

doi: 10.3788/gzxb20164502.0212003

# 二帧变换光源阴影莫尔技术研究

周宪, 杜虎兵, 王建华

(西安工业大学 机电工程学院, 西安 710021)

**摘 要:**为了快速测量物体表面三维轮廓, 提出一种变换光源位置的相移阴影莫尔技术. 该方法通过控制两个光源的亮灭, 将相移引入测量视场. 使用二维经验模式分解法对条纹图进行正则化, 结合螺旋相位变换方法和二帧相移算法对测量高度进行估计, 利用发展的迭代自调算法提取精确测量相位. 计算机仿真和光学实验结果表明, 该方法的解调准确度优于现有的二帧相移解调算法, 同时, 由于消除了测量过程中必要的机械运动, 只需要二帧条纹图进行相位解调, 节约了测量时间.

**关键词:**测量; 二帧相移; 阴影莫尔; 螺旋相位; 迭代算法

中图分类号: O43

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)02-0212003-6

## Two Frame Phase Shifting Shadow Moiré Using the Method of Varying Light Source

ZHOU Xian, DU Hu-bing, WANG Jian-hua

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

**Abstract:** In order to measure the three-dimensional profile of object's surface quickly, a shadow Moiré technique with phase shift based on varying light source positions was proposed. By switching two light sources the method used, the phase shift was introduced into measurement view. The two-dimension empirical mode decomposition was used to regularize the fringe pattern. Combining the spiral phase transform and two frames phase shift, the measurement height was estimated, the accurate measurement phase was picked up by using a new iterative adaptation algorithm. The results of the computer simulation and of the optical experiments indicate that the demodulation accuracy of the proposed method is better than the traditional two frames phase shift demodulation. Additionally, the proposed method greatly saves the measurement time by removing the mechanical motions in the process of measurement, since it only needs the two frames fringe pattern to demodulate the phase.

**Key words:** Measurement; Two frames phase shift; Shadow Moiré; Spiral phase transform; Iterative algorithm

**OCIS Codes:** 120.4120; 150.1135; 100.7410; 110.7410; 050.5080

## 0 引言

阴影莫尔三维轮廓技术, 结构简单、价格便宜, 可满足工业检测场合的需要<sup>[1]</sup>. 便携式阴影莫尔测量装置, 可实现计算机数控 (Computerized Numerical Control, CNC) 齿轮测量中心工作台面度的检测<sup>[2]</sup>, 但为了实现这种装置, 需要对传统莫尔技术的结构<sup>[3]</sup>、解调方法等进行进一步改进, 以满足测量过程中数据采集简单、解调准确度高要求。

相移法常被用于阴影莫尔视场测量相位的解调<sup>[4]</sup>, 然而该方法对相移误差敏感, 使得相移阴影莫尔技术的进一步应用产生困难<sup>[5]</sup>. 为了提高相移阴影莫尔测量准确度, 课题组提出了基于最小二乘技术的迭代相移算法<sup>[6]</sup>, 有效地减小了由相移不匀物体给阴影莫尔测量系统带来的误差, 并拓展了相移阴影莫尔技术的应用. 但该方法在相移引入时需要机械运动, 从而限制了测量速度的提高. 变换光源位置的频移技术对此提供了解决途径<sup>[7]</sup>, 但是该技术由于在数据采样过

**基金项目:**国家自然科学基金 (Nos. 61471288, 51475351)、陕西省自然科学基金基础研究计划 (No. 2015JM5190)、陕西省协同创新计划项目 (No. 2015XT-12) 和未央区科技计划项目 (No. 201510) 资助

**第一作者:**周宪 (1982-), 男, 讲师, 博士研究生, 主要研究方向为计算机辅助设计、三维光学测量. Email: zhouxian\_key@aliyun.com

**导师 (通讯作者):**杜虎兵 (1976-), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为三维光学测量. Email: xh.dhub@stu.xjtu.edu.cn

**收稿日期:**2015-10-29; **录用日期:**2015-12-14

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

程中光源的位置发生了改变,造成条纹图的背景和振幅调制<sup>[8]</sup>,不能保证相移条纹图的光强方程具有恒定的背景和振幅,即变光源阴影莫尔技术不能满足标准的相移算法应用时条纹图背景和振幅恒定的基本假定,且使用帧数越多,解调结果误差越大.2001年一种螺旋相位变换(Spiral Phase Transform, SPT)的方法被提出<sup>[9]</sup>.该方法可以方便地获得条纹图的正交信号,但其应用需要精确估计条纹方向.2002年,一种基于傅里叶变换的阴影莫尔技术<sup>[10]</sup>被用于三维轮廓测量,该方法通过倾斜光栅为莫尔测量视场引入载频,并运用傅里叶方法,通过一张图进行三维表面轮廓重建.但该方法不能自动地完成三维测量,且易受傅里叶变换固有频谱混迭的影响.2011年,Vargas提出了基于正则化光流算法条纹方向估计算法<sup>[11]</sup>,通过两帧条纹图提取测量相位.该方法简化了测量过程,但由于使用了二帧条纹图,解调过程对噪声敏感,且测量准确度还需要进一步提高<sup>[12]</sup>,另外该方法受傅里叶变换问题的影响,在应用中不能有效消除条纹图的背景光.因此如何将该方法应用于实际测量还需要进一步研究.

本文提出一种基于二维经验模式分解的两帧变光源阴影莫尔技术.通过改变光源位置为测量视场快速引入相移,然后利用二维经验模式分解法对条纹图进行正则化,并使用二帧相移算法估计测量相位,最后发展了一种迭代方法校正测量相位.

## 1 基本原理

### 1.1 变光源阴影莫尔技术

图1给出了变光源阴影莫尔的实验结构.其中包括两个具有任意距离的光源、一个 CCD 摄像机、置于测量面上的罗奇光栅,测量面用  $z(x, y)$  来表述.在图 1

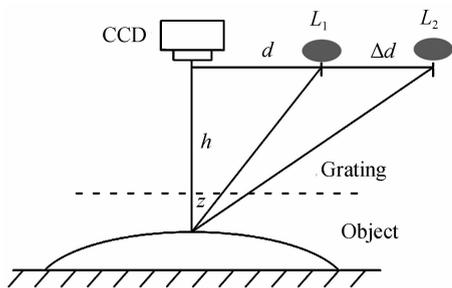


图1 测量系统原理图

Fig. 1 The block diagram of measurement system

中通过控制光源 1 和光源 2 顺序地照射光栅面,可摄取两张相移阴影莫尔条纹图,其光强分布为

$$I_k(x, y) = A_k(x, y) + B_k(x, y) \cos [\varphi_k(x, y)] \quad (k=0, 1) \quad (1)$$

式中  $A_k(x, y)$  为背景,  $B_k(x, y)$  为调制项,  $\varphi_k(x, y)$  为测量相位.假定摄像机镜头的光学中心和两个光源的中心与光栅位于同一高度的平面上,此时的相位

$\varphi_k(x, y)$  为

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

式中  $p$  为栅距,  $h$  为光源到光栅面间距,  $d_k$  为 CCD 与第  $k$  个光源的水平间距.因此,由改变光源位置为阴影莫尔视图引入的相移可表示为

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

式中  $\Delta d$  为光源间距.由此可见,相移是未知的且不能直接估计,该方法在引入相移的过程中由于改变了光源的位置,从而使摄像机获取的条纹图序列同一像素点具有变化的背景和振幅,因此经典相移技术的基本假定不能成立,进而经典的相移算法不能直接用于测量相位的解调过程中.

### 1.2 条纹图正则化

传统的相移技术常常使用较多帧(如 5 帧)的条纹图进行相位解调,由于均化作用,其算法对噪声不敏感.然而对于二帧相移算法则需要进行较多的降噪考虑,以保证测量相位的可靠解调.

采用快速二维经验模式分解方法<sup>[13]</sup>对条纹图进行正则化处理.该方法基于数据驱动,可以将条纹图分解成不同的模式分量,第一个模式分量对应条纹图的高频部分,即噪音,残余量对应条纹图的背景.因此将条纹图进行经验模式分解后,去除第一模式分量和残余量,再进行重建,即可完成对条纹图正则化.

### 1.3 估计相图

根据条纹正则化过程可得

$$I_k = b_k \cos \varphi_k \quad (k=0, 1) \quad (4)$$

为了便于表述,推导过程将省去空间坐标  $(x, y)$ .对式(4)应用 SPT,可得其正交信号为

$$\tilde{I}_k = b_k \sin(\varphi_k) = -i \exp(-i\eta) \text{SPT}\{\tilde{I}_k(x, y)\} \quad (5)$$

式中  $\eta$  为条纹方向图,其估计可参见文献[7].因此由变光源为莫尔测量视图引入的相移,可由式(6)求解,即

$$\delta(x, y) = \arctan \left( \frac{\tilde{I}_0 \tilde{I}_1 - \tilde{I}_0 \tilde{I}_1}{\tilde{I}_0 \tilde{I}_1 + \tilde{I}_0 \tilde{I}_1} \right) \quad (6)$$

进而可得

$$\varphi = \arctan \left[ \cot \delta - \frac{\tilde{I}_1}{\sin(\delta) \cdot \tilde{I}_0} \right] \quad (7)$$

最后得到估计的测量高度为

$$\tilde{z} = \frac{ph\varphi}{2\pi d - p\varphi} \quad (8)$$

### 1.4 迭代更新

应用 SPT 在相位提取过程中容易引入谐波误差,为了提高测量准确度,提出一种迭代自调相移算法.将高度  $\tilde{z}$  视为迭代算法的初始值,由此更新相移量值,即

$$\delta(x, y) = \frac{2\pi \Delta d z(x, y)}{p(h+z(x, y))} \quad (9)$$

将式(9)更新的相移代入式(7)中,可得更新的高度.迭代过程可不断重复,直到高度数值收敛到预定准确度范围内.其收敛准则可以描述为

$$\max(|z^q - z^{q-1}|) < \epsilon \quad (10)$$

式中, $q$ 为迭代计算次数, $\epsilon$ 为预定的准确度要求.

因此当收敛终止条件满足时,可得测量高度的精确解.

## 2 数值模拟

实际中,由于准确的物面轮廓难以得到,本文利用计算机模拟被测表面,以验证 1.4 节迭代自调相移算法的有效性.模拟表面高度的数字表达式为

$$z(x, y) = xy \exp(-x^2 - y^2) \quad (11)$$

模拟使用的测量系统参量值分别为: $p = 0.05 \text{ mm}$ ,  $d = 100 \text{ mm}$ ,  $h = 160 \text{ mm}$ ,  $\Delta d = 1 \text{ mm}$ .条纹图光强表达式为

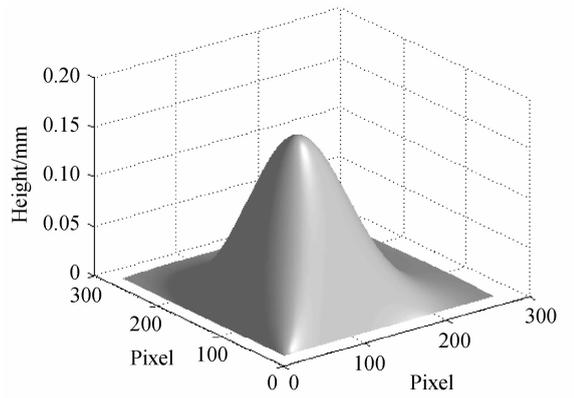
$$I_i = \cos(\varphi + i\delta) \quad (12)$$

式中  $0 \leq x \leq 2.25$ ,  $0 \leq y \leq 2.25$ , 图像的  $x, y$  方向的总像素数都为 256. 因此改变  $i$  的值就可以得到一系列模拟的相移条纹图. 图 2(a) 为模拟的测量表面, 图 2(b) 为模拟的条纹图.

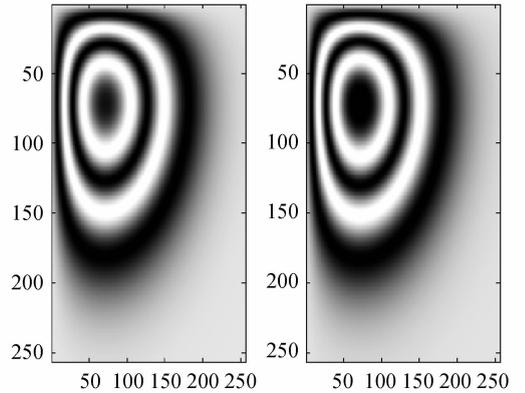
为了验证提出算法的准确性, 定义误差函数为

$$e(x, y) = \text{abs}(z(x, y) - h(x, y))$$

式中  $h(x, y)$  为解调的高度值,  $\text{abs}(\cdot)$  表示绝对值函



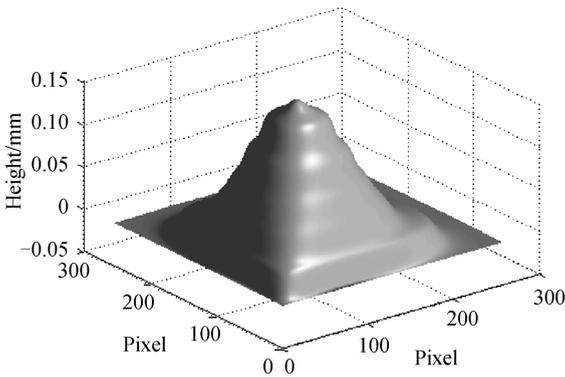
(a) The simulation surface



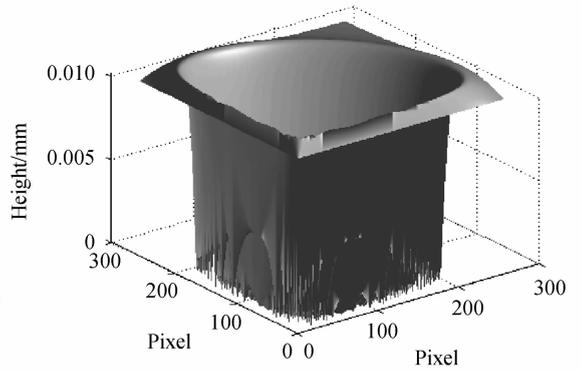
(b) The fringe pattern

图 2 模拟测量数据

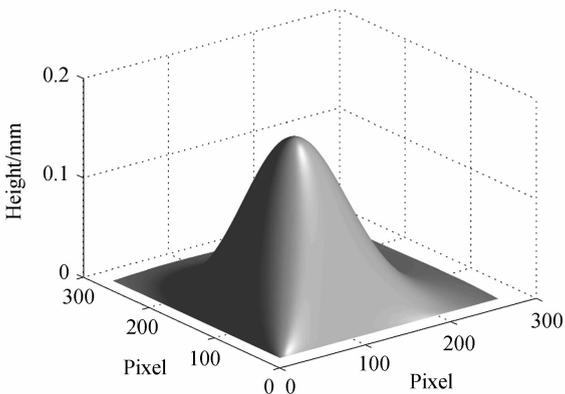
Fig. 2 The Simulation measurement data



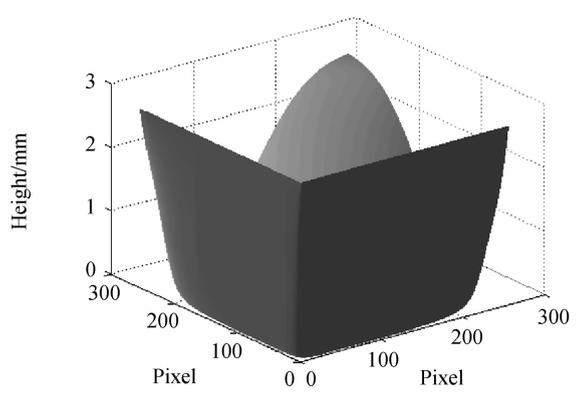
(a) The reconstructed surface by Vargas' method



(b) The residual error by Vargas' method



(c) The reconstructed surface by the proposed method



(d) The residual error by the proposed method

图 3 模拟测量结果

Fig. 3 The Simulation measurement results

数. 图 3 给出了利用 Vargas 方法和本文迭代方法通过 8 次迭代(计算机机型为 Pentium IV 2.5 GHz PC, 迭代过程使用时间为 0.34 s)得到的解调结果. 结果表明利用 Vargas 的方法产生的最大误差为 0.01 mm, 而本文迭代方法因为使用了迭代过程, 减小了由于相移不均匀产生的解调误差, 使得最大误差小于  $3 \times 10^{-4}$  mm, 获得了较好的测量效果.

图 4 描述了本文迭代方法迭代次数与计算的标准差的关系, 可知本文方法需要迭代 10 次左右, 便可获得较好效果.

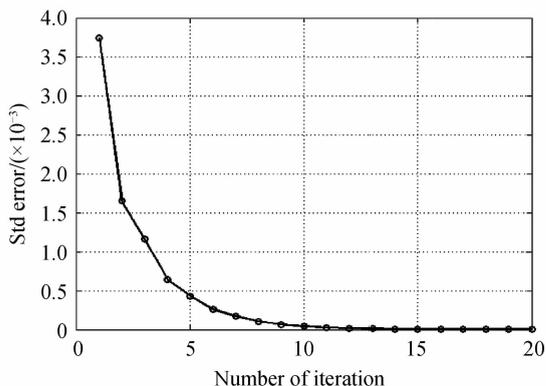


图 4 标准差与迭代次数的关系

Fig. 4 The STD errors of the proposed method vs. the number iteration

### 3 实验结果

以一小块表面光滑的球面为测量对象, 采用图 1 给出的变光源阴影莫尔实验结构进行实际测量, 实验采用呈紧密直线排列的由 0805 封装 LED 做成的线光源, 如图 5. 实验参量为:  $p=0.05$  mm,  $d=100$  mm,  $h=160$  mm,  $\Delta d=2$  mm. 其中, 2 mm 光源间距作为实验的重要参量, 其标定方法为: 将两个光源固定在支架上, 支架安装于精密手动移动平台, 从基准位置开始, 首先移动第二个光源至指定位置, 然后固定, 再从基准位置

开始移动第一个光源, 并相对第二个光源少移动 2 mm, 位移平台的最小刻度是微米.



图 5 光源结构

Fig. 5 The structure of light source

分别控制光源 1 光源和光源 2 按顺序亮和灭, 通过摄像机可拍摄 2 帧相移的条纹图. 由于实际获取的干涉条纹图包含了较多的噪音, 为了提高条纹图的信噪比, 在进行高度解调前, 首先使用文献[14]的方法对所拍摄的条纹图进行了滤波, 滤波后的 2 幅条纹图如图 6.

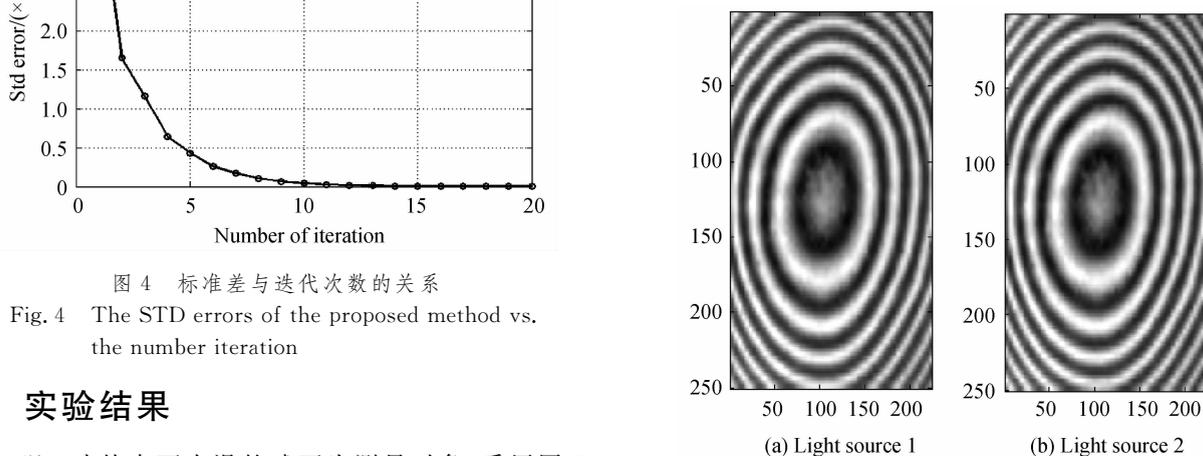
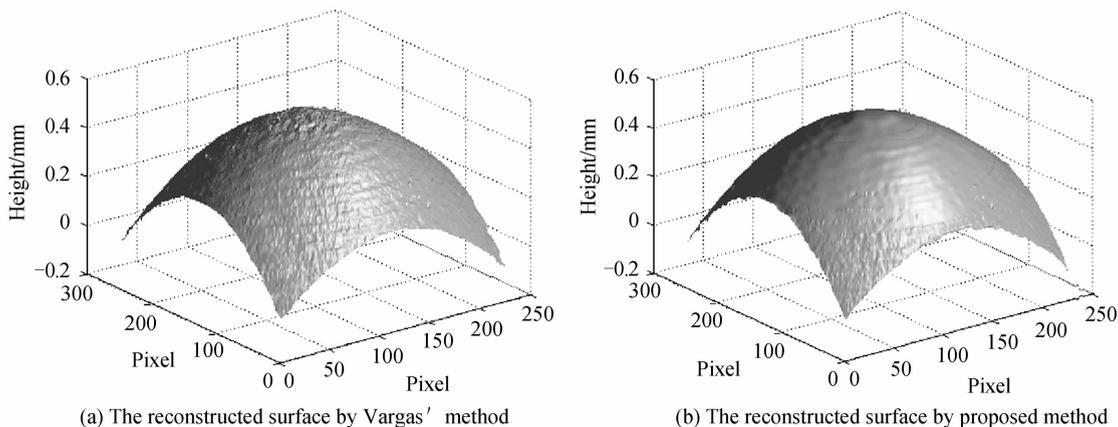


图 6 测量条纹图

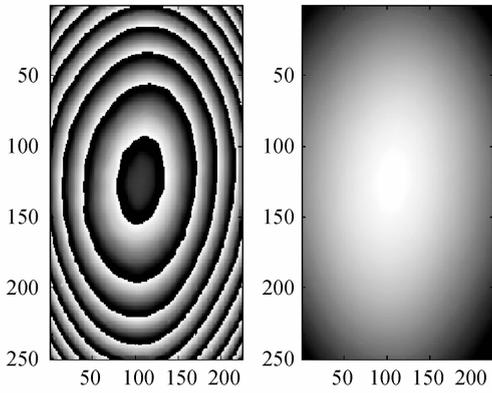
Fig. 6 The measurement fringe pattern

为了对比说明本文方法的性能, 采用文献[14]的方法对该样品进行测量, 并以其结果作为参照(该方法准确度高), 测量结果如图 7. 对比可见, 直接使用 Varga 方法受噪音影响较大, 而本文方法取得了较好的效果.

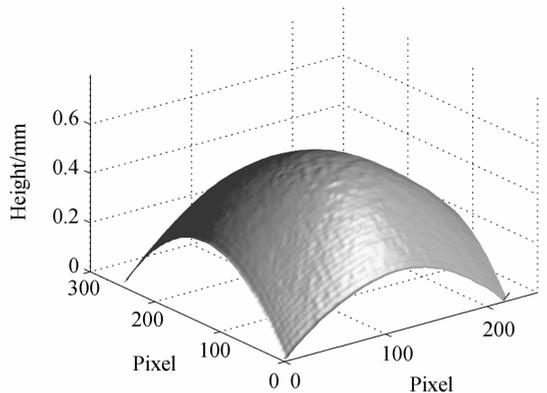


(a) The reconstructed surface by Vargas' method

(b) The reconstructed surface by proposed method



(c) The wrapped phase and unwrapped phase of the proposed method



(d) The references height

图7 测量结果

Fig. 7 The measurement result

以文献[14-16]中方法的测量结果作为参考,计算本文方法测量结果的误差为

$$e = \text{abs}(h_1 - h_2) \quad (13)$$

这里式中,  $h_1$  为文献[14]方法得到的测量面高度分布,  $h_2$  为本文方法在测量实验得到的表面高度分布. 其结果如图8, 本文方法产生的误差不大于 0.03 mm. 由于阴影莫尔测量系统存在着较多的系统误差源, 如测量装置参量误差, 光场非正弦分布等, 因此还需要进一步研究, 以提高本文方法的测量准确度.

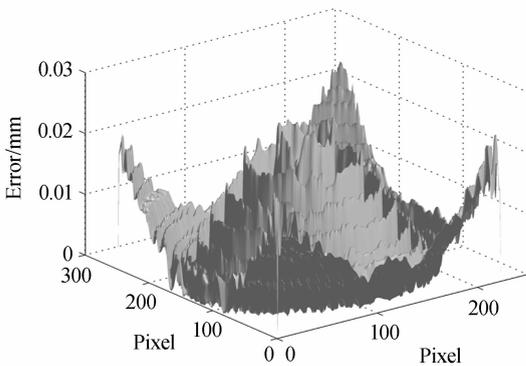


图8 本文方法处理的残差

Fig. 8 The residual errors of the proposed method

## 4 结论

本文提出了一种采用两帧干涉条纹图的快速变光源阴影莫尔技术, 通过变换光源位置为测量视图引入的相移, 采用二维经验模式分解技术进行条纹正则化, 并使用二帧相移技术估计测量高度. 考虑到 SPT 存在着谐波误差, 提出一种迭代算法, 提高了测量准确度. 本文方法没有机械运动, 只需两帧条纹图, 测量过程速度较快, 可适应快速测量场合的要求.

### 参考文献

[1] DUAN Cun-li, CHEN Fang, QI Rui-li, *et al.* A new Moiré stripe method of measuring 3-D object shapes [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(7): 1426-1428.  
段存丽, 陈芳, 祁瑞利, 等. 利用莫尔条纹测量物体三维形貌新

方法研究[J]. *光子学报*, 2008, **37**(7): 1426-1428.  
[2] YU Rui-zhi, CAO Yi-ping. A Three dimensional on-line inspecting method for workpiece by PMP[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(6): 1140-1143.  
喻睿智, 曹益平. 一种采用相位测量轮廓术的工件在线三维检测方法[J]. *光子学报*, 2008, **37**(6): 1140-1143.  
[3] DU Hu-bing, ZHAO Hong, LI Bing, *et al.* Phase shifting shadow moiré by iterative least-squares fitting [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(7): 978-982.  
杜虎兵, 赵宏, 李兵, 等. 相移阴影莫尔基于迭代 LSM 拟合[J]. *光子学报*, 2011, **40**(7): 978-982.  
[4] HU Er-yi, LI Yan. Study of the phase-recovering algorithm for saturated fringe patterns in the projection grating phase-shifting profilometry[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(6): 1137-1142  
胡而已, 李艳. 投影条纹相移法中图像饱和和误差抑制算法研究[J]. *光子学报*, 2010, **39**(6): 1137-1142.  
[5] JOSE A. GO MEZ-PSDRERO, JUAN A QUIROGA. Measurement of surface topography by RGB Shadow-moiré with direct phase demodulation [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2006, **44**: 1297-1310.  
[6] DU Hu-bing, ZHAO Hong, LI Bing, *et al.* Demodulating the phase of phase-shifting shadow moiré using arbitrary phase shift[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **32**(9): 0912003.  
杜虎兵, 赵宏, 李兵, 等. 任意相移阴影叠栅相位解调技术的研究[J]. *光学学报*, 2012, **32**(9): 0912003.  
[7] WANG Zhao, ZHAO Hong, TAN Yu-shan. The frequency shifting technology in shadow Moiré [J]. *Acta Photonica Sinica*, 1999, **19**(6): 816-820.  
王昭, 赵宏, 谭玉山. 频移阴影莫尔法[J]. *光学学报*, 1999, **19**(6): 816-820.  
[8] ZHAO Hong, DU Hu-bing. Shadow Moiré technology based fast method for the measurement of surface topography [J]. *Applied Optics*, 2013, **52**(33): 7874-7881.  
[9] LARKIN K G. A self-calibrating phase-shifting algorithm based on the natural demodulation of two-dimensional fringe patterns[J]. *Optics Express*, 2001, **9**(5): 236-253.  
[10] D'ACQUISTO L, FRATIBI L, SIDDIOLO AM. A modified Moiré technique for three-dimensional surface topography[J]. *Measurement Science & Technology*, 2002, **13**(13): 613-622.  
[11] VARGAS J, ANTONIO Q J, SORZANO C, *et al.* Two-step interferometry by a regularized optical flow algorithm[J]. *Optics Letters*, 2011, **36**(17): 3485-3487.

- [12] XU Xian-feng, CAI Li-zhong, WANG Yu-rong, *et al.* Accurate phase shift extraction for generalized phase-shifting interferometry[J]. *Chinese Physics Letters*, 2010, **27**(2): 024215.
- [13] TRUSIAK M, WIELGUS M, PATORSKI K. Advanced processing of optical fringe patterns by automated selective reconstruction and enhanced fast empirical mode decomposition[J]. *Optics & Lasers in Engineering*, 2014, **52**(1): 230-240.
- [14] DU Hu-bing, ZHAO Hong, LI Bing, *et al.* Algorithm for phase shifting shadow Moiré with an unknown relative step [J]. *Journal of Optics*, 2011, **13**: 1-5.
- [15] DU Hu-bing, WANG Jian-hua, ZHAO Hong, *et al.* Phase extraction from random phase-shifted shadow moiré fringe patterns using stereovision technique [J]. *Optical Engineering*, 2014, **53**(4): 044109-044109.
- [16] DU Hu-bing, WANG Jian-hua, ZHAO Hong, *et al.* Calibration of the high sensitivity shadow moiré system using random phase-shifting technique [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2014, **63**: 70-75.