

文章编号: 0253-2239(2009)02-0417-04

# 相移正交物体运动方向的在线相位测量轮廓术

钟立俊 曹益平

(四川大学光电科学技术系, 四川 成都 610064)

**摘要** 提出了一种新型的基于相位测量轮廓术(PMP)的在线三维检测方法。只需要使投射的条纹相移方向与物体移动方向垂直, 尽管由于物体运动使 CCD 采集变形条纹中物体坐标不一致, 但通过像素匹配, 可以使各帧图像物点坐标一一对应, 得到与传统静态 PMP 等效的相移条纹图, 即可重构出物体, 实现在线三维测量。对一实平面进行了在线与静态 PMP 测试对比实验。结果显示该在线 PMP 方法与传统静态 PMP 方法的均方差之差仅为 0.007 mm, 表明该在线 PMP 方法具有高精度性; 对一实物进行了在线测试实验, 很好地重构出了被测物体的三维轮廓, 从而验证了该方法的可行性和有效性。

**关键词** 三维检测; 在线测量; 相位测量轮廓术; 像素匹配; 感兴趣区域

**中图分类号** TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092902.0417

## An On-Line Phase Measuring Profilometry with Phase-Shifting Perpendicular to Moving Direction of Measured Object

Zhong Lijun Cao Yiping

(Department of Optoelectronics, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China)

**Abstract** A new method of on-line 3D measurement based on phase measuring profilometry (PMP) has been proposed. It only needs to ensure the phase-shift direction of the projected sinusoidal stripe perpendicular to the object's moving direction. Though the spatial coordinates of the captured distorted stripe images by CCD are inconsistent, by pixel matching algorithm, this inconsistency can be excluded, in addition, the equivalent phase-shifting distorted patterns needed by PMP can be obtained successfully. The profile of the measured object can be reconstructed which put the on-line 3D measurement into practice. A contrast experiment on a known plane inspected by the on-line PMP and the traditional static PMP is carried on, and the difference of mean square deviation between the two methods is only 0.007 mm, which shows the high veracity of the on-line PMP. A complex workpiece has also been on-line inspected, and the 3D profile of the workpiece can be reconstructed perfectly, which shows the feasibility and validity of the on-line PMP.

**Key words** 3D inspection; on-line measurement; phase measuring profilometry; pixel matching; region of interest

## 1 引 言

相位测量轮廓术<sup>[1~4]</sup>(PMP)是目前采用面结构光三维测量方法中一种精度最高的方法, 通常要求物体固定不动。通过一定相移规则主动控制相移, 当对应获取了准确的相移变形条纹图, 即可在被测物体各像素点上实现点对点的相位解相; 但在线三维检测中, 物体是运动的, 如果采用上述 PMP 方

法, 将会给相移控制带来困难。并且所采集的变形条纹图中的物体和相位不一致, 无法实现相位解相, 不适合在线三维检测。如果能使投射的条纹相移方向与被测物体移动方向垂直, 用 CCD 采集物体运动过程中对应的变形条纹图, 通过特征标记进行像素匹配<sup>[5]</sup>, 使各帧图像物点像素坐标一一对应, 即可解得正确的相位, 重构出三维物体, 实现在线三维测

**收稿日期**: 2008-07-11; **收到修改稿日期**: 2008-08-15

**基金项目**: 国家 863 计划(2007AA01Z333), 四川省科技攻关项目(2006Z01-028)和四川省学术和技术带头人培养基金(07GRC-01)资助课题。

**作者简介**: 钟立俊(1982-), 男, 硕士研究生, 主要从事三维光学信息处理方面的研究。E-mail: zhongcountry@yahoo.cn

**导师简介**: 曹益平(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光学三维传感、光信息处理和光机电一体化等方面的研究。

E-mail: caoyiping@mail.sc.cninfo.net

量<sup>[6]</sup>。据此,提出了一种新型的在线 PMP 三维检测方法,能够达到与传统 PMP 相近的精度,为避免混淆,将传统 PMP 称为静态 PMP。

## 2 静态 PMP 原理

静态 PMP 原理如图 1 所示,当一个正弦光栅被投影到三维漫反射物体表面上时,从成像系统获取的变形光栅像可表示为

$$I(x, y) =$$

$$R(x, y) \{A(x, y) + B(x, y) \cos[\Phi(x, y)]\}, \quad (1)$$

式中  $R(x, y)$  表征物体表面的反射率,  $A(x, y)$  表征背景强度,  $B(x, y)$  为受物体面形反射率影响的光场调制强度, 相位函数  $\Phi(x, y)$  为调制光场的相位分布, 它表示了条纹的变形, 并且与物体的三维面形有关。

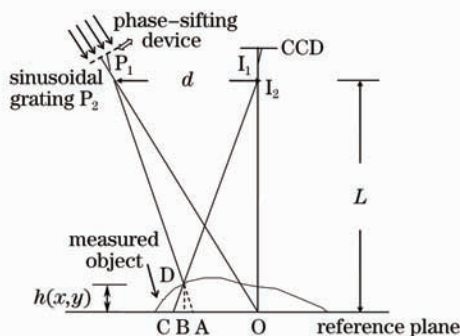


图 1 静态 PMP 原理图

Fig. 1 Static PMP principle

在静态 PMP 中,常用标准  $N$  帧相移(等间距满周期)算法,计算截断的相位函数  $\Phi(x, y)$ 。设第  $n$  帧条纹图的相移为  $\Delta_n$ , 且有

$$\Delta_n = 2\pi n/N, \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (2)$$

当投影到静止不动的物体表面上的正弦光栅每次移动其周期的  $1/N$  时,变形条纹图的相位被移动  $2\pi/N$ , 所产生的一个新的强度函数  $I_n(x, y)$  可表示为

$$I_n(x, y) =$$

$$R(x, y) \{A(x, y) + B(x, y) \cos[\Phi(x, y) + \Delta_n]\}, \quad n = 1, 2, \dots, N, \quad (3)$$

从  $N(N \geq 3)$  帧相移条纹图中计算出的相位函数<sup>[7,8]</sup>  $\Phi(x, y)$  为

$$\Phi(x, y) = \arctan \frac{\sum_{n=1}^N I_n(x, y) \sin \Delta_n}{\sum_{n=1}^N I_n(x, y) \cos \Delta_n}. \quad (4)$$

由于(4)式的反正切计算,使相位被截断在  $(-\pi, \pi)$  之间,是离散的。实际上物体表面的相位

是连续分布的,故需对截断相位进行展开,根据采样定理,当采样点足够密集,且相位变化的梯度小于  $\pi$  的情况下,可以通过扫描的方法,比较相邻像素点值并进行展开,即检验相邻点包裹相位差的绝对值,当其大于  $\pi$  时,加上或减去  $2\pi$  的整数倍,使它小于  $\pi$ ,然后把校正后的相位差累加求和,就可以得到展开后的绝对相位  $\Psi(x, y)$ ,再通过已建立的相位与高度之间的映射算法<sup>[9~11]</sup>,就可以获取物体的三维面形信息,其高度分布为  $h(x, y)$ ,并满足下式:

$$\frac{1}{h(x, y)} = a(x, y) + b(x, y) \frac{1}{\Psi(x, y)} + c(x, y) \frac{1}{\Psi^2(x, y)}, \quad (5)$$

式中  $a(x, y)$ 、 $b(x, y)$ 、 $c(x, y)$  三个参数是通过平面标定实验,由最小二乘法精确获得的。

## 3 在线 PMP 原理

如图 2 所示,为便于阐述,建立  $XYZ$  直角坐标系。 $P$  和  $C$  分别为数字投影仪(DLP)和 CCD 的光心, DLP 和 CCD 主光轴相交所得 POC 平面在  $YOZ$  平面内。物体沿  $X$  轴正方向运动,使得 DLP 投出的正弦光栅条纹走向平行于物体运动方向,即沿  $X$  轴方向,这样就可以保证正弦条纹相移沿  $Y$  轴方向移动,正好与物体移动方向正交。同时以载物台作为参考平面,并在上面设置若干具有明显特征的标记,以辅助完成像素匹配。当物体随载物台移动时,依次投影相移正弦条纹到物体表面上。由于正弦条纹相位分布走向和相移方向均与物体运动方向正交,对应采集的变形条纹分布不受运动的影响,仅随物体移动而整体移动。此时各变形条纹图之间仅存在物体像素不对应问题,如果在采集变形条纹的同时也采集到了上述设置的特征标记,利用同一标记在各帧变形条纹图中的位置关系,通过像素匹配,即

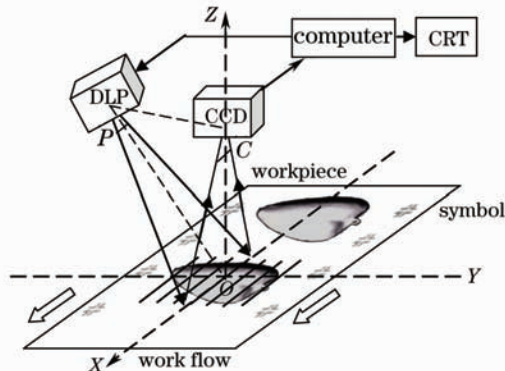


图 2 在线 PMP 系统示意图

Fig. 2 On-line PMP system

可获得与静态 PMP 所需的等效变形条纹,最后用静态 PMP 算法,实现三维重构。该在线 PMP 建立的具体数学模型如下:在物体移动过程中可通过计算机控制 DLP 投射的正弦相移条纹,同时控制 CCD 对应采集  $N$  帧相移变形条纹图,其对应变化位置  $(x_n, y_n)$  的光强  $I_n(x_n, y_n)$  可以表示为

$$I_n(x_n, y_n) = R(x_n, y_n) \{A(x_n, y_n) + B(x_n, y_n) \times \cos[\Phi(x_n, y_n) + \Delta_n]\}, \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (6)$$

当系统和环境一定时,  $R(x_n, y_n)$ ,  $A(x_n, y_n)$  和  $B(x_n, y_n)$  受  $(x_n, y_n)$  位置改变的影响甚微,因此,可近似认为它们都是恒定值,对应记为:  $R, A, B$ 。因此, (6) 式变为

$$I_n(x_n, y_n) = R \{A + B \cos[\Phi(x_n, y_n) + \Delta_n]\}, \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (7)$$

由于物体相对于 CCD 运动,使 CCD 采集的变形条纹中物点像素坐标发生了改变,就必须采取像素匹配方法,使  $N$  帧变形条纹中物点的像素位置实现一一对应。

图 3 是像素匹配效果示意图,  $I_1(x_1, y_1)$  和  $I_2(x_2, y_2)$  是用 CCD 采集的第一、二帧变形条纹图,二者的物体和标记的坐标不同,并且第二帧条纹相对于第一帧还产生了相移。计算两帧变形条纹图中对应标记的“重心”,如图 3 中左边两帧图所示,第二帧相对于第一帧对应物点的象素坐标改变了  $M$ , 反向平移第二帧变形条纹图  $M$  个像素,使之与第一帧变形条纹图的对应标记“重心”重合,从而实现像素匹配,如图 3 中右边两帧图所示,便可使第二帧变形条纹图的物点像素坐标与第一帧变形条纹图的物点像素坐标一一对应。第二帧变形条纹图的边缘会丢失一些信息,只要合理放置被测物体使之不落在该区域,就可以采用图像裁剪的方法,提取出如图 3 中

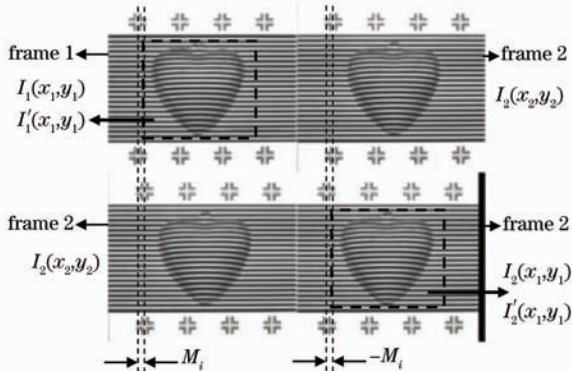


图 3 像素匹配

Fig. 3 Pixel matching

虚线框范围所示的感兴趣区域有效变形条纹图  $I'_1(x_1, y_1)$  和  $I'_2(x_1, y_1)$ 。上述图像处理过程总称为第二帧图像相对第一帧图像的像素匹配,记为

$$I'_2(x_1, y_1) = \prod \{I_2(x_2, y_2), I'_1(x_1, y_1)\}, \quad (8)$$

其中  $\prod \{\cdot\}$  称为像素匹配算子。同理,第 3 至  $N$  帧变形条纹图的像素匹配为

$$I'_n(x_1, y_1) = \prod \{I_n(x_n, y_n), I'_1(x_1, y_1)\}, \quad n = 3, 4, \dots, N \quad (9)$$

$I'_1(x_1, y_1), I'_2(x_1, y_1), \dots, I'_N(x_1, y_1)$  即为等效的静态 PMP 相移条纹图,此时便可用静态 PMP 方法解得其相位分布  $\Phi'(x, y)$  为

$$\Phi'(x_1, y_1) = \arctan \frac{\sum_{n=1}^N I'_n(x_1, y_1) \sin \Delta_n}{\sum_{n=1}^N I'_n(x_1, y_1) \cos \Delta_n}, \quad (10)$$

再将 (10) 式所得包裹相位展开及通过 (5) 式的高度映射算法,即可重建第 1 帧图像表征的被测物体三维轮廓,实现物体的在线三维检测。

## 4 实验及结果分析

选择一距参考平面高度已知的平面,用在线 PMP 方法和传统静态 PMP 方法分别检测其处于运动和静止的情况下的三维信息,并进行比较。实验系统示意图如图 2 所示, DLP 的型号为 CP-HX6500, CCD 型号为 MT881EX。

实验系统经系统标定处理,建立好相位与高度的映射关系。待测物体为一已知高度为  $h_0 = 5.7$  mm 的平面,由计算机编程产生  $N = 5$  帧相移正弦条纹图。控制 DLP 依次投影到载物台静止和运动两种情况下的被测平面上,由 CCD 对应获取相应的变形条纹,经 DT3152 图像采集卡采集到计算机内处理,分别用静态 PMP 方法和在线 PMP 方法重构出的平面如图 4 所示。计算出两者重构的高度与已知高度  $h_0$  的平均绝对误差分别为 0.056 mm、0.061 mm,均方差分别为 0.069 mm、0.076 mm。两者的平均绝对误差和均方差相差仅为 0.005 mm 和 0.007 mm,可知两种方法的精度非常接近。经过多次这样的实验,都达到了同样的效果,可见在线 PMP 方法的精度与静态 PMP 方法的精度相近,并能有效获取被测物体三维信息,可以用于在线三维检测。

鉴于上述实验的可行性和高精度性,又进行了实物测试实验,被测物体是一“心”型物体,如图 5 所示。图 6 是按上述在线 PMP 方法对其进行检测并

重构出的三维物体图。从而验证了该在线三维检测方法可行性和有效性。

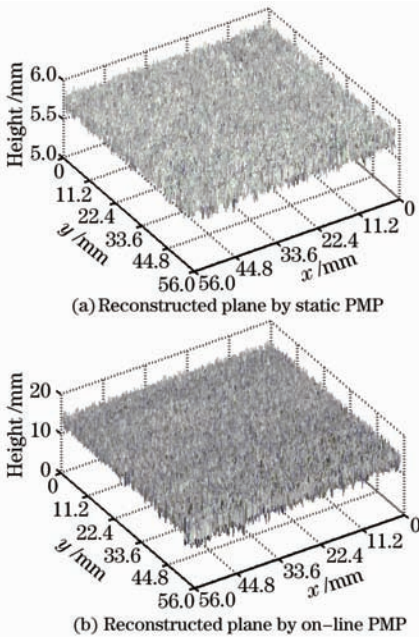


图 4 重构平面

Fig. 4 Reconstructed plane

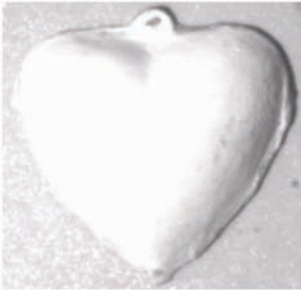


图 5 实物图

Fig. 5 Object

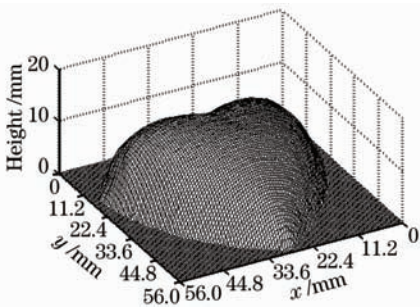


图 6 在线检测重构物体

Fig. 6 Reconstructed object by on-line inspection

## 5 结 论

提出了一种在线 PMP 三维检测新方法。只要使被测物体移动方向与条纹相移方向垂直,用 CCD 采集物体移动过程中对应的  $N$  帧变形条纹,并采用

特征标记,进行像素匹配,产生与传统静态 PMP 等效的相移效果。然后再解相和高度映射,就可获取其三维信息,重构出物体三维轮廓,并且能够达到与传统静态 PMP 相近的检测精度。这种方法只需要在投射出每帧光栅图后立即采集就行,对传送带运行速度没有特殊要求,使其适用范围更广,是 PMP 在在线检测中的一个突破和尝试。实验结果验证了本方法的有效性,可行性和高精度性。为工业生产提供了一种快捷、非接触、无损、高精度的工件在线三维检测方法。

## 参 考 文 献

- Gai Shaoyan, Da Feipeng. A new fast phase unwrapping method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(2): 259~267  
盖绍彦,达飞鹏. 一种新的快速解相位方法[J]. *光学学报*, 2008, **28**(2): 259~267
- Li Yong, Su Xianyu. New method for system calibration in phase measurement profilometry with large view field[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(8): 1162~1166  
李 勇,苏显渝. 一种大视场相位测量轮廓术系统标定方法[J]. *光学学报*, 2006, **26**(8): 1162~1166
- Tian Jindong, Peng Xiang. Approach for three-dimensional digital Imaging via position-shift point array projection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(10): 1319~1323  
田劲东,彭 翔. 位错点阵投影的三维数字成像[J]. *光学学报*, 2005, **25**(10): 1319~1323
- Jin Guanchang, Bao Naikeng. Surface detection and 3D profilometry for microstructure using optical metrology[J]. *Opt. Lasers Eng.*, 2001, **36**(1): 1~9
- Zhang Wuming, Zhong Yuexian, Li Renju. Sub-pixel matching algorithm for projected grating 3D surface measurements[J]. *J. Tsinghua University*, 2008, **48**(3): 412~414  
张吴明,钟约先,李仁举. 投影栅三维形面测量中亚像素匹配算法[J]. *清华大学学报*, 2008, **48**(3): 412~414
- Yoneyama S, Morimoto Y, Fujigaki M *et al.*. Phase-measuring profilometry of moving object without phase-shifting device[J]. *Opt. Lasers Eng.*, 2003, **40**(3): 153~161
- Zhu Yongjian, Liu Liren, Luan Zhu *et al.*. New quality map based on modulation for phase unwrapping algorithm[J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(5): 667~672  
朱勇建,刘立人,栾 竹等. 相位解包裹算法中基于调制度的新质量图[J]. *中国激光*, 2006, **33**(5): 667~672
- H. O. Saldner, J. M. Huntley. Temporal phase unwrapping: application to surface profiling of discontinuous objects [J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(13): 2770~2774
- Shi Zhan, Zhao Hong, Zhang Lu. Phase-unwrapping method based on dual frequency colorful fringe projection [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(3): 461~465  
施 展,赵 宏,张 璐. 基于双频彩色条纹投影的相位测量去包裹方法[J]. *光学学报*, 2007, **27**(3): 461~465
- Wu Qingyang, Su Xianyu, Xiang Liqun *et al.*. A new calibration method for two-sensor measurement system based on line-structure light[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(2): 259~264  
吴庆阳,苏显渝,向立群等. 线结构光双传感器测量系统的标定方法[J]. *中国激光*, 2007, **34**(2): 259~264
- Song Wanzhong, Su Xianyu, Cao Yiping. A new method of three-dimensional coordinates calibration in phase measuring profilometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(3): 272~277  
宋万忠,苏显渝,曹益平. 相位测量轮廓术中三维坐标校准新方法[J]. *光学学报*, 2003, **23**(3): 272~277