技术、双目视觉坐标测量技术均已为成熟技术,且文献[18]已经对提出的方法的标定精度进行了实验分析,因此上述方法是正确的、可行的。

## 2.2 随机相位提取技术

最近文献[20]提出了一种基于克莱姆正交化的相位解调技术,简化了阴影莫尔测量技术的复杂性。该技术是基于条纹图引入的相移相等且未知的数学模型。本研究进一步将其模型改进为引入的相移不等且未知,以进一步简化测量过程。对(1)式进行差运算得:

$$\begin{cases} I_{d_0} = (I_0 - I_1)/2 = b \sin\left(\frac{\Delta_1}{2}\right) \sin\left(\phi + \frac{\Delta_1}{2}\right) \\ I_{d_1} = (I_1 - I_2)/2 = b \sin\left(\frac{\Delta_2 - \Delta_1}{2}\right) \times \\ \sin\left(\phi + \frac{\Delta_1}{2} + \frac{\Delta_2}{2}\right) \end{cases}. \quad (5)$$

注意到(5)式中振幅项不等,对其进行正则化<sup>[21]</sup>得:

$$\begin{cases} I_{N_0} = I_{d_0} / \|I_{d_0}\| = \frac{b}{\|b \sin(\phi + \frac{\Delta_1}{2})\|} \sin\left(\phi + \frac{\Delta_1}{2}\right) \\ I_{N_1} = I_{d_1} / \|I_{d_1}\| = \frac{b}{\|b \sin(\phi + \frac{\Delta_1}{2} + \frac{\Delta_2}{2})\|} \sin\left(\phi + \frac{\Delta_1}{2} + \frac{\Delta_2}{2}\right) \end{cases}, \quad (6)$$

式中: $\|M\| = \sqrt{\sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y M(x, y)^2}$ 为矩阵范数运算, $M$

为任意变量; $X, Y$ 表示条纹图大小。由于测量中获得的条纹图数目大于1,所以(6)式中矩阵范数近似



相等,通过变量代换可得:

$$\begin{cases} I_{N_0} = b' \sin \varphi \\ I_{N_1} = b' \sin(\varphi + \delta) \end{cases}, \quad (7)$$

式中:  $\varphi = \phi + \frac{\Delta_1}{2}$ ;  $\delta = \frac{\Delta_2}{2}$ 。

显然(7)式不能直接使用经典的GS<sup>[7]</sup>方法直接求解相位。文献[21]对该问题进行了进一步分析,通过克莱姆正交化的方法,建立一对正交信号,直接获得了相位。因此使用文献[21]的方法对(7)式进行求解,可直接获得  $\varphi$ 。

需指出:为了得到测量相位  $\phi$ ,还需进一步确定相移  $\delta$ 。对此,考察(1)式,并将其变形为

$$I_1 = a + b \cos\left(\phi + \frac{\Delta_1}{2} + \frac{\Delta_2}{2}\right) = a + b \cos(\varphi + \delta_1). \quad (8)$$

将条纹图  $I_1$  空间分成若干块子图(如  $3 \times 3$ ),取其中一个子图数据,并设其中的相位为:  $\varphi(1), \varphi(2), \dots, \varphi(9)$ ,光强为  $I_1(1), I_1(2), \dots, I_1(9)$ 。定义一套变量:  $A = a, B = b \cos \delta_1, C = -b \sin \delta_1$ ,可得:

$$I_1(i) = A + B \sin[\varphi(i)] + C \cos[\varphi(i)], \quad (9)$$

式中:  $i = 1, 2, \dots, 9$ 。显然,在最小二乘意义下,可得上面方程组中的三个未知数,进而可得:

$$\delta_1 = -\arctan \frac{C}{B}, \quad (10)$$

最后得测量相位为

$$\varphi = \phi - \delta_1. \quad (11)$$

### 3 数值分析

鉴于文献[21]提出的相位解调方法对所提方法的重要性,为了说明其方法的正确性,本研究对文献[21]提出的相位解调方法和经典的GS方法<sup>[7]</sup>进行了对比分析。定义测量相位为  $\phi(x, y) = 6\text{peak}(\cdot)$ ,其中  $\text{peak}(\cdot)$ 为 MATLAB 软件中的函数,调制因子为  $b = 10^{-4} \exp[-0.5(x^2 + y^2)]$ ,相邻条纹间相移量为  $(0, \pi)$  间的一个随机数,坐标范围为  $0.1 \text{ mm} \leq x \leq 3.1 \text{ mm}, 0.1 \text{ mm} \leq y \leq 3.1 \text{ mm}$ ,并设定信噪比(SNR,  $R_{SN}$ )为 5%。因此可产生两套光强分布为  $I_{n\_sin} = b \sin(\phi + \delta) + R_{SN} \cdot \text{rand}(\cdot)$  和  $I_{n\_cos} = b \cos(\phi + \delta) + R_{SN} \cdot \text{rand}(\cdot)$ ,其中  $\text{rand}(\cdot)$ 为 MATLAB 产生的加性高斯噪音函数。

在同样条件下,对比了两种方法的解调结果。图 2 为模拟的理论相图,图 3 为模拟解调的结果。图 3(a)和(b)表明两种方法得到了相似的包裹相图。为了量化说明,图 3(c)给出了在 20 次独立测

量条件下两种方法与参考相图的方均根(RMS)误差。仿真比较可知两种方法得到了相似的结果,证明了两种方法的等同性。

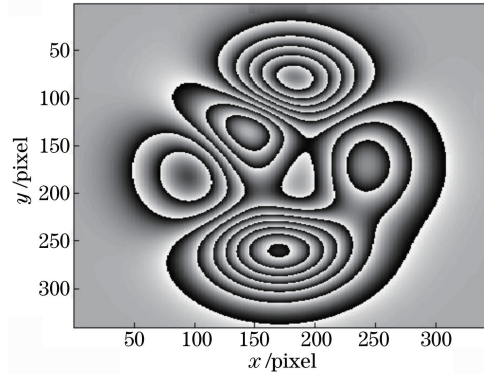


图 2 理论包裹相图

Fig. 2 Theoretical wrapped phase map

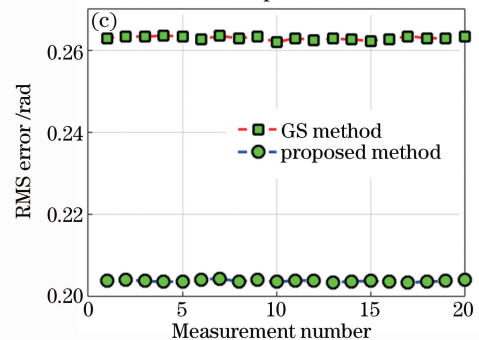
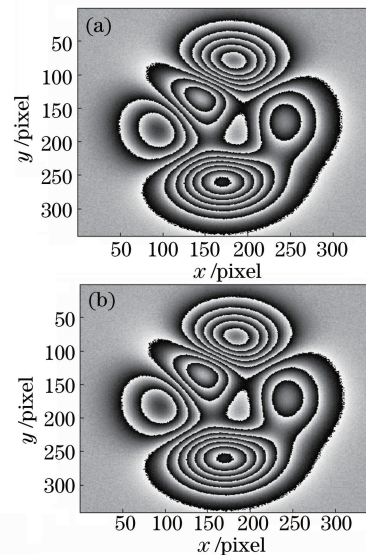


图 3 模拟结果。(a)所提方法;(b)GS方法;(c)RMS 误差  
Fig. 3 Simulation results. (a) Proposed method;  
(b) GS method; (c) RMS error

### 4 实验与讨论

为了进一步说明所提方法的性能,下面给出所提方法对实际摄取的条纹图的处理结果,所用的实验装



置和实验方法参见文献[21-22]。实验时,采用一个球冠作为测量面,然后通过垂直光栅面方向上移动光栅产生相移,摄取的3帧相移图如图4所示。

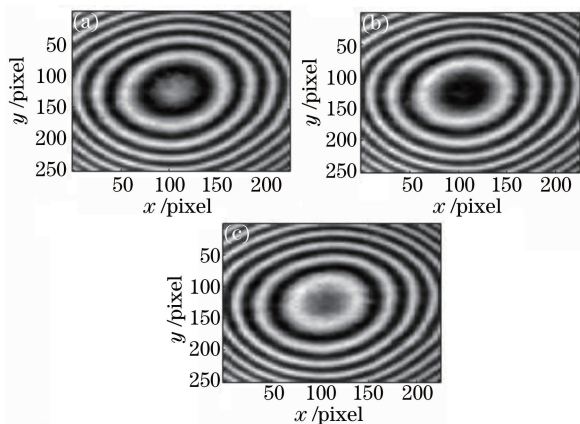


图4 实际条纹图。(a)第1帧;(b)第2帧;(c)第3帧  
Fig. 4 Real fringe patterns. (a) 1<sup>st</sup> frame;  
(b) 2<sup>nd</sup> frame; (c) 3<sup>rd</sup> frame

为了对比说明所提方法的性能,本研究同时应用所提方法和GS方法<sup>[7]</sup>进行实验。GS方法的实验方法为:首先应用高通滤波器对图4的前两帧条纹图进行背景抑制处理,然后运用GS方法<sup>[7]</sup>进行处理。两种方法重建的高度面如图5所示。

对比所提方法的测量结果和GS方法的测量结果可见,GS方法重建表面在球冠的顶部出现了较多的波动点。这有两方面原因:1)采用傅里叶变换去除条纹图背景时,受频带交叠作用,不能有效分离背景项和轮廓项,从而产生误差;2)因为使用的条纹图少,GS方法测量结果受条纹图中噪音、背景光调制等不确定因素影响较大。

相比之下,所提方法使用了相对较多的条纹图,较2帧方法能有效减弱条纹图中不确定因素的影响。同时,通过条纹图相减,所提方法可正确去除背景,因此得到了较理想的测量结果。

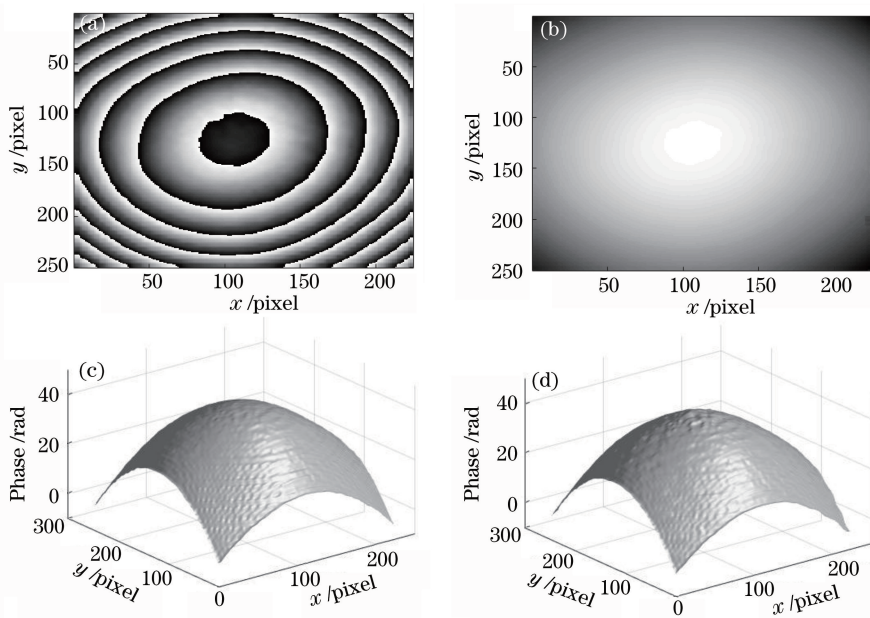


图5 闭型条纹图处理结果。(a)所提方法的包裹相图;(b)所提方法的去包裹相图;  
(c)所提方法的重建高度;(d)GS方法的重建高度

Fig. 5 Results of closed fringe patterns. (a) Wrapped phase of proposed method; (b) unwrapped phase of proposed method; (c) reconstructed height of proposed method; (d) reconstructed height of GS method

为了量化说明所提方法的性能,本研究进一步对比了所提方法与典型的3帧方法的测量结果。采用一块表面光滑的晶圆作为样品,为了获得较多的条纹,实验时,将晶圆进行了很小角度的倾斜,从而获得图6所示的5帧相移为90°的相移条纹图。

由于实际的参考面很难获得,以先进迭代算法(AIA)<sup>[21]</sup>处理的结果作为测量结果的参考,对比PCA随机相移算法<sup>[5]</sup>、经典3帧算法与所提方法的

性能。应当指出,AIA是一种多帧算法,由于使用了较多的条纹图进行三维测量,可有效补偿环境光、噪音、物体表面反射等对测量的影响,相比于2帧相移算法,AIA具有较高的精度。因此,为了简化实验,现有的文献常采用高精度相移(如:AIA、5步算法)的结果作为参考<sup>[7,15,21]</sup>。关于AIA的精度和性能在文献[23]已经进行了详细的说明,因此以AIA的结果作为参考具有合理性。

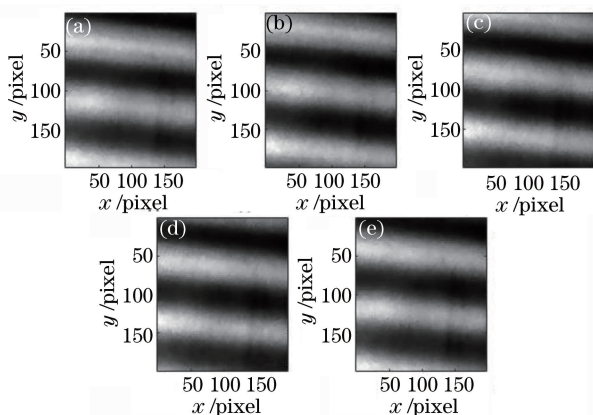


图 6 实际开型条纹图。(a)第 1 帧；(b)第 2 帧；  
(c)第 3 帧；(d)第 4 帧；(e)第 5 帧

Fig. 6 Real open fringe patterns. (a) 1<sup>st</sup> frame; (b) 2<sup>nd</sup> frame; (c) 3<sup>rd</sup> frame; (d) 4<sup>th</sup> frame; (e) 5<sup>th</sup> frame

图 7 为应用 AIA 得到的参考相图,图 8 和图 9 分别给出了 PCA 方法、3 帧算法和所提方法得到的实验结果。从图中可以看出,PCA 方法、3 帧算法和所提方法获得的测量结果表面波动明显。由于使用了较多条纹图,产生了匀化作用,AIA 明显地抑制了条纹图中的不确定因素的影响。同时,AIA 通过迭代运算正确地获得了测量相移,因此 AIA 能减少相移算法的正弦性失调误差。AIA 得到了较为理想的结果,具有高的精度,可以作为本次实验的参考相图。

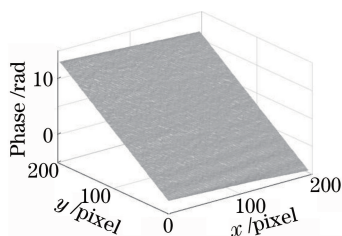


图 7 参考相位面

Fig. 7 Reference phase

图 9 给出了 3 种方法的误差分布,实验结果表明,PCA 方法的误差较大。这是因为 PCA 方法采用条纹图时域平均的方法,不能较好地去除背景光。该方法利用相移向量的正、余弦值组成正交基,意图将条纹图在子空间分解,获得正交向量组。但是,相移向量组的匹配可能不完全正确,故其所获得的正交向量组也会产生误差。上述分析说明 PCA 方法需要进一步校正,以减少上述误差。

相比 PCA 方法,3 帧算法虽然方法简单,且不受背景光的影响,但是该算法对相移误差敏感,要求测量时引入已知且精确的相移量,在应用中,该条件难以满足。此外,3 帧算法还要求相移器具有高的

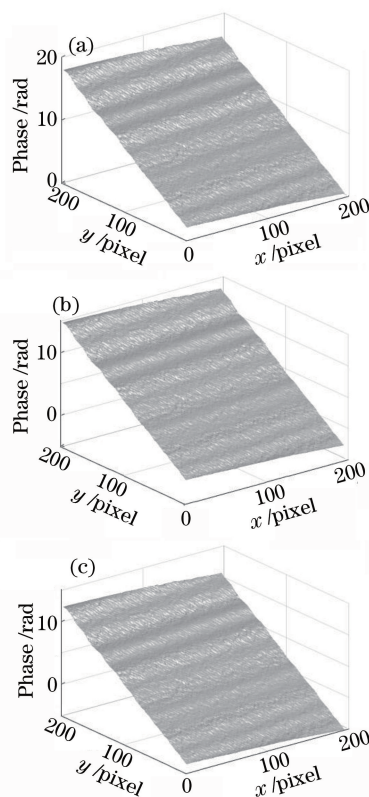


图 8 重建的相位。(a) PCA 方法；(b) 3 帧方法；  
(c) 所提方法

Fig. 8 Reconstructed phases. (a) PCA method; (b) three-frame method; (c) proposed method

精度和重复性。受文中相移条纹图相移误差影响,3 帧算法也产生了较大误差。

与以上两种方法不同,首先,所提方法基于随机相移的思想,减少了相移误差对相位解调的影响;其次,所提方法通过条纹图间的差运算,正确地去除了背景项,因而解调结果不受条纹图背景光的影响;最后,在确定了引入的相移时提出将条纹图在空间上划分为子条纹图,应用子条纹图块确定相移,较好地抑制了条纹图空间对比度变化的影响。因此所提方法具有更好的性能,测量误差最小。

## 5 结 论

针对阴影莫尔技术存在标定困难、相移要求高的问题进行了研究,将基于立体视觉的结构参数标定方法与 3 帧随机相移提取算法相结合,建立一种随机相移阴影莫尔三维轮廓测量技术,以优化现有的阴影莫尔测量技术。所提技术中基于条纹图引入的相移是随机的,可以简化阴影莫尔测量过程,降低相移的使用要求。仿真和实验表明,所提方法精度高,为阴影莫尔进一步的应用提供了一种有效途径。

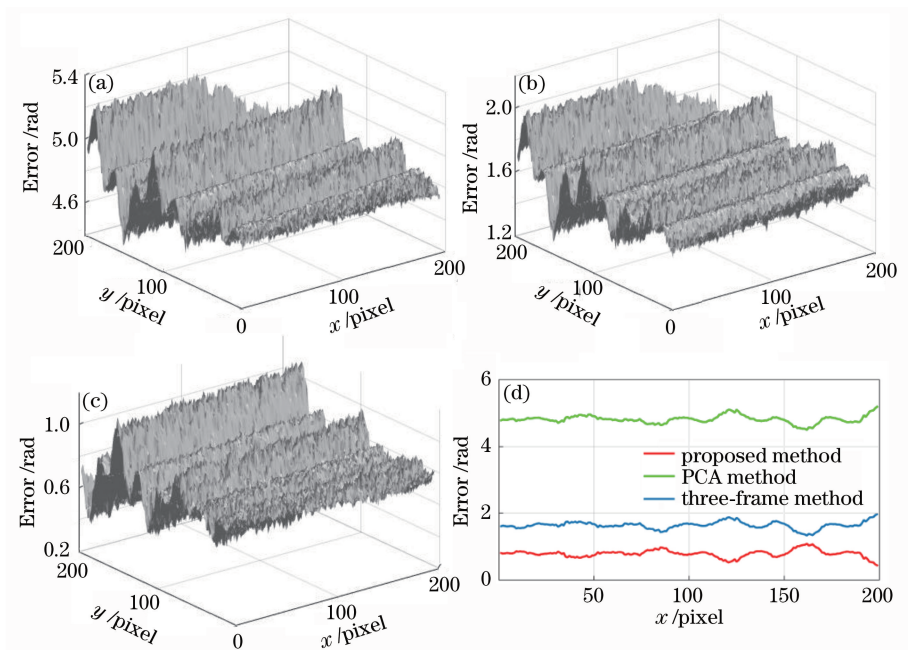


图9 重建相位的误差。(a) PCA方法；(b) 3帧方法；(c)所提方法；(d) 3种方法某一行误差比较

Fig. 9 Errors of reconstructed phases. (a) PCA method; (b) three-frame method; (c) proposed method; (d) comparison of errors in one row of three methods

**致谢** 感谢陕西省百人计划获得者、西安工业大学特聘教授陈阳泉教授提供指导和帮助。

### 参 考 文 献

- [1] Servin M, Estrada J C, Quiroga J A. The general theory of phase shifting algorithms [J]. *Optics Express*, 2009, 17(24): 21867-21881.
- [2] Zeng F, Tan Q F, Gu H R, *et al.* Phase extraction from interferograms with unknown tilt phase shifts based on a regularized optical flow method[J]. *Optics Express*, 2013, 21(14): 17234-17248.
- [3] D'Acquisto L, Fratini L, Siddiolo A M. A modified moiré technique for three-dimensional surface topography [J]. *Measurement Science and Technology*, 2002, 13(4): 613-622.
- [4] Kreis T M, Jueptner W P O. Fourier transform evaluation of interference patterns: demodulation and sign ambiguity [J]. *Proceedings of SPIE*, 1992, 1553: 263-274.
- [5] Vargas J, Quiroga J A, Belenguer T. Phase-shifting interferometry based on principal component analysis [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(8): 1326-1328.
- [6] Vargas J, Quiroga J A, Sorzano C O S, *et al.* Two-step interferometry by a regularized optical flow algorithm [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(17): 3485-3487.
- [7] Vargas J, Quiroga J A, Sorzano C O S, *et al.* Two-step demodulation based on the Gram-Schmidt orthonormalization method [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(3): 443-445.
- [8] Trusiak M, Paturski K. Two-shot fringe pattern phase-amplitude demodulation using Gram-Schmidt orthonormalization with Hilbert-Huang pre-filtering [J]. *Optics Express*, 2015, 23(4): 4672-4690.
- [9] Niu W H, Zhong L Y, Sun P, *et al.* Phase shifts extraction algorithm based on Gram-Schmidt orthonormalization of two vectors [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2015, 47(8): 2803-2810.
- [10] Deng J, Wang H K, Zhang F J, *et al.* Two-step phase demodulation algorithm based on the extreme value of interference [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(22): 4669-4671.
- [11] Liu F W, Wu Y Q, Wu F. Correction of phase extraction error in phase-shifting interferometry based on Lissajous figure and ellipse fitting technology [J]. *Optics Express*, 2015, 23(8): 10794-10807.
- [12] Wielgus M, Sunderland Z, Paturski K. Two-frame tilt-shift error estimation and phase demodulation algorithm [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(15): 3460-3463.
- [13] Xu Y Y, Wang Y W, Ji Y, *et al.* Three-frame generalized phase-shifting interferometry by a Euclidean matrix norm algorithm [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2016, 84: 89-95.
- [14] Han C W, Han B. High sensitivity shadow moiré using nonzero-order talbot distance [J]. *Experimental Mechanics*, 2006, 46(4): 543-554.
- [15] Yatabe K, Ishikawa K, Oikawa Y. Simple, flexible,



- and accurate phase retrieval method for generalized phase-shifting interferometry [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2016, 34(1): 87-96.
- [16] Du H B, Gao H H. Three-frame self-calibration phase shift algorithm using the Gram-Schmidt orthonormalization approach [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(24): 6713-6717.
- [17] Ai Y X, Zhou X, Du H B, *et al.* A multi-range merging method for phase shift shadow moiré profilometry with large depth measuring range [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(12): 1212001.  
艾永旭, 周翔, 杜虎兵, 等. 一种多距离融合的大深度测量范围相移阴影叠栅轮廓术 [J]. *光学学报*, 2016, 36(12): 1212001.
- [18] Du H B, Wang J H, Zhao H, *et al.* Phase extraction from random phase-shifted shadow moiré fringe patterns using stereovision technique [J]. *Optical Engineering*, 2014, 53(4): 044109.
- [19] Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [20] Du H B, Yan J J. Demodulation of phase shift shadow moiré fringe pattern by orthonormalizing method [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, 46(7): 0712002.  
杜虎兵, 颜菁菁. 相移阴影莫尔条纹正交化解调技术 [J]. *光子学报*, 2017, 46(7): 0712002.
- [21] Wang H L, Luo C S, Zhong L Y, *et al.* Phase retrieval approach based on the normalized difference maps induced by three interferograms with unknown phase shifts [J]. *Optics Express*, 2014, 22(5): 5147-5154.
- [22] Yan J J, Du H B. Real-time calibration technique for phase shift shadow moiré [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(9): 091202.  
颜菁菁, 杜虎兵. 相移阴影叠栅实时标定技术 [J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(9): 091202.
- [23] Wang Z Y, Han B. Advanced iterative algorithm for phase extraction of randomly phase-shifted interferograms [J]. *Optics Letters*, 2004, 29(14): 1671-1673.