

文章编号 1004-924X(2014)05-1347-07

## 任意相移最小二乘法迭代的在线三维检测

武迎春<sup>1,2</sup>, 曹益平<sup>1\*</sup>, 肖焱山<sup>1</sup>

(1 四川大学 电子信息学院, 四川 成都 610064;

2 太原科技大学 电子信息工程学院, 山西 太原 030024)

**摘要:**为了简化采用满周期等相移算法的在线相位测量轮廓术(PMP)在实际测量过程中系统装调环节的繁杂程度,同时避免栅线方向和运动方向不严格平行引入附加相移降低解相精度,提出了基于最小二乘法迭代的在线三维检测方法。在测量过程中,任意栅线方向的正弦光栅被投影于物体表面,采用像素匹配技术获得不同时刻拍摄到的变形条纹图的等效相移条纹图,其相移量由投影系统和物体位移共同决定且为任意值。最后,采用最小二乘法迭代计算相位。实验结果表明:在不断改变投影到参考面上光栅栅线方向的情况下,该系统的测量结果稳定,均方根误差均不高于 0.169 9 mm。由于该方法放宽了测量系统空间位置的约束条件,提高了测量的灵活程度,使在线 PMP 更具普适性。

**关键词:**在线检测;相位测量轮廓术;满周期等相移算法;像素匹配;最小二乘法迭代

**中图分类号:**O436.1;TB92 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20142205.1347

## On-line three-dimensional inspection using randomly phase-shifting fringe based on least-square iteration

WU Ying-chun<sup>1,2</sup>, CAO Yi-ping<sup>1\*</sup>, XIAO Yan-shan<sup>1</sup>

(1. College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610064, China;

2. College of Electronics and Information Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China)

\* Corresponding author, E-mail: ypcao@scu.edu.cn

**Abstract:** An on-line Phase Measuring Profilometry (PMP) based on least-square iteration was proposed to simplify the complexities of system installment and to avoid the influence of additional phase-shifting caused by the non-parallelism between grating lines and object's displacement in the PMP based on synchronous detection. In measurement processing, the sinusoidal grating with arbitrary grid line direction was projected onto an object, and a CCD was used to capture the deformed fringe patterns. After pixel matching, fringe patterns were used to evaluate the phase distribution. The phase-shifting was determined as arbitrary values by both projection system and object's displacement. Finally, the least-square iteration was used to calculate the phases. The experiment result shows when the grating line directions on the reference plane are changed, the measurement results

收稿日期:2013-08-16;修订日期:2013-09-29.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2007AA01Z333);国家重大科技专项资助项目(No. 2009ZX02204-008);四川省学术和技术带头人培养基金资助项目(No. 07GRC-01)

are stable, and the root-mean-square error is less than 0.169 9 mm. It concludes that the proposed method relaxes the restriction of the spatial location of measurement equipment, increases the measurement flexibility and makes the PMP more applicable.

**Key words:** on-line inspection; phase measuring profilometry; synchronous detection; pixel matching; least-square iteration

## 1 引言

在线检测是产品流水线生产的重要环节,制造业的不断发展对生产车间自动化水平的要求不断提高,同时也对在线检测技术有了更高的要求。高速、高精度的检测手段成为现代工业制造研究的重点<sup>[1]</sup>。基于结构光照明的光学三维传感技术<sup>[2-4]</sup>具有非接触、高速、高精度测量、易实现自动化、智能化控制等优点,在工业在线检测领域有着广阔的应用前景<sup>[5]</sup>。

相位测量轮廓术(Phase Measuring Profilometry, PMP)是基于结构光照明的光学三维传感中的一种典型方法<sup>[6]</sup>。它通过采集多帧具有一定相移的变形条纹图来确定相位信息,由于其采用点对点方法计算相位,故对背景、对比度和噪声的变化不敏感,具有较高的解相精度,是在线三维检测中重要的测量方法。在线三维检测中物体一直处于运动状态,使 CCD 不同时刻拍摄到的变形条纹图中的物体相位不断变化,这给 PMP 解相带来误差。要克服这一问题,不仅要求 CCD 具有较高的拍摄频率,还要求投影设备具有等同的投影切换频率。国内外学者对在线三维检测展开了广泛研究,并取得了很多研究成果。美国 Iowa 州立大学张松等人提出的实时三维检测系统可用于在线三维检测,但对系统硬件要求较高<sup>[7]</sup>。四川大学曹益平等人提出采用像素匹配技术来解决不同时刻拍摄到的变形条纹图物体位置发生变化的问题,该方法降低了对投影、采集频率的要求<sup>[8-13]</sup>。其中基于 Stoilov 算法的在线 PMP 采用计量光栅传感器产生触发信号控制 CCD 拍摄物体等距离移动的变形条纹图,经像素匹配后将物体的位移转化为条纹的相移,计算物体的相位分布<sup>[8]</sup>。为了降低测量系统控制部分的复杂程度,同时提高解相精度,他们又提出了基于满周期等

相移算法的在线 PMP<sup>[9]</sup>。该方法投影多帧相移条纹图,要求物体运动方向与条纹相移方向垂直,从而使像素匹配后物体运动不产生等效相移,因此采集到的变形条纹图的相移量等于投影条纹的相移量,最终实现相移量为人为编码控制的目的。

在实际测量中,很难实现相移方向与物体运动方向严格垂直,因此,像素匹配后的各帧变形条纹图在条纹相移方向就会产生附加相移量,而采用满周期等相移算法计算相位时又会引入相移误差,从而降低了相位计算精度。本文提出了采用最小二乘法迭代的相位分布计算方法<sup>[14-15]</sup>,由于参与解相的各帧条纹图间的相移量可以为任意值,从而减少了系统装置空间位置的约束条件,提高了测量的灵活性。

## 2 基于满周期等相移算法的在线 PMP

基于满周期等相移算法的在线 PMP 系统的光路图如图 1 所示<sup>[9]</sup>,被测物体随传送带沿 X 方向匀速运动,计算机控制数字光投影仪将 M 帧正弦光栅像投影于被测物体表面,栅线方向沿 X 方向。投影仪的光轴 PO 与 CCD 的光轴 CO 交于参考面上的 O 点,POC 面与光栅栅线方向垂直。物体的高度会使条纹在 Y 方向发生形变,控制 CCD 同步采集 5 帧变形条纹图,它们的光强分布可表示为:

$$I_i(x, y) = R(x, y) \{ A(x, y) + B(x, y) \cos [\varphi_i(x, y) + (i-1) \cdot 2\pi/M] \} \quad i = 1, 2, \dots, M, \quad (1)$$

式中:  $R(x, y)$  为物体表面反射率;  $A(x, y)$  为背景光强;  $B(x, y)$  为条纹对比度;  $\varphi_i(x, y)$  为物体表面变形条纹的相位分布,物体运动使其像在每帧变形条纹图中的位置不同,产生的相位调制的分布也不同,用下标  $i$  区别;  $(2\pi/M)$  为相移步长。

对不同时刻拍摄的变形条纹图进行像素匹配

后, 各帧条纹的光强分布为  $I'_i (i=1, 2, 3 \dots M)$ , 由满周期等相移算法计算得到变形条纹相位分布为<sup>[6]</sup>:

$$\Phi(x, y) = \arctan \frac{\sum_{i=1}^M I'_i(x, y) \sin(2\pi i/M)}{\sum_{i=1}^M I'_i(x, y) \cos(2\pi i/M)} \quad (2)$$

最后通过相位展开以及相位高度映射<sup>[16-17]</sup>获得物体的三维面形分布。

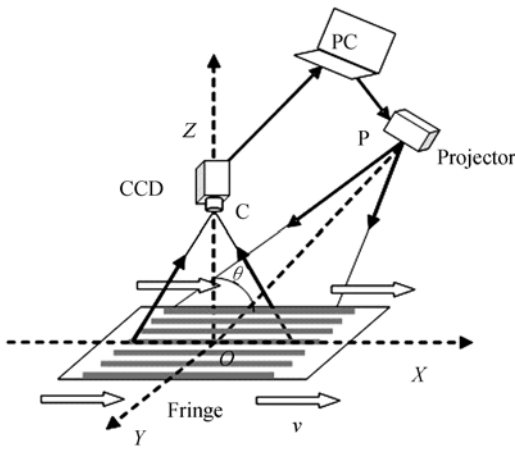


图 1 基于满周期等相移算法的在线 PMP

Fig. 1 On-line PMP system based on synchronous detection

以上测量原理需要满足一个前提条件: 光栅相移方向与物体运动方向垂直 (即栅线方向与物体运动方向平行)。但在实际测量中, 很难使相移方向与物体运动方向严格垂直, 且测量装置的装调难度较大。假设物体的运动方向  $OX$  与光栅栅线方向  $Ox$  存在微小夹角  $\theta$ , 如图 2 所示。若采集到的相邻两帧变形条纹图中物体的位移为  $\Delta X$ , 则在条纹的相移方向就会存在一分量  $\Delta y$ , 经过像素匹配后,  $\Delta y$  转化为相移量  $\Delta\delta$ 。这样计算物体相位的  $M$  帧变形条纹图中相邻 2 帧条纹的相移量就由  $2\pi/M$  变为  $2\pi/M + \Delta\delta$ , 从而使用满周期等相移算法计算相位时, 就会引入相移误差, 降低了相位计算精度。

### 3 基于最小二乘法迭代的在线 PMP

为了降低由物体运动引入的附加相移量对解相精度的影响, 本文采用最小二乘迭代的方法计

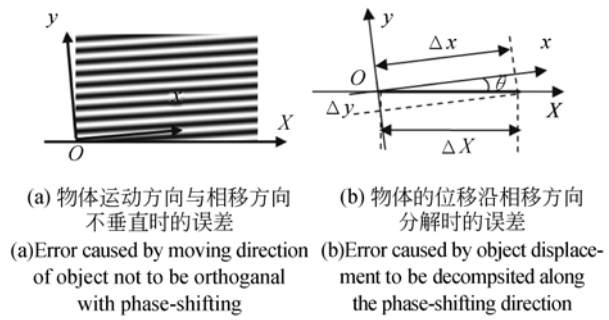


图 2 相移误差引入分析

Fig. 2 Analysis of error caused by phase-shifting

算相位分布。考虑物体运动产生的附加相移, 不同时刻 CCD 采集的  $M$  帧变形条纹图经像素匹配后的光强分布可表示为:

$$I_i(x, y) = R(x, y) \{ A(x, y) + B(x, y) \cos [\varphi(x, y) + (i-1) \cdot (2\pi/M) + \Delta\delta_i] \} \quad (3)$$

$i = 1, 2, 3 \dots M,$

式中:  $\Delta\delta_i$  为物体位移在相移方向的分量产生的等效条纹相移。定义为:

$$\delta_i = (i-1) \cdot (2\pi/M) + \Delta\delta_i \quad (4)$$

则式(3)可简化为:

$$I_i(x, y) = R(x, y) \{ A(x, y) + B(x, y) \cos [\varphi(x, y) + \delta_i] \}, i = 1, 2, 3, \dots M \quad (5)$$

将式(5)进一步简化表示为:

$$I_{ij}^t = A_{ij} + B_{ij} \cos(\varphi_j + \delta_i) \quad (6)$$

式中: 下标  $i$  表示第  $i$  帧变形相移条纹图,  $i=1, 2, \dots M$ , 且  $M \geq 3$ ;  $j$  表示每帧相移条纹图的第  $j$  个像素点,  $j=1, 2, \dots, N$ ; 上标  $t$  表示理论值;  $A_{ij} = R(x, y) \cdot A(x, y)$ ;  $B_{ij} = R(x, y) \cdot B(x, y)$ ;  $\varphi_j$  为第  $j$  个像素点的相位值;  $\delta_i$  为第  $i$  帧相移条纹的相移量。

#### 3.1 逐点迭代求相位分布

忽略背景光和对比度在各帧变形条纹图间的差异, 得到  $A_{1j} = A_{2j} = \dots = A_{Mj}$ ,  $B_{1j} = B_{2j} = \dots = B_{Mj}$ , 并定义  $a_j = A_{ij}$ ,  $b_j = B_{ij} \cos \varphi_j$ ,  $c_j = -B_{ij} \sin \varphi_j$ , 则式(6)可表示为:

$$I_{ij}^t = a_j + b_j \cos \delta_i + c_j \sin \delta_i \quad (7)$$

如果  $\delta_i$  已知, 上式包含  $3N$  个未知量和  $MN$  个方程, 未知数  $a_j, b_j, c_j$  可以通过最小二乘法求解, 进而求得相位分布:

$$\varphi_j = \arctan(-c_j/b_j) \quad (8)$$

### 3.2 逐帧迭代求相移量

忽略背景光和对比度在各个像素点间的差异, 得到  $A_1 = A_2 = \dots = A_N$ ,  $B_1 = B_2 = \dots = B_N$ , 并定义  $a'_i = A_{ij}$ ,  $b'_i = B_{ij} \cos \delta_i$ ,  $c'_i = -B_{ij} \sin \delta_i$ , 则式(6)可表示为:

$$I'_{ij} = a'_i + b'_i \cos \varphi_j + c'_i \sin \varphi_j. \quad (9)$$

若  $\varphi_j$  已知, 上式包含  $3M$  个未知量和  $MN$  个方程, 未知数  $a'_j, b'_j, c'_j$  仍可以通过最小二乘法求得。进而求得相移量为:

$$\delta_i = \arctan(-c'_i/b'_i). \quad (10)$$

### 3.3 收敛判断

将由式(10)得到的一组相移量  $\delta_i$  作为下一次迭代运算时的已知量, 重复步骤 1 和 2, 可以使计算得到的相移量的值不断接近真实值。同时随着迭代次数的增多, 相邻两次迭代得到的相移量越来越接近。经过  $k$  次迭代运算之后, 如果满足:

$$\max |\delta_i^k - \delta_i^{k-1}| < \epsilon, \quad (11)$$

则得到的相位分布即为最终所求的相位分布。式中:  $\max$  表示求最大值运算,  $\epsilon$  是一个小量。

迭代时间由迭代次数和参与运算的图像大小以及采用的相移步数  $M$  决定。在图像大小和相移步数确定的情况下, 迭代次数与迭代初值和的取值有关, 可以用投影光栅的相移值  $(i-1) \cdot (2\pi/M)$  作为迭代初值  $\delta_i$ ,  $\epsilon$  一般取  $10^{-4}$  左右, 在迭代以前需预先设定好。

## 4 计算机模拟与实验

为了验证本文所提理论的正确性, 进行了计算机仿真, 待测物体为一高度为 50 mm 的“圆锥”, 如图 3 所示。计算机模拟 CCD 不同时刻拍摄到的 5 帧变形条纹图, 物体运动方向与光栅栅线的夹角  $\theta = 3^\circ$ , 相邻两帧变形条纹图间的相移为  $2\pi/5$ 。物体的相邻两帧变形条纹图中沿水平方向移动的距离分别为 12、8、12、6 pixel。其中一帧的变形条纹图如图 3(b) 所示。

提取各帧变形条纹图的调制度作为像素匹配依据, 如图 3(c) 所示, 得到像素匹配后的物体像位置相同的各帧变形条纹图。首先采用满周期等相移算法计算物体的相位分布, 经过相位高度映射后, 物体的三维重构结果如图 4(a) 所示, 其对

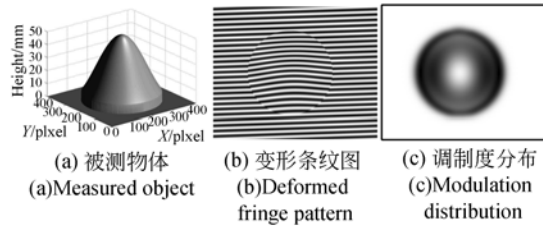


图 3 计算机仿真

Fig. 3 Simulated measurement

应的测量误差分布如图 4(b) 所示, 其均方根为 0.346 8 mm。采用最小二乘法迭代计算物体相位, 经相位高度映射后, 物体的三维重构结果如图 5(a) 所示, 对应测量误差的分布如图 5(b) 所示, 其均方根为 0.012 9 mm。

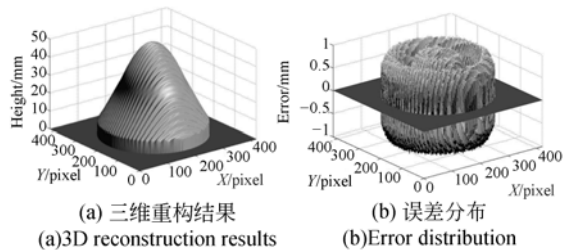


图 4 满周期等相移算法测量结果

Fig. 4 3D reconstruction based on synchronous detection

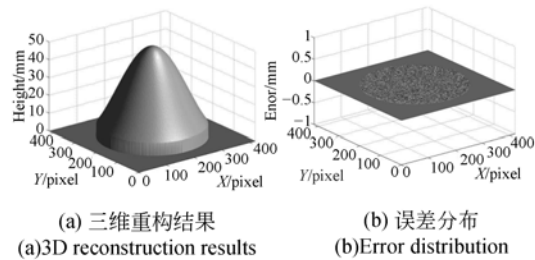


图 5 最小二乘法迭代测量结果

Fig. 5 3D reconstruction based on least-square iteration

模拟测量结果表明, 当物体运动方向与相移方向不垂直时, 物体运动产生的附加相移会影响满周期等相移算法的解相精度; 文中验证了采用最小二乘法迭代计算相位的可行性, 并且证明了这种方法具有较高的测量精度。

为了进一步验证本文所提方法的实用性, 进行了实物实验, 被测物体如图 6 所示。在测量过程中, 采用数字光投影仪 (Hitachi HCP-75X) 投影正弦条纹, CCD (MTV1881EX) 采集变形条纹。

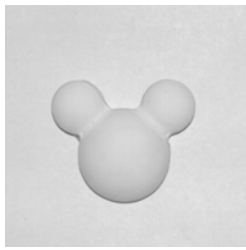


图 6 被测物体  
Fig. 6 Measured object

调整投影系统和采集系统, 在投影到参考面上的光栅栅线方向和物体运动方向的夹角  $\theta$  不同的情况下, 采集了 4 组变形相移条纹图, 图 7 为这 4 种情况下的第 5 帧的变形条纹, 物体运动方向为水平向右。其中图 7(a)中  $\theta_1 \approx 0^\circ$ , 图 7(b)中  $\theta_2 \approx 2^\circ$ , 图 7(c)中  $\theta_3 \approx 4^\circ$ , 图 7(d)中  $\theta_4 \approx 5^\circ$ 。

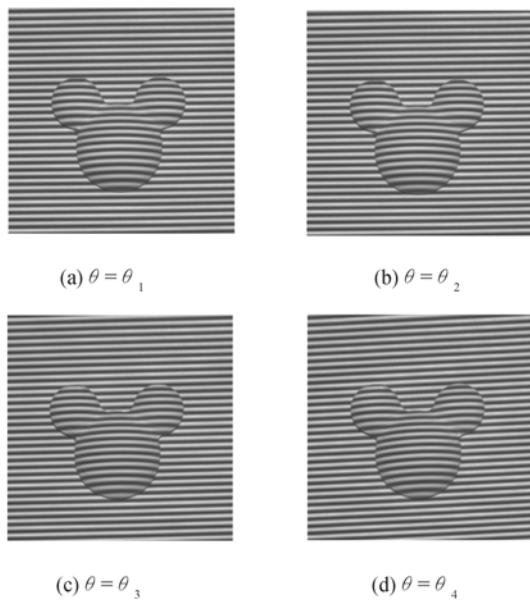
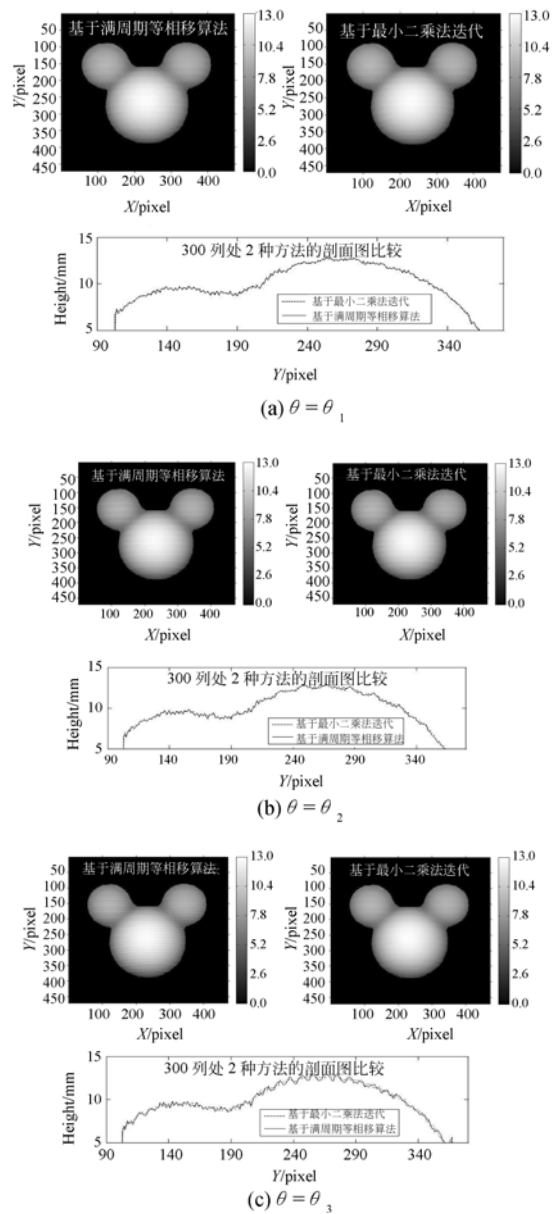


图 7 光栅栅线方向与物体运动方向夹角不同的变形条纹图  
Fig. 7 Deformed fringe patterns with different angles between grating line and object's displacement

对各组变形条纹图做像素匹配后, 分别采用满周期等相移算法和最小二乘法迭代法计算了相位分布, 经过相位高度映射后, 2 种方法的测量结果如图 8 所示。从图 8(a)可以看出, 在光栅栅线方向与物体运动方向近似平行的情况下, 2 种测量方法的精度相近。随着  $\theta$  的增大, 基于满周期等相移算法的测量精度逐渐下降, 而基于最小

二乘法迭代的测量精度基本保持不变, 说明本文提出的方法更具有普适性。

为了进一步评价本文所提方法的测量精度, 在光栅栅线方向与物体运动方向夹角分别为  $\theta_1$ 、 $\theta_2$ 、 $\theta_3$ 、 $\theta_4$  的情况下, 分别采用满周期等相移算法和最小二乘法迭代算法对高度分别为 7、10、17 mm 的平面进行了测量, 并对测量结果做了误差分析, 计算得到的均方根误差 (Root-Mean-Square, RMS) 如表 1、表 2 所示。表中的数据进一步说明随着  $\theta$  的增大, 测量系统引入的附加相移会对满周期等相移算法的测量精度产生影响, 而本文所提方法可有效解决这一问题, 且具有可观的测量精度。



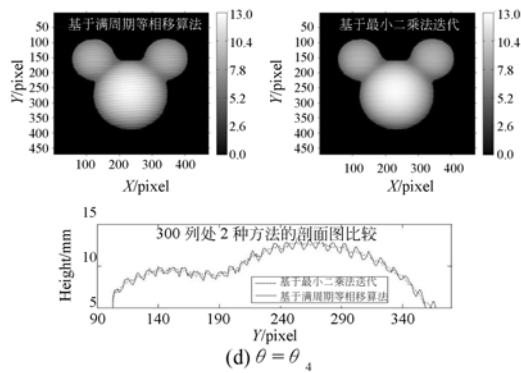


图 8 栅线方向与物体运动方向夹角不同时的三维重构结果对比

Fig. 8 3D reconstruction results with different angles between grating line and object's displacement

表 1 基于满周期等相移算法的均方根误差

Tab. 1 RMS errors based on synchronous detection (mm)

	7 mm	10 mm	17 mm
$\theta = \theta_1$	0.169 1	0.157 4	0.127 6
$\theta = \theta_2$	0.194 1	0.171 2	0.143 0
$\theta = \theta_3$	0.257 6	0.231 1	0.186 3
$\theta = \theta_4$	0.419 0	0.355 6	0.294 0

表 2 基于最小二乘法迭代的均方根误差

Tab. 2 RMS errors based on least-square iteration

	7 mm	10 mm	17 mm
$\theta = \theta_1$	0.169 9	0.154 6	0.126 9
$\theta = \theta_2$	0.157 7	0.154 3	0.123 9
$\theta = \theta_3$	0.163 7	0.158 6	0.131 7
$\theta = \theta_4$	0.165 1	0.169 9	0.134 4

## 参考文献:

- [1] 漆志平, 冯红霞. 在线测量技术在数字化车间应用探索[J]. 装备制造技术, 2012, (10):41-43.  
 QI ZH P, FENG H X. Resarch on the application of on-line measuring technique in digital workshop [J]. *Equipment Manufacturing Technology*, 2012, (10):41-43. (in Chinese)
- [2] 戴美玲, 杨福俊, 何小元. 基于双频彩色光栅投影测量不连续物体三维形貌[J]. 光学精密工程, 2013, 21(1):7-12.  
 DAI M L, YANG F J, HE X Y. Three-dimensional shape measurement of objects with discontinuities by dual-frequency color fringe projection [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(1):7-12. (in Chinese)
- [3] 蒋明, 张曙, 何小元. 鲤鱼尾鳍瞬时三维形态测量[J]. 光学精密工程, 2009, 17(9):2165-2169.  
 JIANG M, ZHANG SH, HE X Y. Instantaneous three-dimensional profile measurement of tail fin of carp [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(9):2165-2169. (in Chinese)
- [4] 刘晨, 金施群, 费业泰, 等. 应用空间编码投影法测量三维大物体面形[J]. 光学精密工程, 2008, 16(11):2269-2273.  
 LIU CH, JIN SH Q, FEI Y T, et al. Shape measurement of 3D large object by space code projection [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(11):2269-2273. (in Chinese)

## 5 结 论

本文将最小二乘法迭代计算相位的方法应用到在线 PMP 系统中, 实现了在无需保证光栅相移方向与运动方向垂直的情况下, 仍能准确计算相位分布, 从而放宽了对测量装置空间位置的约束条件。另外, 将任意栅线方向的正弦光栅投影于物体表面, 经过像素匹配获得任意步长相移条纹后, 即用最小二乘法迭代获得相位分布。像素匹配过程引入的附加相移不会影响测量精度, 从而简化了测量系统的装调过程。

用计算机模拟了栅线方向和物体运动方向存在微小夹角时, 像素匹配引入的附加相移对满周期等相移算法解相精度的影响, 结果显示, 物体表面出现了明显波纹。实验论证了采用最小二乘法迭代计算相位可获得较高精度, 其测量均方根误差可达到 0.012 9 mm。实际测量过程还显示, 最小二乘法迭代算法优势明显: 随着  $\theta$  的增大, 满周期等相移算法的测量精度逐渐下降, 而最小二乘法迭代法的测量精度基本保持不变。对高度分别为 7 mm、10 mm 和 17 mm 的平面进行测量, 当  $\theta$  取 4 个不同值时, 基于满周期等相移算法的均方根误差最大达到 0.419 0 mm, 而基于最小二乘法迭代测量法的误差均方根均不高于 0.169 9 mm。

- [5] SAI SIAVA G, PRAMOD R. Fringe projection techniques: Whither we are? [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2010, 48(2):133-140.
- [6] SRINIVASAN V, LIU H C, HALIOUA M. Automated phase-measuring profilometry of 3-D diffuse objects [J]. *Applied Optics*, 1984, 23 (18): 3105-3108.
- [7] WANG Y J, ZHANG S. Superfast multifrequency phase-shifting technique with optimal pulse width modulation [J]. *Optics Express*, 2011, 19 (6): 5149-5155.
- [8] 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): 1139-1143.  
YU R ZH, CAO Y P. A three dimensional on-line inspecting method for workpiece by PMP [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, 37(6):1139-1143. (in Chinese)
- [9] 钟立俊, 曹益平. 相移正交物体运动方向的在线相位测量轮廓术[J]. *光学学报*, 2009, 29(2): 417-420.  
ZHONG L J, CAO Y P. An on-line phase measuring profilometry with phase-shifting perpendicular to moving direction of measured object [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(2):417-420. (in Chinese)
- [10] WU Y CH, CAO Y P, LU M T, *et al.*. An on-line phase measuring profilometry based on modulation [J]. *Optica Applicata*, 2012, 42(1):31-41.
- [11] WU Y CH, CAO Y P, XIAO Y SH, *et al.*. An on-line phase measuring profilometry: Processed modulation using for pixel matching [J]. *Optik*, 2013, 124(10):887-891.
- [12] 武迎春, 曹益平, 史顺平, 等. 基于正交双频光栅投影的在线三维检测[J]. *中国激光*, 2012, 39(5): 0508003.  
WU Y CH, CAO Y P, SHI SH P, *et al.*. On-line Three-Dimensional Inspection Based on Orthogonal Two-Frequency Grating Projection [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39 (5): 0508003. (in Chinese)
- [13] YANG L, YI P C, ZHEN F H, *et al.*. A three dimensional on-line measurement method based on five unequalsteps phase shifting [J]. *Optics Communications*, 2012, 285(21-22):4285-4289.
- [14] ZHAO Y, WANG B H. Advanced iterative algorithm for phase extraction of randomly phase-shifted interferograms [J]. *Optics Letters*, 2004, 29(14):1671-1673.
- [15] XU J CH, XU X, PENG H SH. Spatial carrier phase-shifting algorithm based on least-squares iteration [J]. *Applied Optics*, 2008, 47 (29): 5446-5453.
- [16] LI W S, SU X Y, LIU ZH B. Large-scale three-dimensional object measurement: a practical coordinate mapping and image data-patching method [J]. *Applied Optics*, 2001, 40(20):3326-3333.
- [17] XIAO Y SH, CAO Y P, WU Y CH. Improved algorithm for phase-to-height mapping in phase measuring profilometry [J]. *Applied Optics*, 2012, 51(8):1149-1155.

#### 作者简介:



武迎春(1984—),女,山西朔州人,博士,讲师,2008年于山西大同大学获得学士学位,2013年于四川大学大学获得博士学位,主要从事光学三维传感及光信息处理等方面的研究。E-mail: ycwu.scu@qq.com



曹益平(1962—),男,湖南益阳人,教授,博士生导师,1984年于华中科技大学获得学士学位,1998年于中国科学院光电所获得硕士学位,2003年于四川大学获得博士学位,现为四川大学三维光电技术研究所所长,四川省光学重点实验室主任,享受国务院政府特殊津贴专家,主要从事光学三维传感、光信息处理以及光机电一体化等方面的研究。E-mail: ypcao@scu.edu.cn