

文章编号: 0258-7025(2010)05-1338-04

基于相位偏折术的非球面镜检测方法

赵文川 苏显渝 刘元坤 张启灿

(四川大学光电科学技术系, 四川 成都 610064)

摘要 提出一种基于相位偏折术(PMD)的非球面镜检测方法。在条纹屏上显示标准正弦环形条纹,经过被测镜反射后为相机所接收。通过对两次不同位置的条纹平面进行测量,利用相移技术及相位展开技术得到两次位置处的相位分布,从而得到像素点对应的原始光线和偏折光线的位置和方向,确定光线的偏折位置和角度,计算出被测面形的梯度分布,通过数值积分重建被测面形。该方法具有结构简单、成本低、易于实行和动态测量范围较大的特点,可用于加工过程中波前变化范围较大的非球面反射镜精磨和初抛光阶段的检验。数字模拟和实验验证了这一技术的可行性。

关键词 光学测量;非球面镜;相位偏折术;条纹分析

中图分类号 O436;TN247

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL20103705.1338

Testing an Aspheric Mirror Based on Phase Measuring Deflectometry

Zhao Wenchuan Su Xianyu Liu Yuankun Zhang Qican

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

Abstract A method based on basic phase measuring deflectometry (PMD) is proposed for testing the aspherical mirror, which uses two reference screens in different distances from the tested mirror. The intensity-modulated patterns are generated on the screens and the images reflected via the tested mirror are recorded by a camera. The original ray of every pixel and its corresponding deflected ray can be constructed using the recorded patterns and phase-shifting technique. Their intersection points and the surface normal are obtained. Then the mirror surface is reconstructed by numerical integration. The procedure for this method is presented, and the computer simulation and experimental results are shown.

Key words optical measurement; aspheric mirror; phase measuring deflectometry; fringe analysis

1 引 言

非球面镜能够减少系统中光学元件的数量和提高成像质量。随着光学技术的发展,非球面镜越来越广泛地应用于各种光学系统中,相应的检验方法和仪器已成为当前研究的热点^[1~4]。目前通常采用干涉计量技术,而多数干涉仪要求相干照明以及精确设计的光学系统,其测量动态范围也很小,需要制造辅助元件。三维坐标测量仪可以用来进行检测,但是它用测头对被测面进行接触式测量,既费事又费时。

近年来,提出了一种相位偏折术(PMD)实现了对光学反射表面和透明物体波前的测量。在显示器上显示标准正弦条纹图,经过被测光学元件后条纹会发生变形。CCD相机拍摄下变形图样,得到相位分布,计算出被测量的梯度分布。由于该方法丢失了高度信息,需要两个相机和复杂的标定过程来进行重建被测光学元件表面或波前^[5~11]。本文在相位测量偏折术的基础上,提出了一种非球面镜检测方法。通过对两次不同位置的条纹平面进行测量,由相位分布确定光线的偏折位置和角度,从而计算

收稿日期:2009-07-02;收到修改稿日期:2009-07-26

基金项目:国家自然科学基金(60838002)和中国科学院光电技术研究所基金资助课题。

作者简介:赵文川(1983—),男,博士研究生,主要从事光学检测和信息光学等方面的研究。

E-mail: zhaowc168-98@163.com

导师简介:苏显渝(1944—),男,教授,博士生导师,主要从事信息光学和光学三维传感技术等方面的研究。

E-mail: xianyusu@mail.sc.cninfo.net(通信联系人)

出被测面形的高度信息。实验表明了这一技术的可行性。

2 基本原理

测量系统结构如图 1 所示, CCD 相机的中心置于被测镜的光轴上。显示屏固定在数字平移台上, 其平面垂直于光轴, 显示正弦环形条纹图, 经过被测镜和半透半反镜后为 CCD 所接收。测量原理如图 2 所示, 相机为针孔模型, P 为投影中心, 与被测镜中心点 O 的距离为 z_0 。屏 1 上 B 点和屏 2 上 C 点发出的光线经被测镜反射后发生偏折, 被 CCD 上同一个像素点 A 所探测。由像素点 A 和投影中心点 P 可以确定原始光线 PA 的方向; 偏折光线 BC 的方向可以由 B 和 C 两点的位置确定。这样从原始光线和偏折光线就可以计算出被测面形。

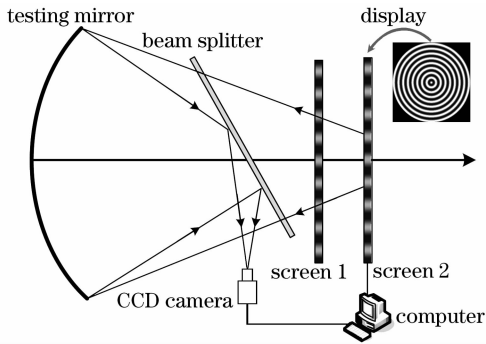


图 1 实验装置图

Fig. 1 Schematic of the experimental setup

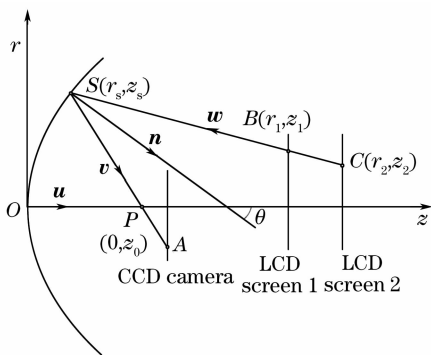


图 2 实验测量原理图

Fig. 2 Schematic of the measurement principle

条纹屏上显示正弦环形条纹图可表示为

$$I = a + b \cos(\varphi + \alpha), \quad (1)$$

式中 $\varphi = 2\pi r/p$ 为相位分布, a 和 b 都为正常数, 通常 $a = b$, p 为条纹周期, α 为附加相位调制。先将条纹屏放于位置 z_1 , 相机记录下条纹图。通过 N 帧相移方法以及相应的相位展开技术可计算出相位分布 φ_1 ^[12~15]。 $B(r_1, z_1)$ 点的位置计算为

$$r_1 = [\varphi_1 / (2\pi)] \cdot p. \quad (2)$$

将屏移动到位置 z_2 , 重复以上工作, 确定 $C(r_2, z_2)$ 点的位置, 这样, 就可以得到原始光线 PA 和偏折光线 CB 和交点 $S(r_s, z_s)$ 。在理想情况下, 点 S 就反应了被测面形, 但实际应用中, 该点对噪声非常敏感。尤其是当点 S 靠近光轴时, 即使是很小的噪声也会导致 z_s 的值与被测面形的真实值相差很大而不能正确恢复被测面形。由于 PMD 方法可以得到被测面的梯度分布, 并且具有很高的精度和很好的抗噪声能力^[5~9], 因此, 利用 PMD 得到的梯度分布, 通过积分重建被测面形, 就可以很好地抑制噪声的影响, 提高检测精度。如图 2 所示, 根据反射定律, 被测面的法线分布可以表示为

$$\mathbf{n} = \frac{\mathbf{v} - \mathbf{w}}{\|\mathbf{w} - \mathbf{v}\|}, \quad (3)$$

式中单位矢量 \mathbf{v} 代表了原始光线 PA 的方向, 单位矢量 \mathbf{w} 代表了偏折光线 CB 的方向, \mathbf{n} 代表了点 S 处被测面形的法线方向。被测面的梯度分布可以表示为

$$\left. \frac{\partial z}{\partial r} \right|_{r=r_s} = \tan \theta = \frac{|\mathbf{n} \times \mathbf{u}|}{\mathbf{n} \cdot \mathbf{u}}, \quad (4)$$

式中 θ 为点 S 处被测面形的法线方向与光轴的夹角, 单位矢量 \mathbf{u} 代表了光轴方向。由 (4) 式可以由积分的方法解出被测镜的高度信息, 本文中采用梯形积分方法。如果相机不能近似为针孔相机, 原始光线 PA 可以通过相机标定来确定。

3 计算机模拟及实验结果

在测量过程中, 条纹的强度噪声会对测量精度有一定的影响, 可用计算机仿真分析。假设被测镜是一个抛物面镜, 焦距为 500 mm, 口径为 300 mm, 如图 3 所示。投影中心 P 与被测镜中心点 O 的距离为 $z_0 = 600$ mm, 条纹屏分别置于 $z_1 = 650$ mm 和 $z_2 = 690$ mm 处。在条纹图中加入 3% 的随机噪声

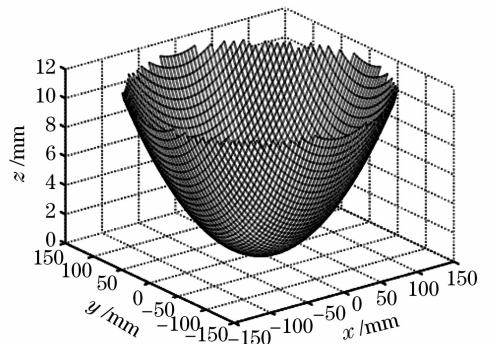


图 3 模拟的非球面面形

Fig. 3 Simulated parabolic surface

时,图 4 为用求入射光线和偏折光线交点(S 点)的方法来重建面形的误差分布图。可以看出,受噪声影响,测量结果误差很大,尤其是在靠近光轴的区域严重偏离了真实值。图 5 表示用本文的方法得到梯度后积分重建面形的误差率分布。可以看出,加入 3% 的随机噪声后误差低于 1.5×10^{-3} mm,该方法具有较好的抗噪性。

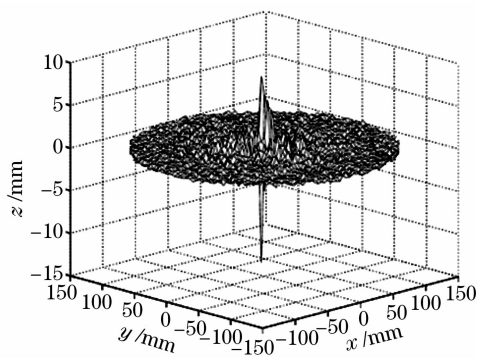


图 4 以 S 点来重建面形的误差分布

Fig. 4 Error percentage using the intersection points S

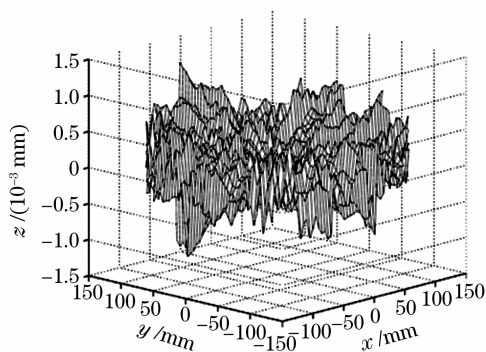


图 5 本文方法重建面形的误差分布

Fig. 5 Error percentage using the presented method

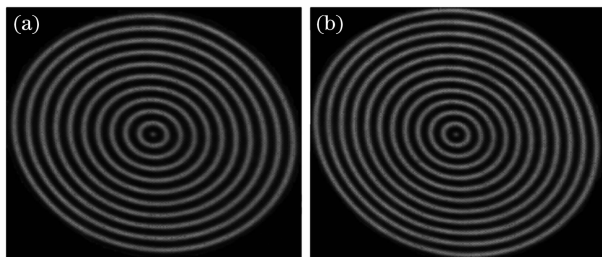


图 6 变形条纹图。(a) 条纹屏 1; (b) 条纹屏 2

Fig. 6 Fringe pattern obtained

(a) screen 1; (b) screen 2

实验中,选用液晶显示器作为条纹屏,显示周期 $p=2.1120$ mm 的正弦环形条纹,采用四步相移法求解相位分布。投影中心 P 与被测镜中心点 O 的距离为 $z_0 = 585$ mm。首先将显示屏置于 $z_1 = 645$ mm 处,图 6(a) 为相机记录的变形条纹图。再

将显示屏移至 $z_2 = 855$ mm 处,相机记录的变形条纹图如图 6(b) 所示。图 7 为重建得到的被测镜面形分布,图 8 为用三维坐标测量仪测量的结果。两者在 x 和 y 两垂直方向上中心行的比较如图 9 所示。两种方法的测量结果吻合得很好,验证了本方法的可行性。

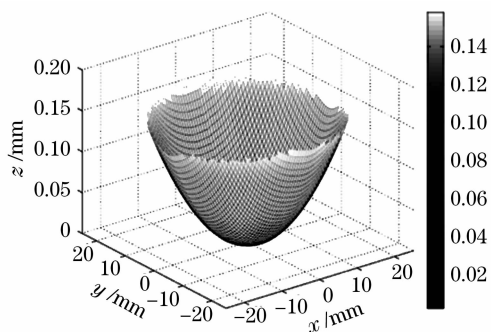


图 7 本文方法重建的面形分布

Fig. 7 Reconstructed surface using the presented method

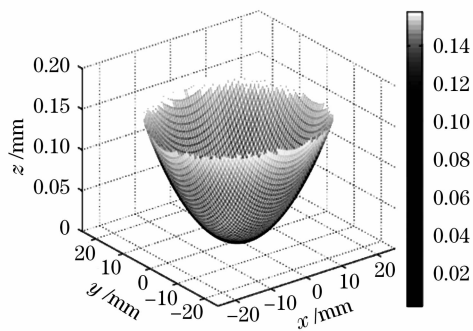


图 8 三维坐标测量仪测量结果

Fig. 8 Measurement results using the three-dimensional coordinate machine

4 结 论

在相位测量偏折术基础上,提出了一种非球面镜检测方法。采用液晶显示器作为条纹屏,条纹图样周期和方向可以根据需要实时设置和实现精确的相移,提高了测量的灵活性。该方法比干涉计量具有更大的测量范围,与三维坐标测量仪相比,可以一次完成非接触全场测量,结构简单,更方便、快捷和省时,具有成本低、灵活性高的特点。从实验数据的比较来看,精度相对低,通过相机标定、系统标定校准和采用更高精度的器件减小系统测量误差来提高精度,可用于加工过程中波前变化范围较大的非球面反射镜精磨和初抛光阶段的检验。在测量过程中,系统误差的来源主要有条纹屏的平面性、相机的噪声和计算积分时误差扩散等影响因素。其中相机的噪声影响通过选用更高灵敏度的相机来进行改

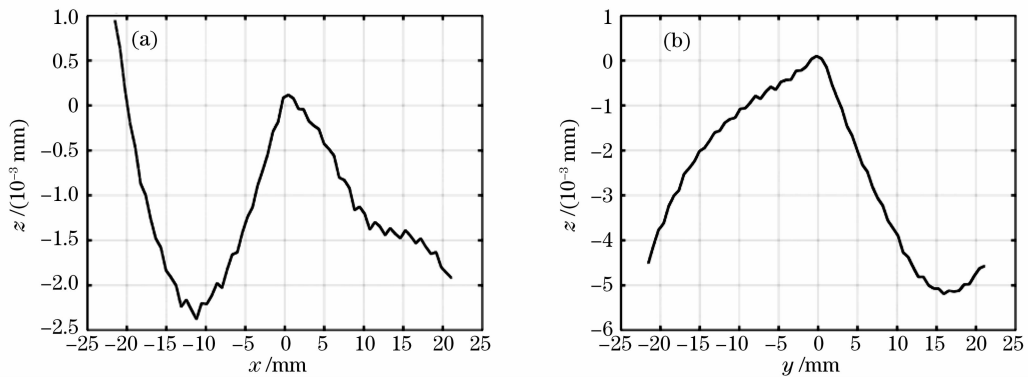


图9 两种方法测量结果在两垂直方向上中心行的比较。(a) x 方向;(b) y 方向

Fig. 9 Differences along the central cross section between

the two measurement values. (a) on the x axis; (b) on the y axis

善,采用改进的积分方法来抑制噪声扩散的影响,条纹屏的平面性其他的系统误差可以通过系统标定来校准。实验中将相机近似为针孔相机引入了一定的误差,实际测量中可以通过相机标定来消除该影响。本实验要求被测面为镜面反射,条纹图经被测面反射后能为相机所记录,采用相移方法以及相应的相位展开技术来计算出相位分布。本方法具有较大的动态测量范围,如果被测量的反射镜具有较大的口径或者较大的曲率变化,可以选用稍大一些的条纹屏来进行测量;另外,调整相机的位置,被测反射镜的成像视场会发生变化,可以完成大口径或大曲率变化反射镜的测量。

参 考 文 献

- Jin Guofan, Li Jingzhen. Laser Metrology [M]. Beijing: Science Press, 1998. 337
金国藩,李景镇. 激光测量学[M]. 北京: 科学出版社, 1998. 337
- D. T. Luraev. Optical Aspheric Testing [M]. Yang Li Transl. Beijing: Science Press, 1982. 9~19
普里亚耶夫. 光学非球面检测[M]. 杨力译. 北京: 科学出版社, 1982. 9~19
- Jun Ma, Zhishan Gao, Rihong Zhu *et al.*. Problems on fabrication of computer-generated holograms for testing aspheric surfaces [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, **7**(1):70~73
- Xie Yi, Chen Qiang, Wu Fan *et al.*. Concave aspherical surface testing with twin computer-generated holograms [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(7):1313~1317
谢意,陈强,伍凡等. 用双计算全息图检测凹非球面[J]. 光学学报, 2008, **28**(7):1313~1317
- M. C. Knauer, J. Kaminski, G. Hausler. Phase measuring deflectometry: a new approach to measure specular freeform surfaces [C]. *SPIE*, 2004, **5457**:366~376

- Marcus Petz, Rainer Tutsch. Measurement of optically effective surfaces by imaging of gratings [C]. *SPIE*, 2003, **5144**:288~294
- Liu Yuankun, Su Xianyu, Wu Qingyang. Wavefront measurement for transparent object by active deflectometry [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(4):515~518
刘元坤,苏显渝,吴庆阳. 基于主动条纹偏折术的透明相位物体波前测量方法[J]. 中国激光, 2007, **34**(4):515~518
- H. Canabal, J. Alonso. Automatic wavefront measurement technique using a computer display and a charge coupled device camera [J]. *Opt. Eng.*, 2002, **41**(4):822~826
- W. S. Li, T. Bothe, C. von Kopylow *et al.*. Evaluation methods for gradient measurements techniques [C]. *SPIE*, 2004, **5457**:300~311
- Liu Yuankun, Su Xianyu, Jiang Meihua. Wavefront measurement for transparent object on incoherent imaging [J]. *Laser Journal*, 2004, **25**(1):29~31
刘元坤,苏显渝,姜美花. 基于非相干成像的透明物体波前测量方法[J]. 激光杂志, 2004, **25**(1):29~31
- Xu Gang, Zhang Wenming, Lou Fengwei *et al.*. A new 3D reconstruction method based on gray similarity of the projecting grid points [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(11):2175~2180
徐刚,张文明,楼凤伟等. 基于网格点投影灰度相似性的三维重建新方法[J]. 光学学报, 2008, **28**(11):2175~2180
- X. Y. Su, G. von Bally, D. Vukicevic. Phase-stepping grating profilometry: utilization of intensity modulation analysis in complex objects evaluation [J]. *Opt. Commun.*, 1993, **98**(6):141~150
- Xianyu Su, Wenjing Chen. Reliability-guided phase unwrapping algorithm: a review [J]. *Opt. Laser Eng.*, 2004, **42**(3):245~261
- Li Wansong, Su Likun, Su Xianyu. Phase-measuring profilometry in big scale measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(6):792~796
李万松,苏礼坤,苏显渝. 相位检测面形术在大尺度三维面形测量中的应用[J]. 光学学报, 2000, **20**(6):792~796
- Su Xianyu, Li Jitao. Information Optics [M]. Beijing: Science Press, 1999
苏显渝,李继陶. 信息光学[M]. 北京: 科学出版社, 1999