

doi: 10.3788/gzxb20174607.0712002

相移阴影莫尔条纹正交化解调技术

杜虎兵, 颜菁菁

(西安工业大学 机电工程学院 测量与控制研究所, 西安 710021)

摘 要:提出一种基于克莱姆正则化分析法的三帧自标定相移阴影莫尔三维轮廓技术. 该技术首先采用移动光栅的方法获得相移条纹图, 然后通过不同帧相移条纹图相减去除条纹图背景, 进而结合克莱姆正交化法和最小二乘法, 发展了一种相位解调方法, 提取了测量相位. 以五步 Harlharan 算法为参考, 用不同算法对同一物体表面进行测量. 结果表明, 相对于典型的三步相移法和主量分析方法, 提出的方法测量得到的相位误差最小 (< 0.5 rad), 且简化了测量过程.

关键词:光学装置; 测量; 阴影莫尔轮廓术; 相移算法; 相位

中图分类号: O439

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2017)07-0712002-7

Demodulation of Phase Shift Shadow Moiré Fringe Pattern by Orthonormalizing Method

DU Hu-bing, YAN Jing-jing

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

Abstract: A self-calibration three-dimensional object surface measurement method with three image frames based on Gram-Schmidt orthonormalization method was proposed. The phase shift fringe map was obtained by translation grating, and the fringe background was eliminated by subtracting phase shift fringe maps with different frames. Then a phase demodulation method using Gram-Schmidt orthonormalization method and the least-square method was developed, so that the measurement phase can be extracted. Taking five steps Harlharan algorithm as a reference, the object surface was measured by different algorithms. The results show that compared with three steps phase shift algorithm and principal component analysis algorithm, the proposed method is more precise with phase error less than 0.5 rad and simplifies the mensuration.

Key words: Optical devices; Measurement; Shadow Moiré; Phase shifting algorithm; Phase

OCIS Codes: 120.2650; 120.3940; 120.4120

0 引言

阴影莫尔技术是一种全场、非接触的三维轮廓测量方法^[1], 自 1970 年被提出以来, 已广泛应用于人体测量、晶圆表面检测、焊球阵列封装共面度测试、自动生产、航空工业等领域.

早期的阴影莫尔技术主要基于莫尔等高线法. 莫尔等高线法简单直观, 但不能有效利用条纹间距的灰度级信息, 其测量灵敏度仅限一个条纹间距. 基于傅立叶变换的阴影莫尔方法^[2]通过倾斜被测物体为测量视场引入载频, 然后采用傅里叶变换获得测量相位. 该方法只需要一帧条纹图, 然而在倾斜角较大时, 易受衍射的影响 (假定主光栅的周期 ≥ 0.1 mm), 此时产生的莫尔条纹图对比度会随物体和光栅间距的增加而减小, 使得条纹图光强分布不均匀; 若倾斜角太小, 引入的载频过小, 在实验中, 由于交叠作用, 不能有效进行背景项

基金项目:国家自然科学基金 (Nos. 61471288, 51475351) 和陕西省自然科学重大基础研究项目 (No. 2016ZDJC-10) 资助

第一作者:杜虎兵 (1976-), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为三维光学测量. Email: duhubing@xatu.edu.cn

收稿日期:2017-01-22; **录用日期:**2017-03-07

<http://www.photon.ac.cn>

和轮廓项信号的分离.

相比之下,基于相移技术的阴影莫尔法^[3-4]测量方法简单、准确度高,且测量过程可以自动完成,因此应用广泛.该方法通过在时域改变实验参量,引起测量光场相位的变化,同时使用摄像机记录并存储该变化,进而运用计算机程序逐点地分析,实现测量相位自动解调^[5-6].相移技术可以充分利用条纹图中的灰度信息,提高测量分辨力,其过程包括相位解调、相位去包裹和相位-高度映射等环节,其中相位解调最重要.

传统的相移阴影莫尔技术主要通过移动光栅在测量视场近似地引入 $\pi/2$ 相移的方法实现.其相位解调方法可以采用三步相移算法、四步相移算法或者五步相移算法.考虑到简单、方便,应用中常采用三步相移算法的阴影莫尔技术.然而该算法对相移误差敏感,误差较大,且要求光栅移动量为固定值,缺乏灵活性,因此需要进一步研究改进.

近年来,基于较少帧条纹图的相移算法得到了广泛的研究^[7-10].Vargas 等^[9]提出的克莱姆正交化二帧算法,因解调速度快,测量准确度高得到了广泛的应用,然而该方法的准确度受条纹图背景去除准确度影响较大^[10].Wang 等^[11]提出了一种正则化条纹图差的方法对其技术进行了改进,并通过实验证明了该方法的有效性,该算法可以减少条纹图背景对解调结果的影响,但是解调结果不是测量相位.在高度测量场合,常常要求求解测量相位,进而通过测量相位实现相位-高度的映射,因此该技术在这些场合的应用受到了限制.对此本文开展了进一步研究,结合最小二乘技术,提出一种基于克莱姆正交化方法的三步相位提取技术,以实现高精度测量相位的解调.该方法在应用中无需事先精确标定引入的相移,而是通过条纹图数据自身对引入的相移进行标定,同时克服了传统相移阴影莫尔相移固定、应用不灵活的缺点,可以降低测量装置的要求,使用方便,测量过程简单.

1 基本原理

1.1 相移阴影莫尔轮廓术

点光源照射下的阴影莫尔测量原理如图 1,光源和相机位于同一高度($h_1 = h_2 = h$),点光源发出的光透过周期为 p 的光栅,投影在距离光栅为 z 的物体上形成阴影光栅.该阴影光栅的周期为 $p' = \frac{h+z}{h}p$.

当相机透过光栅观察时,由于实光栅与阴影光栅的交叠作用,得到了阴影莫尔条纹图.

通常相机观察到的光强为

$$I(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \cos \frac{2\pi}{p} \left(\frac{dz}{h+z} \right) \quad (1)$$

式中, p 为光栅周期, $A(x, y)$ 、 $B(x, y)$ 分别为背景和振幅.式中第二项为轮廓项,携带了物体表面形貌的信息.通过在垂直光栅平面移动光栅 2 次,每次间距为 Δh ,可得

$$I_n(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \cos [\phi(x, y) + n\Delta(x, y)] \quad n=0, 1, 2 \quad (2)$$

式中, $\phi(x, y)$ 为相位, $\Delta(x, y)$ 为引入的相移,分别为

$$\phi(x, y) = 2\pi dz / p(h+z) \quad (3)$$

$$\Delta(x, y) = 2\pi dn\Delta h / p(h+z) \quad (4)$$

式(4)表明,引入的相移与高度有关.由于实验条件可以保证 $h \gg z$,因此忽略非线性影响,设计合理的 Δh ,便可使用三步 $\pi/2$ 相移算法提取测量相位.

相移阴影莫尔具有原理性误差,由于三步 $\pi/2$ 相移算法对相移误差敏感,没有任何补偿能力,因此应用该算法误差较大.另外该算法要求光栅移动量固定,且需要相移值事先精确标定,从而在应用中缺乏灵活性.为此提出一种基于未知相移的等步长三步相位提取算法.

1.2 正交化相移阴影莫尔轮廓术

为了便于表述,推导将省去空间坐标 (x, y) .假定不同帧相移条纹图具有相同的背景项,对不同帧条纹

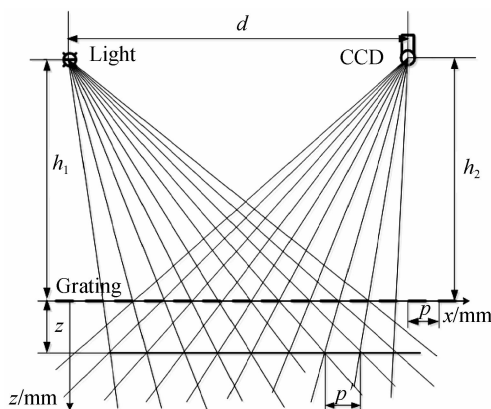


图 1 阴影莫尔原理

Fig. 1 Illumination of shadow Moiré

图做差可得

$$\begin{cases} R_1 = (I_0 - I_1)/2 = B \sin(\delta/2) \sin(\varphi + \delta/2) = B' \sin(\varphi) \\ R_2 = (I_1 - I_2)/2 = B \sin(\delta/2) \sin(\varphi + 3\delta/2) = B' \sin(\varphi + \delta) \end{cases} \quad (5)$$

式中, $\varphi = \phi + \delta/2$. 根据文献[9]可知,任意相移序列可表述成一个二维的向量空间. 因此应用克莱姆-斯密特正交化方法可构造两个正交条纹图,即

$$\tilde{R}_1 = \frac{R_1}{\|R_1\|} = \frac{B' \sin(\varphi)}{\|B' \sin(\varphi)\|} \quad (6)$$

$$\hat{R}_2 = B' \sin(\varphi + \delta) - \left[\sum_m \sum_n B'^2 \sin(\varphi + \delta) \sin(\varphi) \right] \cdot \frac{B' \sin(\varphi)}{\|B' \sin(\varphi)\|^2} \quad (7)$$

式中, $\|B' \sin(\varphi)\| = \sqrt{\langle B' \sin(\varphi), B' \sin(\varphi) \rangle}$ 为向量的欧氏距离($\langle \cdot \rangle$ 代表了内积运算). 应用中为了提高测量准确度,需保证采集的条纹图包含较多周期变化的条纹(即条纹数目大于1),可得近似关系为

$$\begin{cases} \sum_m \sum_n \sin^2(\varphi) \cos\left(\frac{\delta}{2}\right) \gg \sum_m \sum_n \cos(\varphi) \sin(\varphi) \sin\left(\frac{\delta}{2}\right) \\ \|B'(x,y) \sin(\varphi)\| \approx \|B'(x,y) \cos(\varphi)\| \end{cases} \quad (8)$$

进一步可得

$$\hat{R}_2 \approx B' \cos(\varphi) \sin\left(\frac{\delta}{2}\right) \quad (9)$$

对式(9)正交化得

$$\tilde{R}_2 = \frac{B' \cos(\varphi) \sin\left(\frac{\delta}{2}\right)}{\|B' \cos(\varphi) \sin\left(\frac{\delta}{2}\right)\|} = \frac{B' \cos(\varphi)}{\|B' \cos(\varphi)\|} \quad (10)$$

结合式(6)和(10),可得

$$\varphi = \arctan(\tilde{R}_1 / \tilde{R}_2) \quad (11)$$

显然,式(11)求解的相位还需要进一步转换,才可获得测量相位 $\phi(x,y)$. 为了求解 $\phi(x,y)$, 首先将 R_2 分成若干小块,如 3×3 . 然后将其中的相位标记为 $\varphi(1), \varphi(2), \dots, \varphi(9)$, 强度标记为 $R_2(1), R_2(2), \dots, R_2(9)$, 相移标记为 δ . 式(5)可写为

$$R_2 = B' \cos(\delta) \sin(\varphi) + B' \sin(\delta) \cos(\varphi) = m \cdot \sin(\varphi) + n \cdot \cos(\varphi) \quad (12)$$

将式(5)改写为矩阵形式,得

$$\mathbf{J}\mathbf{X} = \mathbf{I} \quad (13)$$

式中

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \sin \varphi(1) & \cos \varphi(1) \\ \sin \varphi(2) & \cos \varphi(2) \\ \dots & \dots \\ \sin \varphi(9) & \cos \varphi(9) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{X} = \begin{bmatrix} m \\ n \end{bmatrix}, \quad \mathbf{I} = \begin{bmatrix} R_2(1) \\ R_2(2) \\ \dots \\ R_2(9) \end{bmatrix}$$

式(13)在最小二乘意义下可解出未知量 \mathbf{X} , 可得

$$\delta = \arctan(n/m) \quad (14)$$

由式(14)可知,假定引入的相移相等但未知,应用最小二乘法和克莱姆正交化的方法,根据条纹图数据可提取引入的相移. 因此提出的方法具有自标定性质. 进而可得

$$\phi(x,y) = \varphi(x,y) - \delta \quad (15)$$

最后得测量高度为

$$z = \frac{ph\phi}{2\pi d - p\phi} \quad (16)$$

2 实验结果

为了验证理论分析的正确性,进行了实际测量实验. 实验系统如图2. 测量对象是一个球冠面. 光栅为20

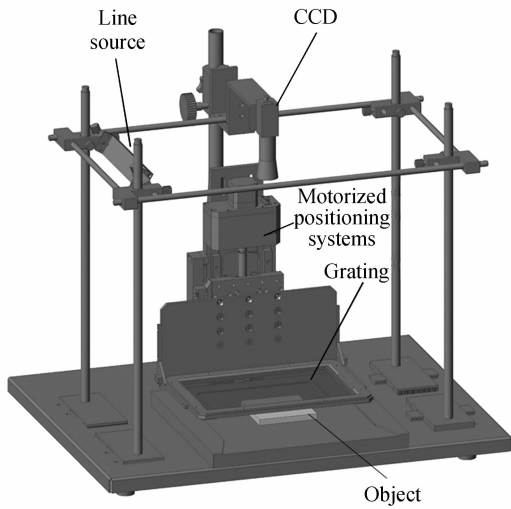


图 2 实验系统示意图

Fig. 2 Illustration of experimental system

线的 Ronchi 光栅。采用如图 3 所示的呈紧密直线排列蓝光 0805 封装发光二极管作为光源,排列方向与光栅栅线平行(光源沿平行光栅栅线方向排列不影响测量原理及结果,且能产生对比度良好的莫尔条纹)。取光源与相机的距离为 100 mm,相机光心和光栅表面的距离为 120 mm,光栅水平放置,光源和相机光心位于同一水平面。为了提高测量准确度,采用高准确度位移平台作为相移器,分辨率为 $1 \mu\text{m}$ 。



图 3 光源结构

Fig. 3 Structure of light source

实验时,首先调整光栅的位置,使之靠近待测物体,相机便观察到了清晰的莫尔条纹,然后以此位置为基准位置,在垂直光栅面方向上,使用精密位移台移动光栅,每次移动距离为 0.02 mm ,每次相移量设计为 $\pi/2$ 。图 4 给出了采集的 5 帧相移莫尔条纹图。

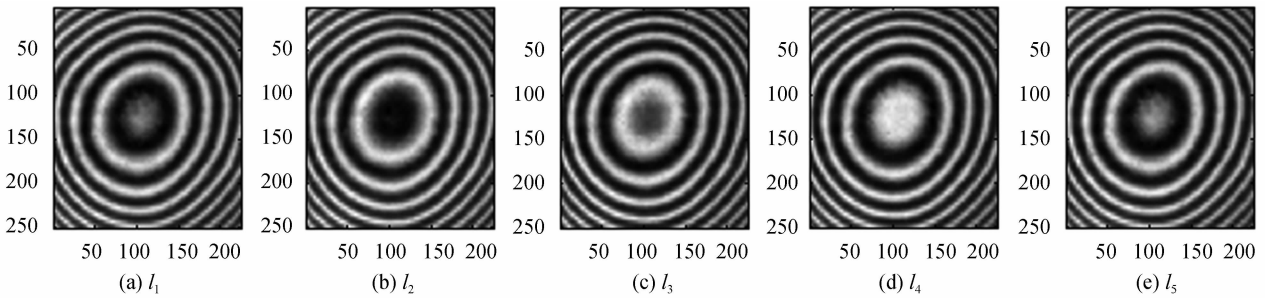
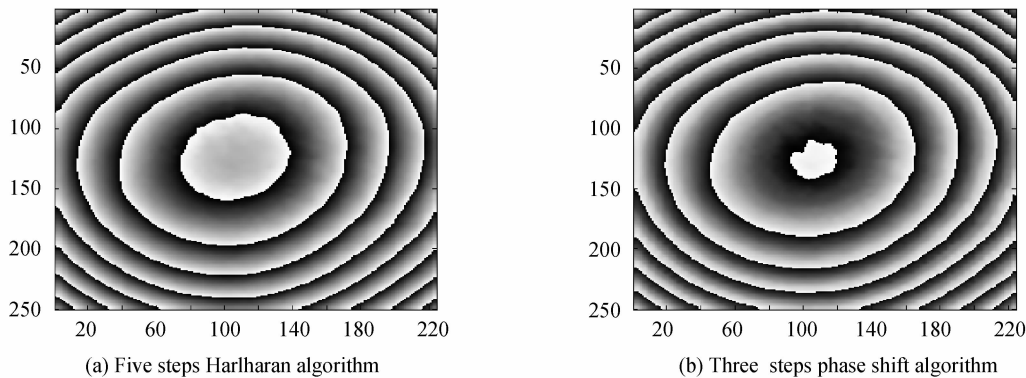


图 4 移动光栅采集到的相移莫尔条纹图

Fig. 4 Phase shift Moire fringe captured by translation grating

被测物体表面高度分布在实际中往往难以获得,为了验证提出方法测量结果的性能,使用典型的五步 Harlharan 算法^[12]对图 4 进行解调,并将其结果作为参考。五步 Harlharan 算法具有对较小误差相移不敏感的特性^[13],被广泛应用于高准确度相位解调中。因此,该算法能对阴影莫尔测量系统的相移误差进行补偿,将其结果作为参考测量高度是可信的。将常用的三帧条纹图的方法,三步 $\pi/2$ 相移算法和主量分析 (Principal Component Analysis, PCA) 法^[14],与本文方法的处理结果进行对比。图 5 为用不同方法处理后的包裹相图。可见三种方法产生的包裹相图与五步 Harlharan 算法的包裹相图相似,但在中间部分有明显的差异,而本文方法的结果更接近五步 Harlharan 算法。



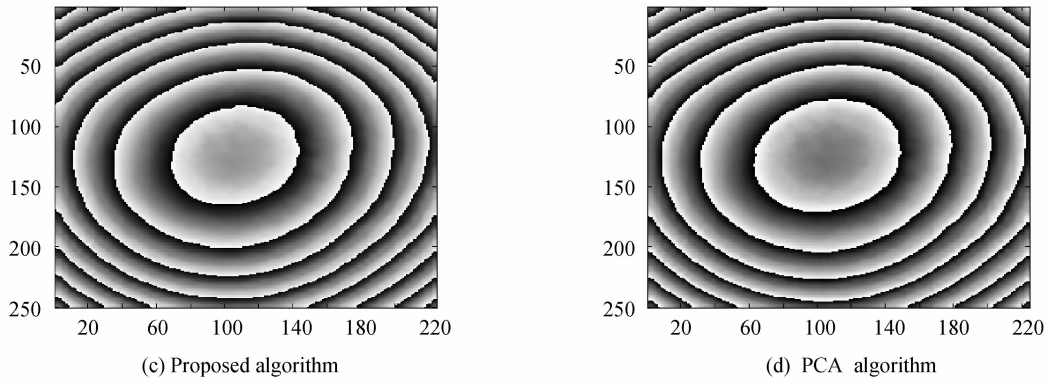


图 5 采用不同方法得到的包裹相图

Fig. 5 Wrapped phase maps obtained by different algorithms

为了量化对比各种方法处理的结果,首先对图 5 所示的包裹相图进行去包裹,然后以五步 Harlharan 法处理的结果作为参考,计算了上述三种方法与五步 Harlharan 法产生的误差.图 6 结果表明,本文方法产生的相图误差小于 0.5 rad,更接近五步 Harlharan 算法的结果.

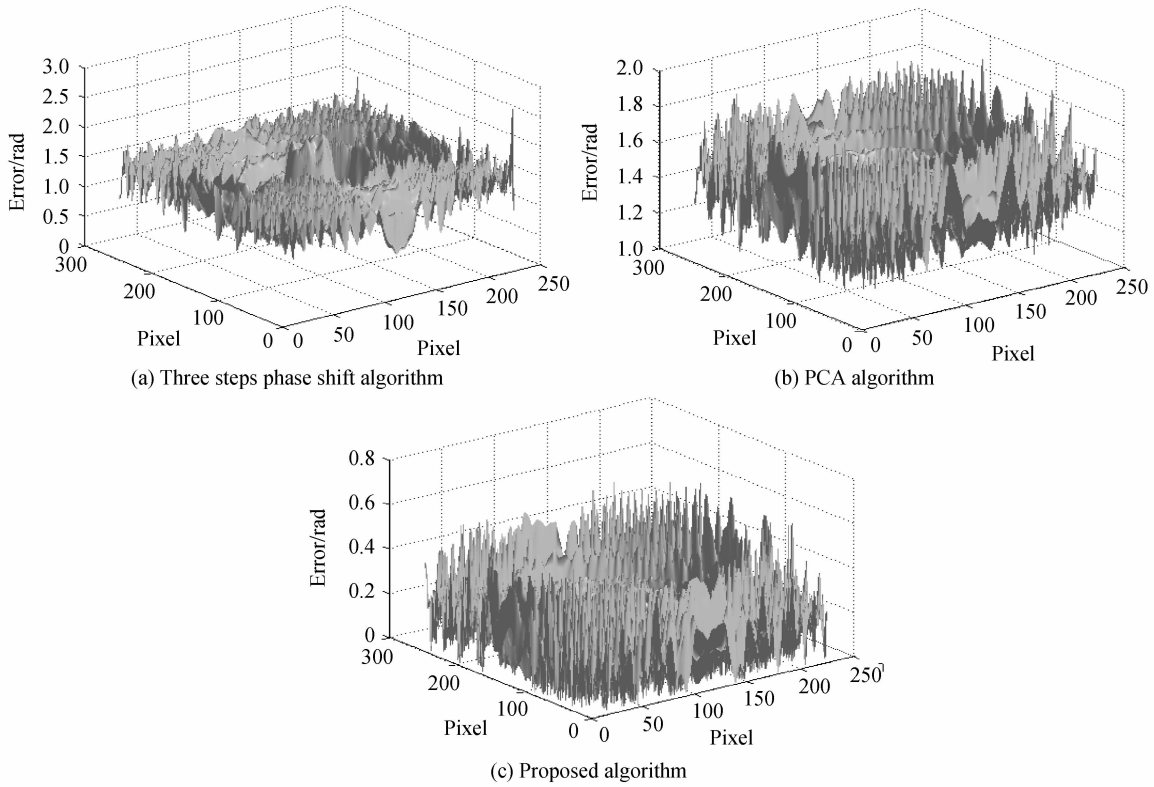


图 6 采用不同方法得到的测量结果误差

Fig. 6 Measurement errors obtained by different algorithms

本文方法取得高准确度的测量结果是因为三帧算法对相移条纹图相移误差敏感,没有补偿能力.相移阴影莫尔由于存在全场相移不匀误差和光栅移动误差,因此产生了较大误差;主量分析法是一种随机相移算法,相移准确度要求不高,但在应用中要求去除背景,而其方法不能有效消除条纹图背景项.本文方法采用条纹图相减的方法去除背景(该方法是目前去背景最有效的方法),通过最小二乘法精确地求取了相移,因此有效地减小了背景误差和相移误差,取得了较好的效果.

图 7 给出了应用本文方法重建的三维表面.从图中可以看出五步 Harlharan 算法由于使用了较多帧条纹图,包含了较多的信息,结果最好;二步算法^[15]由于使用的条纹图少,不能补偿环境光引起的误差,且易受去除背景误差影响,其重建表面粗糙;本文方法测量结果尽管也有波纹,但为准确度要求适中的测量场合提供了一种快速、方便的测量途径.

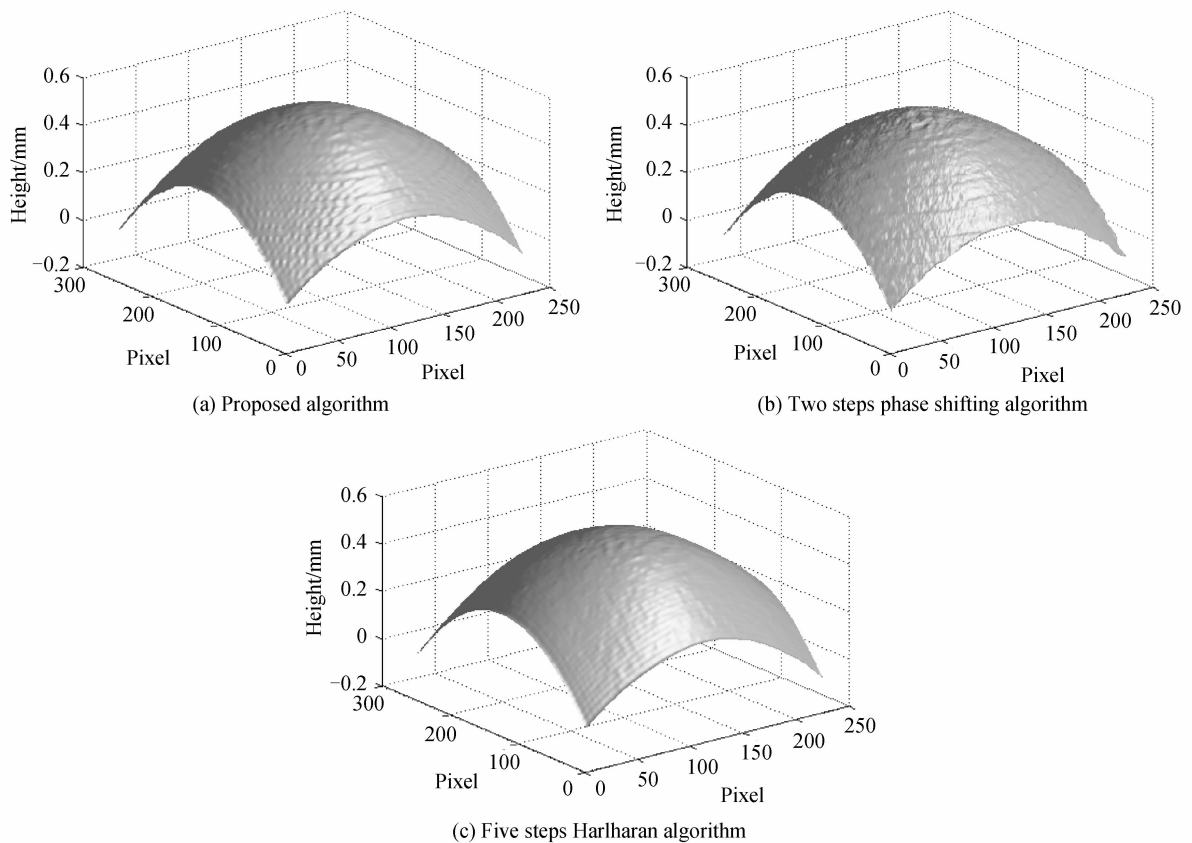


图7 采用不同方法重建的三维表面
Fig. 7 Three dimensional surfaces rebuilt by different algorithms

3 结论

本文研究了相移阴影莫尔轮廓术的解调方法,提出了一种自标定阴影莫尔三维轮廓测量技术.该方法仅使用三帧相移条纹图,测量过程不需要标定相移量,与传统三步相移算法比较,无要求相移值固定,具有较大的灵活性.实验结果表明:该方法可以减少直流分量误差对测量高度的影响,应用于测量准确度适中的场合中,可以大大简化阴影莫尔测量结构,具有方便、灵活的测量特性,为此类测量提供了一种有效的途径.

参考文献

- [1] MEADOWS D M, JOHNSON W O, ALLEN J B. Generation of surface contours by moiré patterns[J]. *Applied Optics*, 1970, **9**(4): 942-947.
- [2] D'ACQUISTO L, FRATINI L, SIDDILOLO A M. A modified moiré technique for three-dimensional surface topography [J]. *Measurement Science and Technology*, 2002, **13**(4): 613-623.
- [3] ZHAO Hong, DU Hu-bing, LI Bing, *et al.* Shadow moiré technology based fast method for the measurement of surface topography[J]. *Applied Optics*, 2013, **52**(33): 7874-7881.
- [4] DU Hu-bing, GAO Hong-hong. Three-frame self-calibration phase shift algorithm using the Gram-Schmidt orthonormalization approach[J]. *Applied Optics*, 2016, **55**(24): 6713-6717.
- [5] GÓMEZ-PEDRERO J A, QUIROGA J A, TERRÓN-LÓPEZ M J, *et al.* Measurement of surface topography by RGB shadow-Moiré with direct phase demodulation[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2006, **44**(12): 1297-1310.
- [6] DEGRIECK J, VAN PAEPEGEM W, BOONE P. Application of digital phase-shift shadow moiré to micro deformation measurements of curved surfaces[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2001, **36**(1): 29-40.
- [7] 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.
- [8] VARGAS J, QUIROGA J A, BELENGUER T, *et al.* Two-step self-tuning phase-shifting interferometry[J]. *Optics Express*, 2011, **19**(2): 638-648.
- [9] 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.
- [10] TRUSIAK M, PATORSKI 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.
- [11] WANG H, LUO C, ZHONG L, *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.
- [12] VARGAS J, QUIROGA J A, BELENGUER T. Phase-shifting interferometry based on principal component analysis [J]. *Optics Letters*, 2011, **36**(8): 1326-1328.
- [13] HARIHARAN P, OREB B F, EIJU T. Digital phase-shifting interferometry: a simple error-compensating phase calculation algorithm[J]. *Applied Optics*, 1987, **26**(13): 2504-2506.
- [14] SERVIN M, ESTRADA J C, QUIROGA J A. The general theory of phase shifting algorithms[J]. *Optics Express*, 2009, **17**(24): 21867-21881.
- [15] JUAREZ-SALAZAR R, ROBLEDO-SANCHEZ C, GUERRERO-SANCHEZ F, *et al.* Generalized phase-shifting algorithm for inhomogeneous phase shift and spatio-temporal fringe visibility variation[J]. *Optics Express*, 2014, **22**(4): 4738-4750.