

文章编号:1004-4213(2010)02-0307-4

一种改进型 Stoilov 算法相位测量轮廓术*

武迎春,曹益平[†],钟立俊

(四川大学 光电科学技术系,成都 610064)

摘要:提出了一种采用主动控制相移量的改进型 Stoilov 算法,按主动设定的相移量事先设计好五幅完全等相移正弦光栅图,由计算机编程控制数字投影仪依次投影该五幅光栅至待测物体表面,并对应采集五帧变形条纹,用所设定的相移量直接替代 Stoilov 算法中由变形条纹图解算的相移量,提高了相位提取和三维重构准确度.实验结果表明,平均绝对误差优于 0.07,均方差优于 0.07.

关键词:信息光学;Stoilov 算法;相位测量轮廓术;改进算法;相位展开;三维重构

中图分类号:TN247

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20103902.0307

0 引言

随着工业化进程的不断加快,光学、光电子等学科的研究不断深入及计算机技术的渗透,发展起来的三维传感技术^[1-4]备受人们关注.相位测量轮廓术(Phase Measuring Profilometry, PMP)^[5-6]以其准确度高、测量面积大、自动化程度高在工业检测、实物仿形、反求工程、生物医疗等领域受到了广泛的应用.它通过投影几帧正弦条纹到物体表面,由摄像系统获取变形条纹来获得物体的三维信息.它需要在测量过程中保证相邻两帧条纹的相移量相等,且总相移量为 2π 的整数倍,有一定的局限性.近年来在相移干涉术应用中出现的 Stoilov 算法^[7-8]只要求相移步长相等,无需确定步距值和 2π 整数倍的相移总量,在相移干涉术中得到广泛应用,将其引入到 PMP 中,使 PMP 更具灵活性.但由于受到环境光、系统数字化误差和探测器的非线性的影响,传统的 Stoilov 算法中相移量的计算方法可能会导致较大误差,位相展开时又会将误差传播开去,导致更大面积的解相误差,最后影响了相位提取和系统测量的准确度.

本文提出了一种采用主动控制相移量的方法,对传统的 Stoilov 算法进行了改进.运用步进电机或计算机软件控制投影光栅每次移动的位移量,将此位移量转化为相邻条纹的相移量,然后将它直接代入 Stoilov 算法表达式,可有效避开环境光、系统数字化误差和探测器的非线性给原始相移量计算带来

的影响^[9],提高了相位提取和三维测量准确度.

1 基于 Stoilov 算法的 PMP

相位测量轮廓术具有较高的测量准确度,可以用来获取三维物体的细节特征.如图 1,当一帧正弦

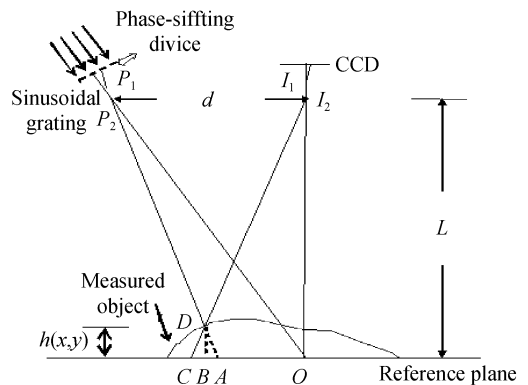


图 1 PMP 原理图

Fig. 1 Principle of PMP

条纹投影到三维物体表面时,经物体面形调制后,从成像系统中获得的变形条纹像可以表示为^[5]

$$I(x, y) = R(x, y) [A(x, y) + B(x, y) \cdot \cos \Phi(x, y)] \quad (1)$$

式中 $R(x, y)$ 表示物体表面的反射率, $A(x, y)$ 表示背景强度, $B(x, y)$ 为受物体面形反射率影响的光场调制强度,相位函数 $\Phi(x, y)$ 表示条纹的变形,与三维物体的面形有关.

连续投影 5 帧正弦条纹,两邻两帧条纹相移量为 Δ ,可以由相应的 5 帧变形条纹像获得反映物体面形分布的位相函数^[8]

$$\Phi = \arctan \left\{ \frac{2(I_2 - I_4)}{2I_3 - I_1 - I_5} \cdot \sin \Delta \right\} \quad (2)$$

式中

$$\sin \Delta = \sqrt{1 - \left[\frac{I_1 - I_5}{2(I_2 - I_4)} \right]^2} \quad (3)$$

* 国家高技术研究发展计划(2007AA01Z333)、国家重大专项(2009ZX02204-008)和四川省学术和技术带头人培养基金(07GRC-01)资助

[†] Tel:028-85463879 Email:caoyiping@mail.sc.cninfo.net
收稿日期:2009-03-27 修回日期:2009-05-14

式(2)的反正切计算使相位截断在 $(-\pi, \pi)$ 之间,需要对相位展开.展开后的绝对相位 $\Psi(x, y)$ 与物体的高度分布函数 $h(x, y)$ 存在以下关系

$$\frac{1}{h(x, y)} = a(x, y) + b(x, y) \frac{1}{\Psi(x, y)} + c(x, y) \frac{1}{\Psi^2(x, y)} \quad (4)$$

式中参量 $a(x, y)$ 、 $b(x, y)$ 、 $c(x, y)$ 作为系统参量标定获得^[10-12].

2 基于改进型 Stoilov 算法的 PMP

由式(2)可以看出,式(3)中 $\sin \Delta$ 计算结果的精确性会对相位的提取产生很大的影响.但由于受到环境光、系统数字化误差和探测器的非线性^[9]的影响,所采集的五帧变形条纹 $(I_1, I_2, I_3, I_4, I_5)$ 均带有误差,难免会出现以下几种异常情况:

1) $I_2 = I_4$ 导致分母为零, $\sin \Delta$ 无意义的情况. $\sin \Delta$ 的值取决于采集图像的光强,当 CCD 采集的光强 I_2, I_4 存在误差并以整数灰度值呈现,导致在某些像素位置出现 $I_2 = I_4$, 此时 $\sin \Delta$ 无意义,影响了解相.

2) 开方运算导致 $\sin \Delta$ 出现复数的情况. 如果物体的表面不平滑出现高度突跳,在计算相位时就会表现为灰度值的突跳,再加上灰度值是整数带来的误差,导致在某些像素位置出现 $\left[\frac{I_1 - I_5}{2(I_2 - I_4)} \right]^2 > 1$ 的情况,使 $\sin \Delta$ 呈复数,从而出现复数相位,引入误差.

3) $I_1 = I_5$ 导致相移量 Δ 恒等于 $\frac{\pi}{2}$ 的情况. 同样当 CCD 采集的光强 I_1, I_5 存在误差并以整数灰度值呈现,导致在某些像素位置出现 $I_1 = I_5$, 此时无论 I_2, I_3, I_4 如何取值, $\sin \Delta$ 的值都会是 1, 即相移量 Δ 被误计算为 $\frac{\pi}{2}$.

4) 除法运算引入超大误差的情况. 在某些像素位置,尽管式(3)中的分母 $2(I_2 - I_4)$ 不为零但是一个小量,当分子 $(I_1 - I_5)$ 出现微小变化时,会对除法运算的结果影响很大,从而使 $\sin \Delta$ 偏离真值较远,引入超大相位误差.

因此,以上 4 种异常情况可能使式(3)出现误差,影响相位提取准确度.实际上在相位测量轮廓术中,投影光栅是事先设计好的,其周期 P 为已知,如果主动控制投影光栅每次移动已知位移量 L , 即相移量为

$$\Delta = \left(\frac{L}{P} \right) \times 2\pi \quad (5)$$

特别当投影系统采用数字投影仪 DLP 时,可事先设计好五帧等相移量的光栅图,它们的周期为 P_x 个像素,相邻光栅图之间的实际移动量为 L_x 个像素,这样即可确保每步相移量恒定并且相移量准确为

$$\Delta = (L_x / P_x) \times 2\pi \quad (6)$$

因此改进后的 Stoilov 算法为

$$\Phi = \arctan \left\{ \frac{2(I_2 - I_4)}{2I_3 - I_1 - I_5} \cdot \sin \left(\frac{2\pi L_x}{P_x} \right) \right\} \quad (7)$$

这样就避免了环境光、系统数字化误差和探测器的非线性给传统的相移量的计算方法带来的误差,提高了相位提取和系统测量的准确度.

3 实验及结果分析

为了验证改进后的 Stoilov 算法的有效性,我们进行了实验验证,实验的系统框图如图 2,其中 DLP 为数字光投影仪,型号为 CP-HX6500, CCD 型号为 MTV1881EX, PC 为计算机, CRT 为显示器.

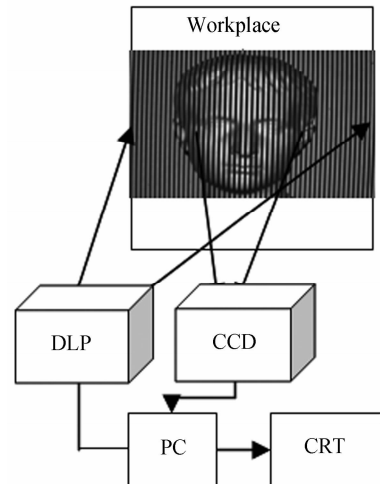
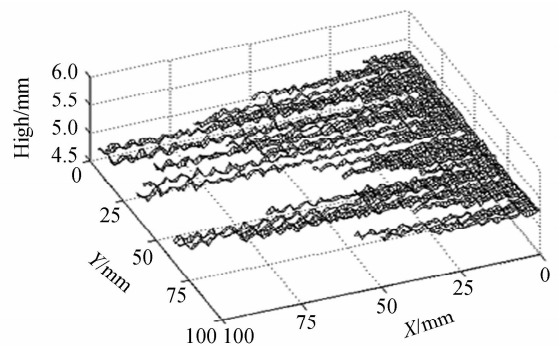


图 2 实验系统

Fig. 2 Experiment system

先对一距参考平面高度为 $h_0 = 5.2$ mm 的平面,分别用原始 Stoilov 算法、改进后的 Stoilov 算法进行了测量,图 3(a)为用原始 Stoilov 算法恢复出来的平面的三维面形,可以看出,传统的 Stoilov 算法在显示为白色的区域无法重构;能够重构的区域



(a) Height constructed by traditional Stoilov algorithm

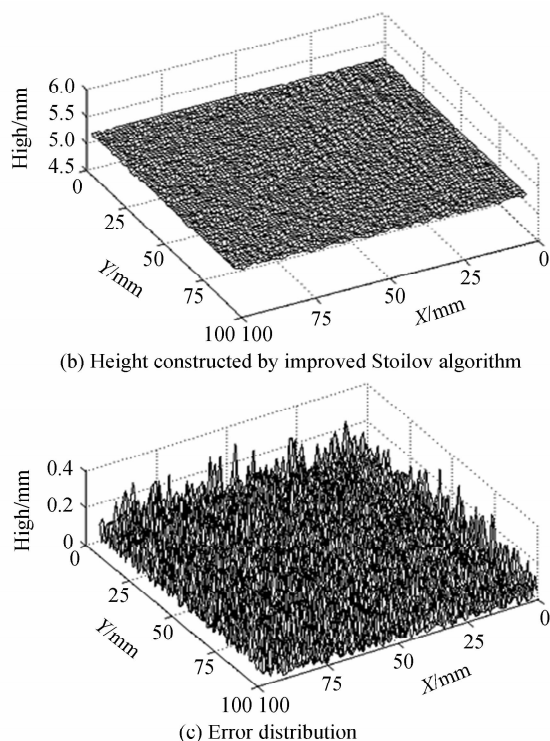


图3 重构平面

Fig. 3 Reconstructed plane

也出现了毛刺、沟壑,具有较低的测量准确度.图3(b)用改进后的 Stoilov 算法恢复出来的平面的三维面形,其三维轮廓清晰可见.图3(c)为测量误差分布图.

三维测量常用平均绝对误差 $\delta = \sum |h(i,j) - A| / n$ 、平均相对误差 $s = \frac{\sum [|h(i,j) - A| / A] \times 100\%}{n}$ 、

均方差 $\sigma = \sqrt{\sum (h(i,j) - A)^2 / n}$ 来评价测量准确度,其中 $h(i,j)$ 表示平面的测量高度, A 为平面的标准高度, n 为平面总像素点.为了评价所提改进算法的普适性,我们对高度 5.2~5.7 的平面进行了测量,结果如表 1.

表 1 不同高度平面的测量误差

Table 1 Measurement errors of different height planes

h/mm	5.2	5.3	5.4	5.5	5.6	5.7
δ/mm	0.070	0.049	0.065	0.059	0.041	0.054
$s/\%$	1.3	0.9	1.2	0.9	0.7	0.9
σ/mm	0.040	0.061	0.052	0.067	0.032	0.063

从表 1 可看出,平均绝对误差不超过 0.07,平均相对误差不超过 1.3%,平均均方差不超过 0.07,可见改进后的 Stoilov 算法不仅能有效获取被测物体三维信息,而且还具有很高的准确度.

为了验证改进算法的实用性,本文还对图 4(a)的高度约为 30 cm 的石膏头像进行了测量.图 4(b)为 CCD 采集的五帧变形条纹图之一,图 4(c)为用改进后的 Stoilov 算法恢复得到的石膏像的面部三

维轮廓,可见该算法有较好的重建效果.

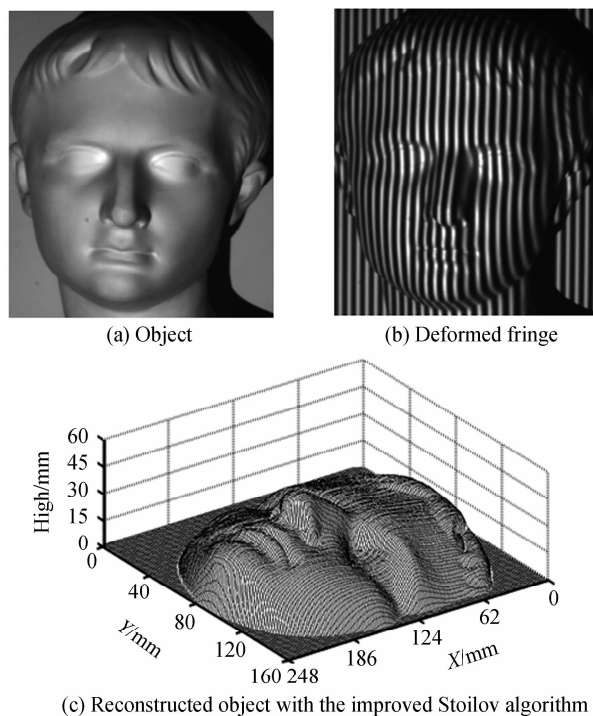


图 4 改进后的 Stoilov 算法用于实物测量

Fig. 4 Object inspected by improved Stoilov algorithm

4 结论

基于 Stoilov 算法的相位测量轮廓术,相比传统的相位测量轮廓术具有更大的灵活性.但与传统的相位测量轮廓术一样,需要获取精确的相移量,相移不准会给系统带来较大误差.由于受到环境光、系统数字化因素以及非线性效应的影响,传统的 Stoilov 算法中相移量的计算方法存在较大误差,降低了位相提取的准确度.本文采用主动控制相移量的 Stoilov 改进算法,避免了环境光、系统数字化误差和探测器的非线性对相移量计算带来的影响,提高了相位提取和系统测量的准确度.实验验证了该方法的可行性和有效性.

参考文献

- [1] LI Yong-huai, FENG Qi-bo. Overview of optical 3D profile measurement[J]. *Laser & Infrared*, 2005, **35**(3): 143-147.
李永怀, 冯其波. 光学三维轮廓测量技术进展[J]. *激光与红外*, 2005, **35**(3): 143-147.
- [2] 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): 1425-1428.
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): 1425-1428.
- [3] FENG Hua-jun, XU Zhi-hai, Li Qi, et al. 3D Spectrum imaging and computer reconstruction system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2000, **29**(2): 117-120.
冯华君, 徐之海, 李奇, 等. 光谱法计算机三维成像与再现系统[J]. *光子学报*, 2000, **29**(2): 117-120.

- [4] ZHANG Nan-yang-sheng, YANG Kun-tao. Three-dimensional measurement technology based on virtual grating of double frequency[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2006, **33**(10):1407-1411.
张南洋生, 杨坤涛. 双频虚拟光栅投影三维测量技术[J]. 中国激光 2006, **33**(10):1407-1411.
- [5] YU Rui-zhi, CAO Yi-ping. A three dimensional on-line inspecting method for workpiece by PMP[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(6):1139-1143.
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):1139-1143.
- [6] SONG Wan-zhong, SU Xian-yu, CAO Yi-ping, *et al.* A new method of three-dimensional coordinates calibration in phase measuring profilometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(3):273-277.
宋万忠, 苏显渝, 曹益平, 等. 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):273-277.
- [7] STIOLOV G, DRAGOSTINOV T. Phase stepping interferometry: five-frame algorithm with an arbitrary step[J]. *Opt & Lasers in Eng*, 1997, **28**(1):61-9.
- [8] QIAN Ke-mao, WU Xiao-ping. Theoretical analysis of Stoilov algorithm in phase shifting interferometry [J]. *Optical Technique*, 2001, **27**(1):13-16.
钱克矛, 伍小平. 相移技术中五步等步长 Stoilov 算法的性能分析[J]. 光学技术, 2001, **27**(1):13-16.
- [9] ZHOU Li-bing, SU Xian-yu, WANG Li-wu. Analysis of errors introduced by detector nonlinearity in phase measuring profilometry[J]. *Laster 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.
- [10] HUI Mei, WANG Dong-sheng, DENG Nian-mao, *et al.* The solution of best sampling manner in phase-shifting interferometry based on Matrix Condition Number[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(4):477-480.
惠梅, 王东生, 邓年茂, 等. 用矩阵条件数求解相移最佳采样方式[J]. 光子学报, 2003, **32**(4):477-480.
- [11] LI Yong, SU Xian-yu. New method for system calibration in phase measurement profilometry with large view field[J]. *Acta Optica Sinic*, 2006, **26**(8):1162-1163.
李勇, 苏显渝. 一种大视场相位轮廓术系统标定方法[J]. 光学学报, 2006, **26**(8):1162-1163.
- [12] ZHU Yong-jian, LI An-hu, PAN Wei-qing, *et al.* Fast phase-unwrapping algorithms used for structural-light measurement [J]. *Acta Photonica. Sinica*, 2009, **38**(1):184-188.
朱勇建, 李安虎, 潘卫清, 等. 结构光测量中快速相位解包裹算法的讨论[J]. 光子学报, 2009, **38**(1):184-188.

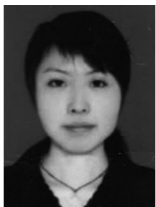
An Improved Method of Stoilov Algorithm Adapting to Phase Measuring Profilometry

WU Ying-chun, CAO Yi-ping, ZHONG Li-jun

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

Abstract: A new improved method based on active controlling of phase-shifting is proposed. Five frames of sinusoidal gratings with exactly the same known phase-shifting value are programmed actively. While the five gratings are projected to the measured object one by one, five frames of distorted fringes are captured by CCD camera synchronously. If the known phase-shifting value substitute for the phase-shifting value calculated from distorted fringes in Stoilov's algorithm, the accuracy of the 3D profile reconstruction may be improved obviously. The experiments show that the average absolute error is less than 0.07, and the mean square error is less than 0.07.

Key words: Information optics; Stoilov algorithm; PMP; Improved method; Phase unwrapping; 3D profile reconstruct



WU Ying-chun was born in 1984. Now she is pursuing her M. S. degree at Optoelectronics Department, Sichuan University. Her research interests focus on optical information processing and 3D information inspecting etc.



CAO Yi-ping was born in 1963. He is a professor of Sichuan University. He received his doctor degree at Optoelectronics Department, Sichuan University. Now he is a Doctoral tutor and his research focus on optical three-dimensional inspection, optical information processing and opto-mechatronics etc.