

文章编号: 1001-4322(2010)01-0079-04

基于改进 Stoilov 算法光学元件瑕疵检测*

方 关 明, 曹 益 平

(四川大学 电子信息学院, 成都 610064)

摘 要: 提出一种基于统计逼近的改进 Stoilov 算法, 可以除去光学元件检测中展开相位时遇到的奇异点和超大误差, 提高测量精度。通过重构瑕疵表面 3 维形貌, 并对规则几何形状光学元件表面进行拟合, 建立光学元件瑕疵检测理论模型, 可以有效对光学元件表面瑕疵进行检测。将该算法和模型运用到光学平晶瑕疵检测中, 测出光学平晶的微小划痕深度为 40 nm。

关键词: 光学元件; 瑕疵检测; Stoilov 算法; 相移干涉; 统计逼近

中图分类号: TN247 **文献标志码:** A **doi:**10.3788/HPLPB20102201.0079

光学元件在日常生产和生活中应用越来越广泛, 在实验中的各种镀膜镜片, 生活中的相机镜头, 在加工过程中都要对瑕疵进行严格的检测和控制。由于存在应力及各种加工缺陷, 作为光学元件基件的玻璃会出现各种各样的瑕疵, 对光学元件的质量产生极大的影响。在各种光学元件的使用中, 高功率激光的破坏会产生熔融与裂纹^[1], 运输中的碰撞和摩擦会产生划痕。在对光学元件检测中, 常用检测方法有: 激光透射法、刀口法、莫尔条纹法和全息法等^[2-5], 但这些方法的检测精度都不够高。为此, 本文提出采用相移干涉测量法来检测光学元件瑕疵。相移干涉测量法是一种高精度的自动化非接触式测量方法, 可分为定步长相移法和等步长相移法^[6-7]。定步长相移法需要知道每步的相移量, 通常需要扫描一个周期, 得到若干幅干涉图, 通过定步长相移算法, 计算出截断相位; 等步长相移法通常不需要知道每步相移量的具体值, 只要保证每步的相移步长相等, 就可以计算出截断相位。常用的等步长相移算法是 Carre 算法和 Stoilov 算法, 其中 Stoilov 算法在很多方面性能优越, 但是其表达式中有除法和开方运算, 由于存在随机噪声和散斑噪声等, 会使表达式中出现分母为零和复数的情况, 导致截断相位出错, 使相位展开失败^[8-9]。为此, 本文提出一种基于统计逼近的改进 Stoilov 算法, 并应用该算法检测了光学平晶划痕的深度。

1 基于相移干涉光学元件瑕疵检测原理

相移干涉检测实验原理光路图如图 1 所示。参考镜由压电陶瓷 PZT 驱动, 产生位移。此位移的频率与移动量由计算机控制。设参考镜的瞬时位移为 l_i , 被测表面形貌为 $w(x, y)$, 则参考光路波面表示为

$$U_r = a \exp[i2k(s + l_i)] \quad (1)$$

测试光路波面表示为

$$U_t = b \exp\{i2k[s + w(x, y)]\} \quad (2)$$

式中: a, b 为光振幅常数; s 为两干涉光路起始光程; k 为波数, $k = 2\pi/\lambda$ 。

参考光与测试光产生干涉条纹, 通过相移 n 步, 得到 n 幅干涉图, 当满足全周期相移时, 可以求得被测波面

$$w(x, y) = \frac{1}{2k} \tan^{-1} \frac{\frac{2}{n} \sum_{i=1}^n I(x, y, l_i) \sin(2kl_i)}{\frac{2}{n} \sum_{i=1}^n I(x, y, l_i) \cos(2kl_i)} \quad (3)$$

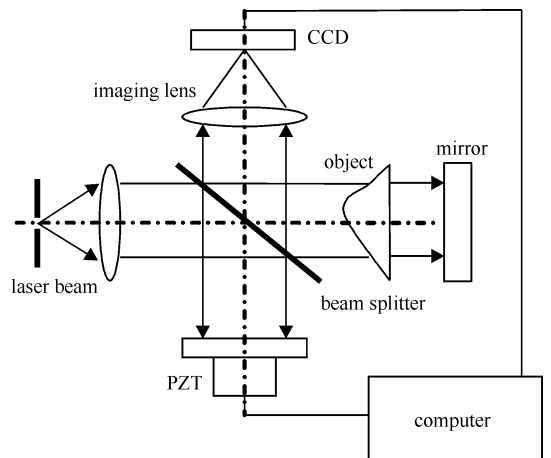


Fig. 1 Schematic diagram of phase shifting interferometry
图 1 相移干涉原理图

* 收稿日期: 2009-06-19; 修订日期: 2009-09-01
基金项目: 国家高技术发展计划项目; 四川省科技攻关项目(2006Z01-028); 四川省学术和技术带头人培养基金项目(07GRC-01)
作者简介: 方关明(1982—), 男, 湖北襄阳人, 硕士研究生, 主要从事 3 维光学信息处理研究; fgm1982@sohu.com。
通信作者: 曹益平, caoying@mail.sc.cninfo.net。

式中: $l_i = (\lambda/2n)i, i = 0, 1, 2, 3, \dots$

相移干涉技术可以实现 $\lambda/100$ 的精度,这是目前干涉仪精度最高的方法,但是由于采集 n 幅图像的时候要保证相移量为已知量,且总相移量为周期的整数倍,使测量精度受到一定限制。Stoilov 算法由于只要求每次相移量相等,而不要求精确控制每步相移量,在应用中有明显优势。

加上背景光后干涉光场的光强表达式为

$$I_i(x, y) = U(x, y) \{1 + r(x, y) \cos[\Phi(x, y) + \varphi_i]\} \quad (i = 1, 2, 3, 4, 5) \quad (4)$$

式中: $I_i(x, y)$ 表示第 i 幅干涉图光强分布; $U(x, y)$ 表示背景光强; $r(x, y)$ 表示干涉条纹对比度; $\Phi(x, y)$ 表示待求相位,在不引起误解情况下将省略坐标 (x, y) ; φ_i 为引入的相移量,依次为 $-2\phi, -\phi, 0, \phi, 2\phi$ 。可以从式(4)表征的 5 帧相移条纹中计算出相位函数,即

$$\Phi(x, y) = \tan^{-1} \left[\frac{2(I_2 - I_4)}{2I_3 - I_1 - I_5} \sin\phi \right] \quad (5)$$

其中

$$\sin\phi = \sqrt{1 - \left[\frac{I_1 - I_5}{2(I_2 - I_4)} \right]^2} \quad (6)$$

将式(6)代入式(5)中有

$$\Phi(x, y) = \tan^{-1} \left\{ \frac{2(I_2 - I_4)}{2I_3 - I_1 - I_5} \sqrt{1 - \left[\frac{I_1 - I_5}{2(I_2 - I_4)} \right]^2} \right\} \quad (7)$$

因为式(7)是反正切计算,使相位被截断在 $-\pi \rightarrow \pi$ 之间,所以相位是离散的。实际上物体表面的相位是连续分布的,故需要对截断相位进行展开,建立起相位与高度之间的映射关系,就可以重构物体高度分布 $h(x, y)$ 。如果物体表面有划痕,该表面就是包含划痕信息的 $h_1(x, y)$,因为光学元件一般是平面、球面、椭球面等标准几何面,我们可以根据测得的大量有效数据拟合出标准的光学元件表面 $h_0(x, y)$,那么我们要检测的划痕瑕疵就可以表示为两者之差

$$h_c(x, y) = h_1(x, y) - h_0(x, y) \quad (8)$$

2 Stoilov 算法改进

Stoilov 算法要求相移量是一个恒定不变的值,但是由于光源不稳定性及探测器非线性,存在随机噪声和散斑噪声的影响,如果我们直接根据式(6)进行计算,会出现分母为零和复数的情况,导致截断相位出错,相位展开失败,我们称这些点为奇异点。由于存在上述问题,出现了一些改进的方法,使 Stoilov 算法能够成功运用。如用有效数据平均值代替奇异点值,或用线性插值方法除去奇异点值,也可在相位测量轮廓术(PMP)中使用统计逼近的方法^[10]。由于相移干涉测量在光路和原理上不同,我们尝试在相移干涉测量中使用统计逼近的方法,其思想算法流程图如图 2 所示。

输入为 $I_1 \sim I_5$ 大小为 $M \times N$ 的干涉图像,输出为数组 A 的平均值,作为 $\sin\phi$ 的真值。在判断 $I_2[i, j] \approx I_4[i, j]$ 时采用统计逼近的方法。

数值模拟我们采用 $256 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$ 大小的 peaks 图形,每次相移 $\pi/3$ 。如果我们直接使用标准 Stoilov 算法,在 $(90 : 94, 26 : 256)$ 区间出现大量的非数值结果,由于大量奇异点存在,恢复出的物体如图 3(a)所示,基本上已经无法恢复出原来的 peaks 图形的形貌。图 3(b)所示的是使用统计逼近改进 Stoilov 算法恢复出的物体,可以看出效果较好,说明了基于统计逼近的改进 Stoilov 算法在相移干涉测量中能有效提高恢复

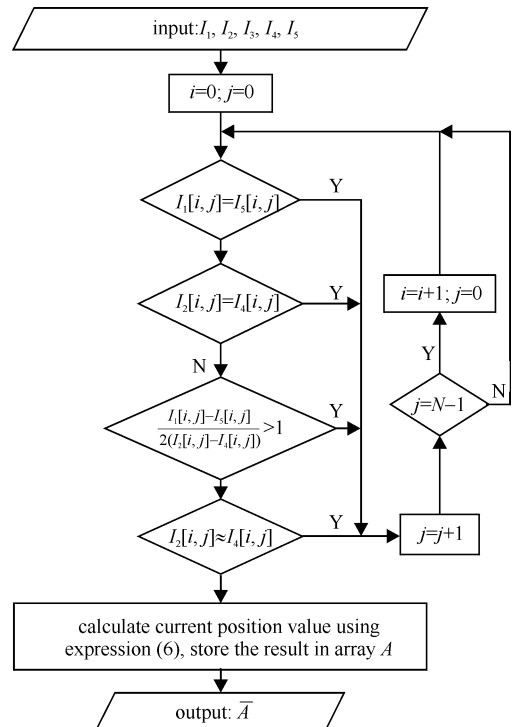


Fig. 2 Flow chart of improved Stoilov algorithm

图 2 Stoilov 改进算法流程图

物体 3 维形貌的精度。

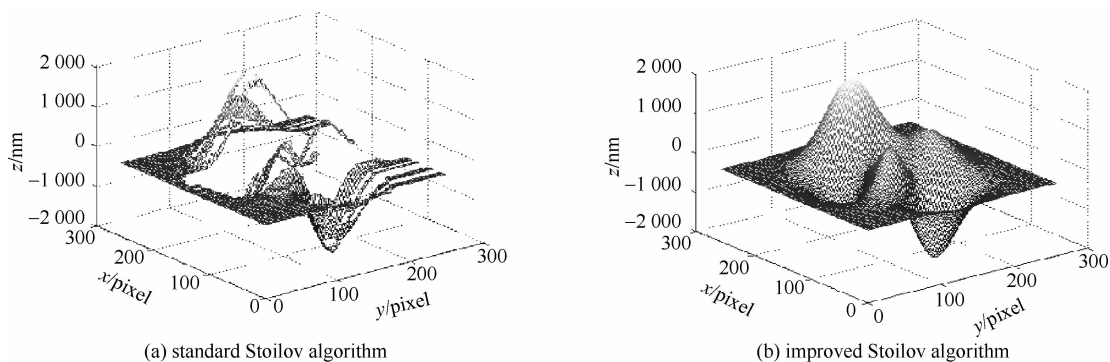


Fig. 3 Reconstructed objects using two Stoilov algorithms

图 3 Stoilov 算法恢复出的物体

3 实验与分析

实验采用 CSY-10L 激光多功能光电测试系统实验仪,其光路图如图 1 所示,激光采用 632.8 nm 氦氖激光,物体为带有划痕的光学平晶。电脑控制 PZT 做等距相移,同时把 CCD 采集到的图像传到电脑。

由于 PZT 在使用一段时间后,线性度会变差,保证每步相移是一个确定的值有困难。为了解决这个问题,采用改进 Stoilov 算法,首先对 PZT 进行标定,找出线性度最好的一段,然后相移 5 次,得到 5 幅干涉图。

图 4 是采集到的干涉条纹中的一幅。由于干涉条纹特征可以知道待测光学平晶有清晰的划痕。对采到的图片进行处理,如果采用标准 Stoilov 算法,得到恢复的物体如图 5(a)所示,已经完全看不出物体形貌。使用改进的 Stoilov 算法,可以得到恢复的结果如图 5(b)所示,恢复后是一个带有轻微划痕的曲面,也说明了光学平晶带有划痕瑕疵。为了检测光学平晶的划痕深度,我们采

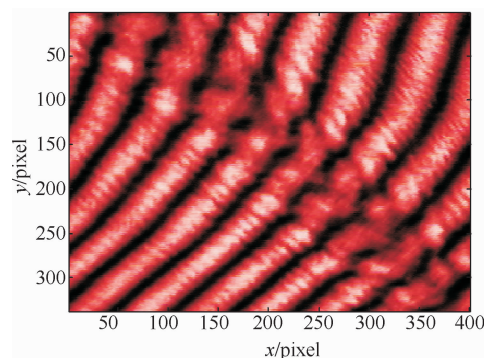


Fig. 4 Interference image

图 4 干涉图

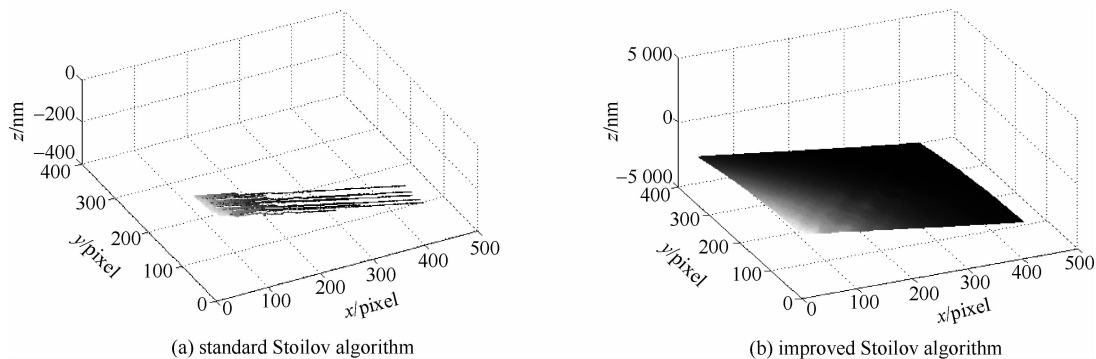


Fig. 5 Reconstructed optical flats using two Stoilov algorithms

图 5 用 Stoilov 算法恢复出的光学平晶划痕

用移动分块最小二乘法^[11]对曲面进行了拟合,然后用恢复出的曲面减去拟合出的曲面,得到光学平晶划痕如图 6 所示,从恢复出的图像数据我们可以得到刻痕的深度在 40 nm。根据统计逼近算出 $\sin\phi=0.833$,每步相移量为 56.4° 。

4 结论

精密光学元件在生产和使用中可能产生各种瑕疵,自身厚度不均,折射率变化,表面有轻微划痕等,原来的检测方法在一些对精度要求不高的领域仍可以成功运用,而且已经有成熟的

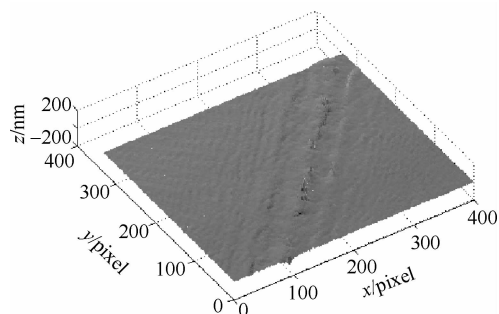


Fig. 6 Scratch on optical flat

图 6 光学平晶划痕

在线自动检测系统。采用基于统计逼近的改进 Stoilov 算法可以很好地恢复物体 3 维面型,利用曲面拟合瑕疵检测模型可以同时检测瑕疵的深度和宽度进行精密检测。特别是在多种瑕疵交织的检测中,可以除去主导瑕疵的影响,对更细微的瑕疵进行检测,在精密光学器件的生产和检测中将会成为一种非常有效的方法。为了提高精度,采用 5 步相移来恢复物体,导致实现过程相对复杂,实现在线自动检测系统将会是一个重要研究方向。

参考文献:

- [1] 袁晓东,李绪平,郑万国,等. 1.064 μm 脉冲激光作用下 SiO_2 薄膜纹波损伤的模拟[J]. 强激光与粒子束,2008,**20**(3):509-512. (Yuan Xiaodong, Li Xuping, Zheng Wanguo, et al. Ripple damage mechanism of SiO_2 film induced by 1.064 μm pulsed laser. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, **20**(3):509-512)
- [2] 余文勇,周祖德,陈幼平. 一种浮法玻璃全面缺陷在线检测系统[J]. 华中科技大学学报:自然科学版,2007,**35**(8):1-4. (Yu Wenyong, Zhou Zude, Chen Youping. Machine vision system for on-line defect detection of float glass. *J Huazhong University of Science and Technology: Nature Science Edition*, 2007, **35**(8):1-4)
- [3] 张艳,张蓉竹,董军,等. 微光学元件面形的数字刀口检测技术[J]. 强激光与粒子束,2004,**16**(2):137-140. (Zhang Yan, Zhang Rongzhu, Dong Jun, et al. Digital knife-edge testing technology on micro-optical surface characterization. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, **16**(2):137-140)
- [4] 喻宾扬,王召巴,金永. 基于莫尔条纹的玻璃缺陷检测技术研究[J]. 硅酸盐通报,2008,**27**(1):183-187. (Yu Binyang, Wang Zhaoba, Jin Yong. The research for glass-defect detecting based on Moiré fringes. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2008, **27**(1):183-187)
- [5] Müller J, Kebbel V, Jüptner W. Digital holography as a tool for testing high-aperture micro-optics[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2005, **43**:735-751.
- [6] 马小军,高党忠,叶成刚,等. 相移干涉法测量 ICF 微球内表面粗糙度[J]. 强激光与粒子束,2008,**20**(2):224-228. (Ma Xiaojun, Gao Dangzhong, Ye Chenggang, et al. Interior surface roughness of ICF micro-shells with phase shift interference technique. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, **20**(2):224-228)
- [7] 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. (Qian Kemao, Wu Xiaoping. Theoretical analysis of Stoilov algorithm in phase shifting interferometry. *Optical Technique*, 2001, **27**(1):13-16)
- [8] Stoilov G, Dragostinov T. Phase-stepping interferometry: five-frame algorithm with an arbitrary step[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 1997, **28**:61-69.
- [9] Ferraioli G, Shabou A, Tupin F, et al. Multichannel phase unwrapping with graph cuts[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2009, **6**(3):562-566.
- [10] 许幸芬,曹益平. 基于统计逼近的 Stoilov 改进算法[J]. 光学学报,2009,**29**(3):733-737. (Xu Xingfen, Cao Yiping. An improved Stoilov algorithm based on statistical approach. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(3):733-737)
- [11] 郭凤鸣,张水英. 分块最小二乘曲面拟合通用程序[J]. 电脑学习,1999,(1):40-41. (Guo Fengming, Zhang Shuiying. Universal programs for blocking least-square fitting curved faces. *Computer Study*, 1999, (1):40-41)

Optical element defect detection based on improved Stoilov algorithm

Fang Guanming, Cao Yiping

(School of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

Abstract: An improved Stoilov algorithm was proposed based on statistical approach, which can remove singularities and large errors to improve measure precision. The optical element defect detection model was constructed by fitting the surface of optical element as well as reconstructing the surface of defect element. The defect on an optical flat was detected with this method and model. The measured depth of scratch is 40 nm.

Key words: optical element; defect detection; Stoilov algorithm; phase shifting interferometry; statistical approach