

文章编号:1002-2082(2018)02-0220-05

基于全场干涉测量方法的透镜三维轮廓测量

刘嘉健¹,董博¹,吕梓亮¹,张伟²,吴卫增²,周延周¹

(1. 广东工业大学 自动化学院,广东 广州 510006; 2. 广州中智融通金融科技有限公司,广东 广州 510663)

摘要:为了满足高精度透镜加工工艺的要求,设计了一套基于全场干涉测量方法的透镜三维轮廓测量系统。已标定的透镜三维轮廓测量系统利用分布式反馈激光二极管对透镜进行波数扫描,对 CCD 相机采集到的干涉图像依次进行随机采样傅里叶变换和解卷运算,最终通过计算出透镜的三维轮廓数据。实验结果表明:该系统横向和纵向的分辨率均为 0.011 3 mm/pixels,深度方向的测量均方根误差为 ±19.8 nm。系统结构简单、稳定性高,对透镜没有任何接触,不会对透镜表面造成损伤,适用于透镜的高精度轮廓测量。

关键词:光学计量与检测;透镜三维轮廓;激光波数扫描;全场干涉测量

中图分类号:TN247

文献标志码:A

DOI:10.5768/JAO201839.0203002

Three-dimensional profile measurement for lens by full-field interferometry

Liu Jiajian¹, Dong Bo¹, Lyu Ziliang¹, Zhang Wei², Wu Weizeng², Zhou Yanzhou¹

(1. Faculty of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China;

2. Guangzhou Zhongzhi Rongtong Financial Technology Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

Abstract: A method for measuring the three-dimensional (3D) profile of lens by full-field interferometry was proposed to meet the requirement of high accuracy processing technology. A distribution feedback (DFB) diode laser of calibrated 3D profile measurement system was used to perform the wavenumber-scanning interferometric measurement for the lens. The interference image random sampling Fourier transform (RSFT) and unwrapping algorithm were used to process interference image acquired by CCD, and finally the 3D lens profile was obtained after had been calculated. Experimental results indicate that the horizontal and vertical resolution of the system are both 0.011 3 mm / pixels, and the root mean square error of measurement in the depth direction is ±19.8 nm. The system is characterized by simple structure, high stability, no contact with the lens, no damage to the lens surface, and high-precision contour measurement suitable for the lens.

Key words: optical measurement and testing; three-dimensional profile of lens; laser wavenumber scanning; full-field interferometry

引言

随着航天遥感技术以及全谱段高光谱探测技术等研究的发展,各类光学元件的应用越来越多,加工精度要求越来越高。而透镜作为光学系统里面最基

本的光学元件,其轮廓信息直接影响到透镜光学性能,一旦透镜光学性能没有达标,会对整个光学系统的各项性能产生极大负面影响,因此轮廓检测技术成为透镜加工工艺中不可或缺的环节。

收稿日期:2017-09-22; 修回日期:2017-11-22

基金项目:广州市科技计划项目资助(201604016135)

作者简介:刘嘉健(1991—),男,广东广州人,硕士研究生,主要从事 3D 机器视觉及功能成像方面的研究。

E-mail:373562633@qq.com

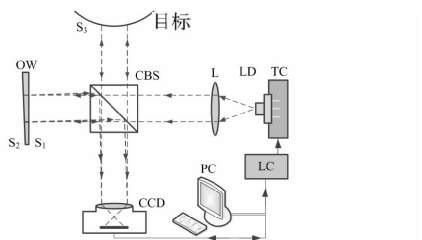
目前,透镜轮廓的测量方法有飞行时间法^[1]、结构光技术^[2]、相位法^[3]等。其中飞行时间法分辨率仅能达到毫米级,而且飞行时间法是通过点扫描测量三维信息,因此需要在二维平面上花费大量时间进行逐点扫描,才能得到三维轮廓信息。对于结构光技术和相位法,这2种测量方法不同于飞行时间法的逐点扫描的测量方式,无需机械扫描装置能直接对透镜的三维轮廓进行全场测量。由于这2种轮廓测量法需要投影器件实现面结构光以及干涉条纹的投影,但作为核心器件的投影器件的分辨率比较低,因此不容易实现透镜轮廓的高精度测量。

波数扫描干涉(wavenumber scanning interferometry, WSI)是最近发展起来的新型全场干涉测量方法^[4-8]。该方法是通过在半导体激光器波数扫描时,使用 CCD 相机拍摄透镜以及光楔的反射光干涉图像,利用傅里叶变换和相位解卷绕技术对干涉图像处理,最终获得透镜的高精度三维轮廓,其测量分辨率理论值可以达到 $\lambda/1\ 000$ ^[9]。而且基于波数扫描干涉的轮廓测量系统具有结构简单,稳定性高等特点,特别适用于透镜的高精度轮廓测量。

1 轮廓测量系统与方法

1.1 轮廓测量系统的构成

轮廓测量系统光学部分采用的是基于迈克逊干涉仪的系统,原理图如图 1 所示。系统组成包括光楔(OW)、分光棱镜(CBS)、平凸透镜(L)、分布式反馈激光二极管(LD)、CCD 相机以及被测物体组成。其中,当激光控制器(LC)输出控制信号使温度控制器(TC)调节激光二极管的工作温度,使得激光二极管内部材料的折射率产生变化,同时谐振腔长度随着折射率的改变而改变,最终使得激光二极管的输出波数跟随着工作温度变化而变化。



OW: 光楔; CBS: 分光棱镜; L: 凸透镜; LD: 分布式反馈激光二极管; TC: 温度控制器; LC: 激光控制器; CCD: CCD相机; PC: 电脑

图 1 测量系统原理

Fig. 1 Schematics of measurement system

轮廓测量系统的工作原理是:由激光二极管所发出的激光经过平凸透镜准直以及分光棱镜分

光后,激光被分为两束,分别射向光楔和被测物体。射向光楔的激光,在经过光楔的前后表面 S_1 、 S_2 透射反射后形成两束激光返回分光棱镜;而射向被测物体的激光,在经过被测物体前表面 S_3 的反射后返回分光棱镜。3束激光在分光棱镜处叠加形成干涉并在 CCD 相机上成像。激光控制器控制激光二极管输出不同波数的激光进行波数扫描,与此同时 CCD 相机采集波数扫描的 M 张干涉图像,然后将干涉图像数据通过数据线传输至计算机。计算机对这 M 张干涉图每一个像素点的位置沿时间轴方向提取干涉光强序列,并对各个干涉光强序列进行数据处理。

1.2 轮廓测量原理

线性调制激光进行波数扫描,随时间变化的输出波数可以表示为

$$k(m_s) = k_0 + \frac{\Delta k}{M_s} \cdot (m_s - 1), m_s = 1, 2, \dots, M_s \quad (1)$$

式中: $k_0 = 7.308 \times 10^6 \text{ m}^{-1}$ 为激光起始的输出波数值; $\Delta k = 4.104 \times 10^3 \text{ m}^{-1}$ 为激光波数扫描的范围; M_s 为 CCD 相机拍摄到的干涉图像总数。由于波数扫描是通过激光二极管的工作温度变化来达到,而温度控制一般具有较强的非线性,因此激光波数扫描也会随之产生较强的非线性。为了解决这个问题,我们引入了随机采样傅里叶变换^[4]来进行数据处理。

根据参考文献[10],光楔的前后表面 S_1 、 S_2 以及被测物体前表面 S_3 3个表面的反射光叠加后的干涉光光强可以表示为

$$\begin{aligned} I(x, y, k) = & I_1 + \sqrt{I_1(x, y) \cdot I_2(x, y)} \cdot \\ & \cos(2 \cdot k(m_s) \cdot \Delta_{12}(x, y)) + \\ & I_2 + \sqrt{I_1(x, y) \cdot I_3(x, y)} \cdot \\ & \cos(2 \cdot k(m_s) \cdot \Delta_{13}(x, y)) + \\ & I_3 + \sqrt{I_2(x, y) \cdot I_3(x, y)} \cdot \\ & \cos(2 \cdot k(m_s) \cdot \Delta_{23}(x, y)) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta_{12}(x, y) = & n_{12} \cdot z_{12}(x, y) \\ \Delta_{13}(x, y) = & n_{13} \cdot z_{13}(x, y) \\ \Delta_{23}(x, y) = & n_{23} \cdot z_{23}(x, y) \end{aligned} \quad (2)$$

式中: I_1 、 I_2 和 I_3 分别为光楔的前后表面 S_1 、 S_2 以及被测物体前表面 S_3 3个表面反射光光强; Δ_{12} 、 Δ_{13} 和 Δ_{23} 分别为表面 S_1 到表面 S_2 、表面 S_1 到表面 S_3 以及表面 S_2 到表面 S_3 的光程差; n_{12} 、 n_{13} 和 n_{23}

分别为表面 S_1 到表面 S_2 、表面 S_1 到表面 S_3 以及表面 S_2 到表面 S_3 的平均折射率。由于表面 S_1 和表面 S_2 是光楔的前后光滑表面,因此 Λ_{12} 可以表示为

$$\Lambda_{12}(x,y) = \Lambda_{120} + \Delta\Lambda_{12x} \cdot x + \Delta\Lambda_{12y} \cdot y \quad (3)$$

式中: Λ_{120} 为 $x=0$ mm, $y=0$ mm 位置的光程差; $\Delta\Lambda_{12x}$ 和 $\Delta\Lambda_{12y}$ 分别是沿 x 和 y 方向光程差的变化率。

将(3)式的结果代入到(2)式中,然后对(2)式进行二维傅里叶变换,可以得到:

$$\begin{aligned} \hat{I}(u,v) &= (I_1 + I_2) \cdot \delta(u,v) + \sqrt{I_1 \cdot I_2} \cdot \\ &\quad \{ \delta[u + \Omega_{12u}(m_s), v + \Omega_{12v}(m_s)] \cdot \\ &\quad \exp[-j \cdot \phi_{12}(m_s)] + \delta[u - \\ &\quad \Omega_{12u}(m_s), v - \Omega_{12v}(m_s)] \cdot \\ &\quad \exp[j \cdot \phi_{12}(m_s)] \} + \\ &\quad F^{2D} \left\{ \sum_{a=1}^2 \sqrt{I_a \cdot I_3} \cdot \right. \\ &\quad \left. \cos[2 \cdot k(m_s) \cdot \Lambda_{a3}(x,y)] \right\} \\ \Omega_{12u}(m_s) &= \frac{\Delta\Lambda_{12x}}{\pi} \cdot k(m_s) \\ \Omega_{12v}(m_s) &= \frac{\Delta\Lambda_{12y}}{\pi} \cdot k(m_s) \\ \phi_{12}(m_s) &= 2\Lambda_{120} \cdot k(m_s) \end{aligned} \quad (4)$$

式中: u 和 v 分别为 x 和 y 方向上空间频率的二维坐标; $\delta(u,v)$ 为二维单位脉冲函数; Ω_{12u} 和 Ω_{12v} 为 Λ_{12} 的空间频率; ϕ_{12} 为 Λ_{12} 峰值处的空间相位; F^{2D} 为二维傅里叶变换函数。

通过计算机对相机采集到的每一张干涉图做二维傅里叶变换,找到光楔前表面 S_1 以及后表面 S_2 干涉峰值的位置,然后提取干涉峰值的空间相位 ϕ_{12} ,把空间相位 ϕ_{12} 代入(4)式,我们可以求得激光二极管的输出波数:

$$k(m_s) = \frac{\phi_{12}(m_s)}{2 \cdot \Lambda_{120}} \quad (5)$$

由于激光器波数扫描存在非线性,在求得波数 k 之后,对(2)式使用随机采样傅里叶变换,可以得到:

$$\begin{aligned} \hat{I}(x,y,f) &= \sum_{m_s=1}^{M_s} I[x,y,k(m_s)] \cdot w[k(m_s)] \cdot \\ &\quad \exp[-j \cdot 2\pi f \cdot k(m_s)] \end{aligned} \quad (6)$$

式中 $w[\]$ 是窗函数。经过随机采样傅里叶变换后,幅频有 3 个峰值,分别对应 Λ_{12} , Λ_{13} 和 Λ_{23} ; 峰值所对应的相位为 ϕ_{12} , ϕ_{13} 和 ϕ_{23} 的卷绕相位,将卷绕

相位解卷绕后可以得到以下等式:

$$\begin{aligned} \phi_{12}^{unw}(x,y) &= 2 \cdot k_0 \cdot \Lambda_{12} \\ \phi_{13}^{unw}(x,y) &= 2 \cdot k_0 \cdot \Lambda_{13} \\ \phi_{23}^{unw}(x,y) &= 2 \cdot k_0 \cdot \Lambda_{23} \end{aligned} \quad (7)$$

式中 ϕ_{12}^{unw} , ϕ_{13}^{unw} 和 ϕ_{23}^{unw} 分别是卷绕相位 ϕ_{12} , ϕ_{13} 和 ϕ_{23} 解卷绕后的结果。

选取光楔的前表面 S_1 作为参考面,这是由于光楔前表面 S_1 与被测物体前表面 S_3 之间的介质为空气,折射率可以认为是 1。被测物体前表面 S_3 的轮廓 z_{13} 可以表示为

$$z_{13}(x,y) = \phi_{13}^{unw}(x,y) / (2 \cdot k_0) \quad (8)$$

2 实验与结果

轮廓测量系统配置如下:分布式反馈激光二极管采用的是 TOPTICA 公司的 LD-0780-0080-DFB-2;激光控制器则是采用 ILX Lightwave 公司生产的 LDC-3724C,其无模跳的波长调制范围可达 1.5 nm;光楔材料为 K9 玻璃,表面平整度小于 $\lambda/20$,其中 λ 是激光的波长,在 $x=0, y=0$ 处厚度为 6.003 mm,倾角为 $6'$,用于监测激光波数和作为干涉参考面;CCD 相机采用的德国 AVT 公司生产的 Manta G-235B 工业相机,其空间分辨率为 $1\ 936 \times 1\ 316$ pixel,最大帧率为 50.7 f/s。为了准确测量被测物体的轮廓,需要在轮廓测量之前用标定棋盘对测量系统进行标定,标定棋盘每个格子的尺寸皆为 $1\ \text{mm} \times 1\ \text{mm}$,精度为 $\pm 1.0\ \mu\text{m}$,如图 2 所示。标定棋盘图像再经过用 Tsai 两步法^[11]标定后,得到测量系统横向以及纵向的分辨率均为 $0.011\ 3\ \text{mm/pixels}$ 。

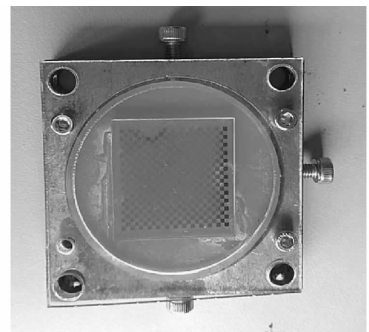


图 2 标定所用的棋盘格照片

Fig. 2 Photo of checkerboard used in calibration

实验中被测物体为平凸透镜(GCL-010120),其材料为 K9 玻璃,焦距为 250 mm,曲率半径为 209.199 mm,如图 3 所示。轮廓测量实验步骤如

下:1) 将被测物体平凸透镜放到平移台上,并且用与平移台相连接的夹持器固定好;2) 启动激光控制器进行波数扫描,并通过 CCD 相机采集波数扫描下的干涉图像;3) 计算机对 CCD 相机采集到的干涉图像进行处理,最后获得被测物体平凸透镜的轮廓图。在实验中,CCD 相机共拍摄 $M_s = 600$ 帧波数扫描干涉图像,激光器波数输出如图 4 所示。

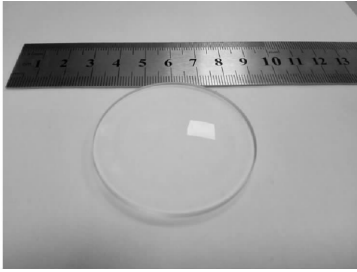


图 3 被测平凸透镜的照片

Fig. 3 Photo of plano-convex lens to be tested

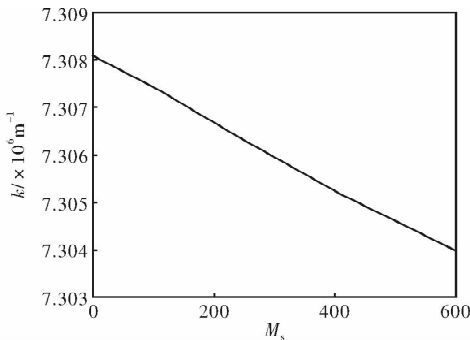


图 4 激光二极管的波数扫描范围

Fig. 4 Wavenumbers range scanned by diode laser

平凸透镜的轮廓测量结果如图 5 所示。为了验证轮廓测量数据是否准确以及轮廓测量系统的精度,对平凸透镜的轮廓数据进行最小二乘法拟合球面,得到拟合球面的曲率半径为 209.199 6 mm,与实际透镜的曲率半径几乎一致,然后用测量得到的平凸透镜的轮廓数据与拟合球面求取测量误差。重复上述实验 10 次,视场内轮廓测量的最大偏差分布如图 6 所示。通过标准差的计算公式(9)可以得出透镜轮廓测量的均方根误差为 ± 19.8 nm。

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{\omega h} \sum_{i=1}^h \sum_{j=1}^{\omega} (E_{ij} - \mu)^2} \quad (9)$$

式中: σ 为被测物体平凸透镜轮廓的测量均方根误差; ω 和 h 分别是视场中横纵 2 个方向的像素点总数; E_{ij} 为在位置 (i, j) 处的测量偏差值; μ 为视场中轮廓测量偏差的平均值。

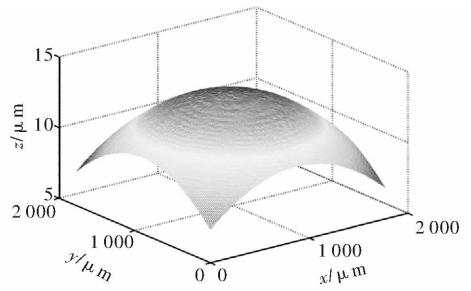


图 5 平凸透镜的轮廓测量结果

Fig. 5 Profile measurement result of plano-convex lens

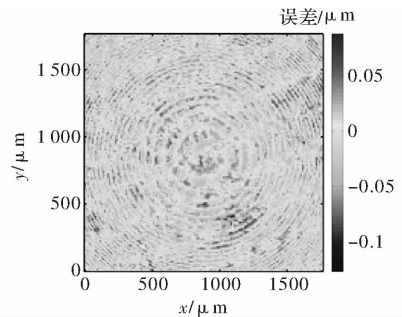


图 6 平凸透镜的轮廓测量误差分布

Fig. 6 Distribution of profile measurement error of plano-convex lens

3 结论

本文提出了一种新方法测量透镜的三维轮廓信息,利用波长扫描干涉方法测量透镜的轮廓。实验结果表明,该方法的优点是系统结构简单、稳定性高,即使在不均匀的光强分布下,也可以使用比较简单的配置实现纳米级的检测精度,在透镜三维轮廓测量上有着很好的发展前景。但是,该方法受到半导体激光波数输出非线性的影响,因此提出通过随机采样傅里叶变换和波数监测解决非线性问题。此外,在测量曲率半径很小的透镜时,由于反射光强随着到透镜中心距离的增大而减弱,以及使用平面做参考面导致远离透镜中心部分到参考面的光学距离大于相干长度,系统能够测量的透镜表面面积会变得比较有限,因此在未来的改进中,使用曲面参考面,并进行多次拍摄,通过算法合成透镜轮廓^[12]。

参考文献:

- [1] HE Yanmin, XIE Chuangliang, XU Zhuoming, et al. Profilemetry measurement based on wavenumber scanning interferometry [J]. Laser Technology, 2016, 40(3):392-396.

- 何艳敏, 谢创亮, 许卓明, 等. 基于波数扫描干涉的表面轮廓测量[J]. 激光技术, 2016, 40(3): 392-396.
- [2] WANG Shuyu, BAI Yulei, HAN Tao, et al. Measurement of profile based on laser wave number scanning interferometry[J]. Electronic World, 2016(20):53-55.
王书雨, 白玉磊, 韩韬, 等. 基于激光波数扫描干涉曲面轮廓度测量[J]. 电子世界, 2016(20):53-55.
- [3] ZHOU Yanzhou, ZHU Wenzhuo, DONG Bo, et al. Dynamical measurement of out-of-plane displacement field and strain field inside resin composite[J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(12): 3217-3223.
周延周, 朱文卓, 董博, 等. 树脂基复合材料内部离面位移场和应变场分布的动态测量[J]. 光学精密工程, 2014, 22(12):3217-3223.
- [4] DING Xiang, LI Fei, HONG Baoyu. Curvature radius measurement by three-dimension profilometry[J]. Journal of Applied Optics, 2012, 33(4):761-765.
定翔, 李飞, 洪宝玉. 三维轮廓扫描法测量透镜曲率半径的实验研究[J]. 应用光学, 2012, 33(4): 761-765.
- [5] RUIZ P D, HUNTLEY J M, WILDMAN R D. Depth-resolved whole-field displacement measurement by wavelength-scanning electronic speckle pattern interferometry [J]. Appl. Opt., 2005, 44(19): 3945-3953.
- [6] DAVILA A, HUNTLEY J M, PALLIKARAKIS C, et al. Simultaneous wavenumber measurement and coherence detection using temporal phase unwrapping [J]. Appl. Opt., 2012, 51(5): 558-567.
- [7] DAVILA A, HUNTLEY J M, PALLIKARAKIS C, et al. Wavelength scanning interferometry using a Ti:Sapphire laser with wide tuning range[J]. Opt. Laser Eng., 2012, 50(8): 1089-1096.
- [8] ZHOU Yanzhou, LIU Yunhong, LIU Yufei, et al. Measurement of compression displacement fields in dual layer epoxy composites by interferometry[J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(11): 2923-2929.
周延周, 刘运红, 刘羽飞, 等. 干涉法测量双层树脂基材料内部的压缩位移场分布[J]. 光学精密工程, 2014, 22(11):2923-2929.
- [9] HUNTLEY J M. Noise-immune phase unwrapping algorithm[J]. Appl. Opt., 1989, 28(16): 3268-3270.
- [10] DO Bo, XU Jinxiong, BAI Yulei, et al. Tapid and high-precision measurement of out-of-plane displacement inside the glass fiber/polymer composite [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2014, 31(2): 331-337.
董博, 徐金雄, 白玉磊, 等. 快速和高精度透视测量玻璃纤维/树脂复合材料构件内部的离面位移[J]. 复合材料学报, 2014, 31(2): 331-337.
- [11] CHEN Z, LIAO H, ZHANG X. Telecentric stereo micro-vision system: Calibration method and experiments[J]. Opt. Laser Eng., 2014, 57(6): 82-92.
- [12] BURGE J H, SU P, ZHAO C. Optical metrology for very large convex aspheres[J]. SPIE, 2008, 7018: 701818-1-12.