

# PMP 中基于亚像素相移的噪音抑制算法\*

应朝福<sup>1,2</sup>, 苏显渝<sup>2</sup>, 刘元坤<sup>2</sup>

(1 浙江师范大学 信息光学研究所, 浙江 金华 321004)

(2 四川大学 光电科学技术系, 成都 610064)

**摘 要:**提出一种基于亚像素相移的噪音抑制算法,通过正弦条纹灰度的连续变化来实现亚像素相移,从而增加相移帧数.采用 N-Bucket 算法,解决了相移帧数增加后的计算量问题.模拟及实验表明,该方法可以有效地抑制噪音影响,提高测量准确度.

**关键词:**信息光学;相位测量轮廓术;亚像素;相移算法;噪音抑制

中图分类号:TN247

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2008)06-1148-4

## 0 引言

相位测量轮廓术<sup>[1-4]</sup> (Phase Measuring Profilometry, PMP)是一种采用结构光照明的三维面形测量方法,采用正弦条纹投影和数字相移技术,以较低廉的光学、电子和数字硬件设备为基础,以较高的速度和准确度获取和处理大量的三维数据.该方法已在工业检测、实物仿形、医学诊断等领域获得广泛应用.

在实际应用中,相位测量轮廓术的测量误差分为系统误差与随机误差.其中系统误差包括相移误差<sup>[5]</sup>和探测器的非线性误差<sup>[6]</sup>,随机误差一般是指噪音引起的误差.通常可以通过设计适当的算法来减小系统误差.目前广泛应用的基于数字投影设备(如:数字显微镜投影仪 DLP 或液晶投影仪等)的 PMP 系统,用电子图形的相移取代了初期的机械相移,增加了相移的灵活性,由于微细加工工艺保证了精密的像素间距,因此还可以实现零相移误差. PMP 系统的噪音主要来自两个方面:一个是探测器自身引起的噪音,如 CCD 相机的自身噪音就包括:散粒噪音、暗电流噪音和转移噪音;另一个是投影光场的不稳定,包括投影光源的不稳定以及环境光的随机变化,其中李万松<sup>[7]</sup>、黄磊<sup>[8]</sup>等人分析了环境光变化对 PMP 测量准确度的影响,并提出了相应的改进方法.一般地,随着条纹频率的提高,噪音引起的误差相应降低<sup>[9]</sup>,但是条纹周期的选择必须要满足抽样定理,因此条纹不能太密,而且还需要兼顾相位展开问题<sup>[10]</sup>;另外随着相移帧数的增加,噪音的影响也可以相应减小.在基于数字投影设备的相位测量轮廓术中,相移间隔为若干像素(并且在满周期

相移中,要求条纹周期与相移帧数成倍数关系),最小相移量为单个像素,因此相移帧数是有限的,也就是对噪音的抑制是有限的,从而影响了 PMP 系统的相位测量准确度.而实际上还可以通过正弦条纹灰度的连续变化来实现亚像素相移,从而增加相移帧数.本文分析了亚像素相移算法抑制噪音的原理,并采用 N-Bucket 算法,解决了相移帧数增加后的计算量问题.计算机模拟及实验均表明,亚像素相移算法可以有效抑制噪音的影响,使测量准确度得到很大的提高.

## 1 亚像素相移算法抑制噪音的基本原理

### 1.1 PMP 测量基本原理

PMP 测量系统需要投影正弦条纹图形到待测三维漫反射物体表面,条纹帧数由相移帧数决定,每幅条纹图之间有一定的相移量,相位测量轮廓术的测量原理如图 1.

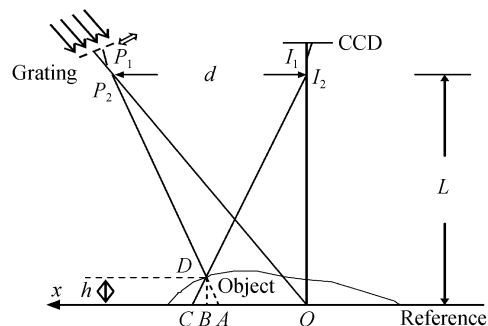


图 1 PMP 测量原理

Fig. 1 The principle of PMP

成像系统获取的变形条纹像可表示为

$$I_n(x, y) = A_n(x, y) + B_n(x, y) \cdot \cos[\phi(x, y) + \delta_n] \quad (1)$$

式中  $A_n(x, y)$  为背景光强,  $B_n(x, y)$  为条纹的对比度,  $\delta_n$  为附加相移值,物体高度信息被编码在相位分布  $\phi(x, y)$  中.对于 N 帧相移算法<sup>[1-3]</sup>,每次相移

\*国家自然科学基金(60527001)和浙江省自然科学基金(Y105030)资助

Tel: 0579-82298833 Email: ying@zjnu.cn

收稿日期: 2007-11-05

$2\pi/N$ (即  $\delta_n = 2\pi n/N$ ),共获得  $N$  幅条纹图,则相位分布

$$\phi(x, y) = -\arctan \left[ \frac{\sum_{n=1}^N I_n(x, y) \sin(2\pi n/N)}{\sum_{n=1}^N I_n(x, y) \cos(2\pi n/N)} \right] \quad (2)$$

由相位-高度映射算法即可获取物面高度分布  $z(x, y)$ . 由式(2)可知,在计算相位时,相位测量轮廓术是点对点的操作,每点的相位只跟每幅条纹图上该点的光强值有关,理想情况下各条纹图上对应点之间的光强差异仅由投影条纹的相移  $\delta_n$  决定,从而能准确地计算出相位  $\phi(x, y)$ .

### 1.2 亚像素相移算法抑制噪音

在 PMP 测量系统中,随着相移帧数的增加,可以有效地减少噪音的影响,在基于数字投影设备的相位测量轮廓术中,一般选用满周期相移,相移间隔为若干像素,条纹周期与相移帧数成倍数关系,最小相移量为单个像素.而实际上还可以通过正弦条纹灰度的连续变化实现亚像素相移,也就是通过将正弦条纹灰度的变化量细分,从而实现正弦条纹的亚像素相移.与整像素相移不同之处在于:整像素相移是将正弦条纹整体移动若干像素,而亚像素相移是通过改变每个像素上的灰度值使正弦条纹整体移动量小于一个像素.

当条纹周期为  $p$  个像素,那么最大相移帧数  $N_{\max} = p$ ,在亚像素相移算法中,则可以设定相移帧数  $N = k \times p$ , $k$  为整数且  $k > 1$ ,相应的每次相移量为  $2\pi/kp$ (即  $\delta_n = 2\pi n/kp$ ),共获得  $kp$  幅条纹图.那么随着相移帧数的大量增加,可以很好地抑制噪音的影响.

亚像素相移算法增加了计算量.但是,本文提出的亚像素相移算法还可以与采用积分的 N-Bucket 算法相结合<sup>[11-13]</sup>,即采用分段积分技术对亚像素相移得到的  $N = k \times p$  帧相移图像进行预处理,减少式(2)的计算量(类似地认为探测器在条纹图开始相移时就进行记录,记录过程一直持续若干帧相移条纹图).首先根据分段积分技术得

$$I_m(x, y) = \frac{1}{L} \sum_{n=m \times L+1}^{n=(m+1) \times L} I_n(x, y) \quad (3)$$

式中  $L$  表示参与积分的条纹帧数, $I_m(x, y)$  为分段积分后的新  $M$  帧相移条纹图中一幅.那么相应的相位分布为

$$\phi(x, y) = -\arctan \left[ \frac{\sum_{m=1}^M I_m(x, y) \sin(2\pi m/M)}{\sum_{m=1}^M I_m(x, y) \cos(2\pi m/M)} \right] \quad (4)$$

由式(4)可知,积分步长  $L$  需满足  $N/L$  为整数,并且  $M = N/L \geq 3$ ,因此提高了算法的灵活性.

## 2 计算机模拟

为验证理论分析的正确性,分别就 PMP 中条纹周期分别为 4、8 以及 16 个像素时,不同相移帧数下噪音引起的相位误差进行计算机模拟.模拟测量物体为 Peak 函数,如图 2(a).图 2(b)为条纹周期为 8 个像素时的变形条纹,CCD 相机的分辨率为  $512 \times 512$ ,正弦条纹灰度为  $0 \sim 256$ ,噪音为高斯分布,噪音的标准差(灰度等级)为 5.模拟结果如图 3.

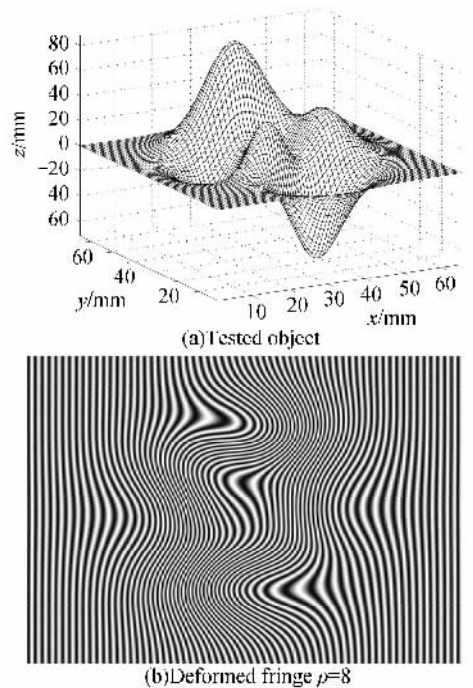


图 2 模拟实验

Fig. 2 Computer simulation

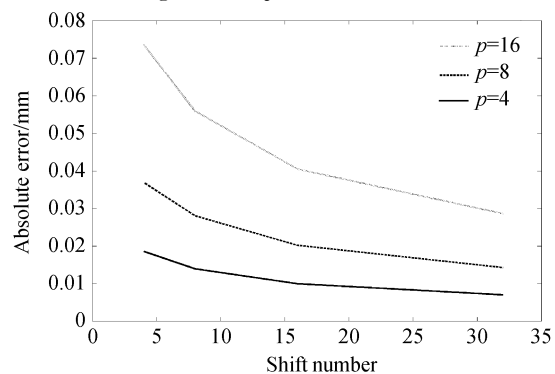


图 3 测量误差与相移次数的关系曲线

Fig. 3 Errors vs. phased-shift number at several fringe periods

从图 3 可知,随着相移帧数的逐步增加,噪音引起的测量偏差相应的会逐步降低;当条纹周期逐步减小(条纹频率增加)时,也可以减少噪音引起的测量偏差.

### 3 结论

实验中的 PMP 测量系统包括投影仪 SANYO PRO xtraX 和 JAI A50 CCD 相机,对平面物体进行测试(这里只选取了一个剖面),选用的正弦条纹周期分别为 8 和 16 个像素. 正弦条纹周期为 8 个像素时,实测的正弦条纹噪音的标准差(同一条纹图多次重复测量的偏差)为 1.861 5,相移帧数分别 4、8、16 和 32. 并以相移帧数为 32 时获取的相位分布为基准,则前 3 次的相位测量结果和该基准的偏差分别为:0.031 6,0.023 7,0.018 6. 正弦条纹周期为 16 个像素时,实测的正弦条纹噪音的标准差为 1.913 8,相移帧数分别 4、8、16、32 和 64. 以相移帧数为 64 时获取的相位分布为基准,则前 4 次的相位测量结果和该基准的偏差分别为:0.014 1,0.008 8,0.006 8,0.005 2. 从实验结果可知:随着相移帧数的增加,可以有效降低由噪音引起的测量误差,从而提高相位测量准确度.

本文提出的通过计算机控制数字投影设备,根据正弦条纹灰度的连续变化实现亚像素相移,并结合 N-Bucket 算法解决了多帧相移带来的计算量问题,计算机模拟和实际测量实验证明了该算法的合理性,为实际应用中合理地选择相移算法提供了理论依据.

#### 参考文献

- [1] SRINIVASAN Y, LIUAND H C, HALLIOUA M. Automated phase-measuring profilometry of 3-D diffuse objects[J]. *Appl Opt*, 1984, **23**(18): 3105-3108.
- [2] SU Xian-Yu, ZHOU Wen-Sen, von BALLY G, *et al.* Automated phase-measuring profilometry using defocused projection of the rochi grating[J]. *Opt Commun*, 1992, **94**(6): 561-573.
- [3] SCHMIT J, CREATH K. Window function influence on phase error in phase-shifting algorithm[J]. *Appl Opt*, 1996, **35**(28): 5642.
- [4] HAO Yu-dong, ZHAO Yang, LI Da-cheng. Nonlinear excess fraction method and its applications to profilometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(11): 1518-1522.
- 郝煜栋, 赵洋, 李达成. 非线性小数重合法及其在轮廓测量中的应用[J]. *光学学报*, 1999, **19**(11): 1518-1522.
- [5] LIANG Xiao-ping. An Investigation on the phase shift error and the optimal phase shift frequency in phase measuring profilometry[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 1999, **26**(2): 68-72.
- 梁晓萍. 位相测量轮廓术中相移误差和最佳相移次数的研究[J]. *光电工程*, 1999, **26**(2): 68-72.
- [6] ZHOU Li-bing, SU Xian-yu, WANG Li-wu. Analysis of errors introduced by detector nonlinearity in phase measuring profilometry[J]. *Laser Journal*, 2002, **23**(3): 19-21.
- 周利兵, 苏显渝, 王立无. 相位测量轮廓术中探测器非线性误差的分析[J]. *激光杂志*, 2002, **23**(3): 19-21.
- [7] LI Wan-song, SU Xian-yu, SU Li-kun, *et al.* Phase-measuring profilometry in non-constant environmental light [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(5): 617-623.
- 李万松, 苏显渝, 苏礼坤, 等. 非恒定环境光条件下的相位测量剖面术[J]. *光学学报*, 2000, **20**(5): 617-623.
- [8] HUANG Lei, SU Xian-yu, XIANG Li-qun. Error caused by non-constant environmental light and rectification in PMP[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2006, **33**(9): 81-84.
- 黄磊, 苏显渝, 向立群. 在 PMP 中环境光强变化引入的误差与校正[J]. *光电工程*, 2006, **33**(9): 81-84.
- [9] HUNTLEY J M, SALDNER H O. Error-reduction methods for shape measurement by temporal phase unwrapping [J]. *JOSA A*, 1997, **14**(12): 3188-3196.
- [10] HUNTLEY J M, SALDNER H O. Shape measurement by temporal phase unwrapping: comparison of unwrapping algorithms[J]. *Meas Sci Technol*, 1997, **8**(9): 986-992.
- [11] SURREL Y. Phase stepping: a new self-calibrating algorithm [J]. *Appl Opt*, 1993, **32**(19): 3598-3600.
- [12] HARIHANRAN P, OREB B F, EIJU T. Digital phase-shifting interferometry: a simple error-compensating phase calculation algorithm [J]. *Appl Opt*, 1987, **26**(13): 2504-2506.
- [13] QIAN Ke-mao, WU Xiao-ping. Method of undetermined coefficients for deriving error-compensating phase shifting algorithms[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2000, **29**(9): 848-851.

## Noise Reduction Based on Sub-Pixel Phase-shift Algorithm in PMP

YING Chao-fu<sup>1,2</sup>, SU Xian-yu<sup>2</sup>, LIU Yuan-kun<sup>2</sup>

(1 *Institute of Information Optics, Zhejiang Normal University, Jinhua, Zhejiang 321004, China*)

(2 *Department of Opto-Electronics, Sichuan University, Chengdu 610064, China*)

Received date: 2007-11-05

**Abstract:** An algorithm based on sub-pixel phase-shift technique is proposed, which is carried out by changing the intensity of digital grating continuously. The N-Bucket algorithm is also used to solve the computational load. The results of numerical simulation and experiments confirmed its ability of reducing the noise efficiently and improving the measurement precision.

**Key words:** Information optics; Phase measuring profilometry; Sub-pixel; Phase-shift; Noise reduction



**YING Chao-fu** was born in 1964, graduated in 1986 from Shandong University and received his M. S. degree in 2001 from Zhejiang University. As an associate professor he is working at Institute of Information Optics of Zhejiang Normal University. His research interests include optical information processing, holography and 3D sensing.