

文章编号 1004-924X(2017)增-0087-08

物体表面非接触式高精度瑕疵检测与三维重建

宋丽梅^{1*}, 魏 泽¹, 杨燕罡², 郭庆华^{1,3}, 习江涛³

(1. 天津工业大学 电工电能新技术天津市重点实验室, 天津 300387;

2. 天津职业技术师范大学 机械工程学院, 天津 300222;

3. 伍伦贡大学 计算机、电气工程与通信工程学院, 澳大利亚 2500)

摘要:针对光学器件表面非接触、高精度的检测要求,利用光谱共焦原理搭建一套几何精密测量系统,实现显微镜镜头等光学器件表面的瑕疵检测与三维重建。首先,介绍了光谱共焦位移传感器的测量原理。然后结合高精度位移平台搭建了一套物体表面三维扫描系统,分析系统的结构和原理,对采样率造成的光谱共焦位移传感器读数不精确问题采用一种基于二分法的自适应方法控制系统采样率,并通过对同一标准量块的重复测量,分析系统的整体测量误差。最后,对测得的点云数据进行三维重建,得到待测显微镜镜头的三维曲面模型。实验结果表明,该方法实现了对透明曲面的微米级测量,并在曲面梯度变化较大的边缘部分仍有较好的测量结果,测量最大误差为 $0.624\ \mu\text{m}$,平均误差为 $0.167\ \mu\text{m}$,测量不确定度为 $0.633\ \mu\text{m}$ 。实现了显微镜镜头表面的高精度测量,对镜头表面存在的微小瑕疵可以实现形貌和大小的分析,能够得到待测镜头表面的精准三维模型。

关键词:光谱共焦;三维曲面;微小瑕疵;精密测量

中图分类号:TP391.41 文献标识码:A doi:10.3788/OPE.20172513.0087

Non-contact high-precision defect detection and 3D reconstruction of object surface

SONG Li-mei^{1*}, WEI Ze¹, YANG Yan-gang², GUO Qing-hua^{1,3}, XI Jiang-tao³

(1. *Tianjin Polytechnic University, Key Laboratory of Advanced Electrical Engineering and Energy Technology, TianJin 300387 China;*

2. *Tianjin University of Technology and Education, School of Mechanical Engineering, Tianjin 300222, China;*

3. *University of Wollongong, School of Electrical, Computer and Telecommunications Engineering, Keiraville 2500, Australia)*

** Corresponding author, E-mail: liliymay1976@126.com*

Abstract: Aimed at the requirement of non-contact and high-precision detection on the surface of optical devices, a set of geometric precision measurement system was constructed by using the principle of

收稿日期:2017-04-28;修订日期:2017-06-19.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 60808020, No. 61078041);国家科技支撑计划资助项目(No. 2014BAH03F01);天津市应用基础及前沿技术研究计划资助项目(No. 16JCYBJC15400, No. 15JCYBJC51700);精密测试技术及仪器国家重点实验室开放基金资助项目

spectral confocal to realize flaw detection and 3D reconstruction on the surface of optical devices such as microscope lens and so on. A set of 3D scanning system of object surface was constructed combined with high-precision displacement platform to analyze structure and principle of system after introducing the measurement principle of spectral confocal displacement sensor. A self-adaptive method based on dichotomy was adopted to control sampling rate of system for the problem of inaccurate reading of spectral confocal displacement sensor caused by sampling rate, and overall measurement error of system was analyzed by repeated measurement of the same standard measured mass. Finally, high-precision measurement on the surface of microscope lens was realized. Experimental result shows that the method realizes micro-grade measurement of transparent surfaces, and still has better measurement result in the edges with larger surface gradient change. Maximum error of measurement is $0.624\ \mu\text{m}$, average error is $0.167\ \mu\text{m}$ and uncertainty of measurement is $0.633\ \mu\text{m}$. Analysis of morphology and size can be realized for micro defects existing on the surface of lens and accurate 3D model on the surface of lens to be detected can be obtained.

Key words: spectral confocal; 3D surface; micro defect; precision measurement

1 引言

非接触式检测方式因其不接触待测物体表面的特点,可以在检测过程中避免对待检测器件表面造成损伤,在精密检测领域中得到极大发展。目前非接触式高精度位移传感器有基于激光三角法的位移传感器^[1-2]、基于电容原理的位移传感器^[3-4]、基于电涡流原理的位移传感器^[5]以及基于色散共焦原理的位移传感器等。这些传感器测量速度快、精度高,被广泛应用于各种回转体、曲面器件以及箱体零部件的尺寸和形位误差的测量中。

光谱共焦位移传感器是近年来兴起的一种在共焦显微技术^[6-8]的基础上发展而来的新型非接触、高精度位移传感器。该传感器采用色散共焦原理,以复色光为光源,精度最高可达到纳米量级。由于其直接由光的波长对应轴向距离信息,无需轴向扫描,所以大幅度提高了测量速度,采样率可达几千赫兹。其对被测物体的表面要求低,对光滑表面和粗糙表面均有良好的测量效果,且允许被测物体表面有较大的倾斜角。此外,还可以实现对透明物体的单向厚度测量。

光谱共焦位移传感器的上述特点,使其能够满足多种测量需求,被广泛应用在各种检测领域。例如马小军、高党忠等人利用两个对顶安装的光

共焦位移传感器实现了厚度为 $10\sim 100\ \mu\text{m}$ 的自支撑金属薄膜的厚度及厚度分布的精确测量^[9];蓝河、雷大江等人采用光谱共焦位移传感器,实现了回转轴系 $50\ \text{nm}$ 左右径向回转误差的非接触测量^[10];毕超、刘红光等人应用光谱共焦位移传感器实现了发动机转子叶片叶尖间隙的高精度测量,为航空发动机技术提供了一项新的检测方式^[11]。此外,光谱共焦位移传感器还被用于物体表面粗糙度的测量^[12]、透明材料厚度的测量^[13]和光学元件的缺陷测量等。尤其是在高精度光学器件的检测中,得到了广泛的应用。

本文在详细分析光谱共焦位移传感器工作原理的基础上,通过一个光谱共焦位移传感器与一个高精度二维移动平台相配合,构成一套物体表面三维形貌扫描设备。利用搭建的系统对显微镜镜头表面进行高精度三维扫描,完成了显微镜镜头表面的三维重建和瑕疵检测与分析。

2 光谱共焦位移传感器原理

光谱共焦位移传感器是利用光谱共焦原理来实现高精度位移测量的,整个传感器主要由复色光源、半透分光镜、光学透镜组^[14]以及光谱仪组成,其测量原理如图 1 所示。复色光源发出的光在色散透镜的作用下发生光谱色散,被分解成各种波长的单色光并最终聚焦在光轴上。

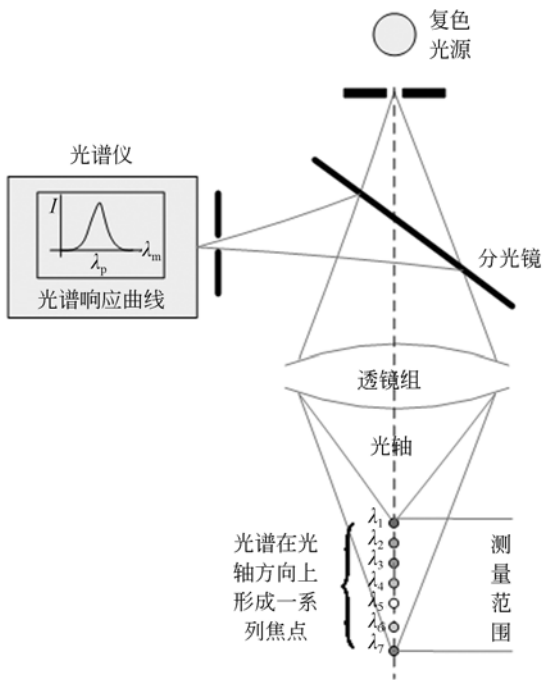


图 1 光谱共焦位移传感器原理图

Fig. 1 Schematic diagram of spectral confocal displacement sensor

设轴向色散透镜为单透镜,其光焦度如式(1)所示:

$$\varphi(\lambda) = (n(\lambda) - 1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right), \quad (1)$$

其中, $n(\lambda)$ 是波长为 λ 的光的折射率, R_1 、 R_2 为透镜前后表面的曲率。则根据焦距公式有:

$$f = \frac{1}{\varphi(\lambda)}. \quad (2)$$

可得波长为 λ 的光在轴向上的焦点位置为:

$$f = \frac{R_1 R_2}{(n(\lambda) - 1)(R_1 - R_2)}. \quad (3)$$

由式(3)可知,不同波长的光通过同一透镜后在光轴上形成了一系列焦点组。对不同波长的光进行编码,使得每种波长的光都对应一个到被测物体表面的距离值。

当进行测量时,由于点光源与光谱仪前端针孔互为共轭关系,所以只有聚焦在被测物体表面的光能够通过反射作用到达光谱仪,最终由光谱仪得到如图 2 所示的光谱响应曲线。通过光谱响应曲线的峰值,确定当前待测物体表面反射回的光所对应的波长并根据之前对波长的编码,得到物体表面被测点的相对轴向位置。

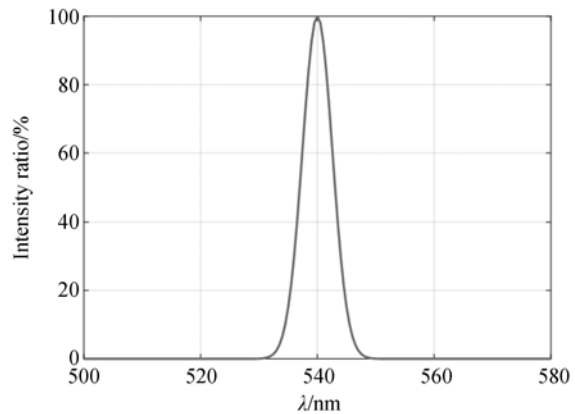


图 2 光谱响应曲线

Fig. 2 Spectral response curve

3 测量系统组成及误差分析

本文利用光谱共焦位移传感器配合一个高精度二维位移平台来实现物体表面的三维形貌测量,整个测量系统的组成如图 3 所示。选用法国 STIL 公司生产的光谱共焦位移传感器来完成 Z 轴方向的距离测量,以 CCS-100 型控制器,配合规格为 CL2-MG210 的探头,测量精度为 55 nm。二维移动平台采用海德星压电二维平台,最小运

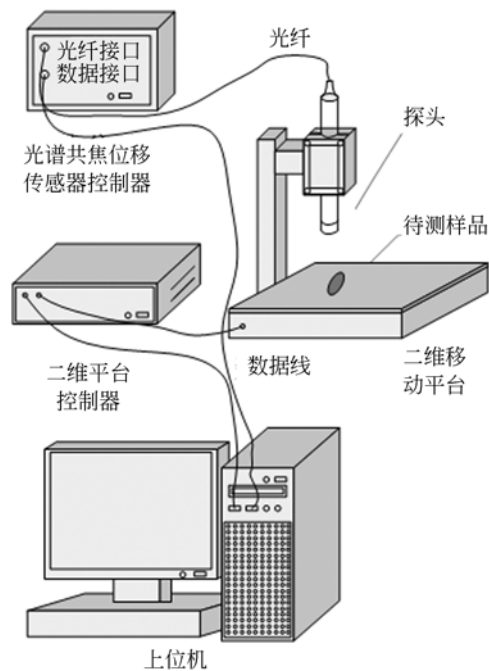


图 3 测量系统组成示意图

Fig. 3 Schematic diagram of measurement system

动步长为 50 nm。根据所选设备的测量精度,理论上可以对显微镜镜头的高精度测量,测量精度应在 1 μm 以内。

在对物体表面进行三维扫描的过程中,随着物体表面形貌的变化,导致返回到光谱仪的光强不断发生变化。实验发现,当光强过大时,会造成几微米至十几微米的读数误差,而当光强过小时会导致测量值在一个大范围内跳变或直接突变为 0,这些都会影响传感器的测量精度。由于光谱仪具有积分效应,也就是在某一特定积分时间内,对所吸收光能进行累积^[15]。所以可以通过调整采样率的方式来改变曝光时间,以控制光谱仪的积分时间,使光强达到最佳范围,即光强比为 20%~80%。采样率与曝光时间、曝光时间与光强的关系如式(4)、(5)所示:

$$T = \frac{1}{f_s}, \quad (4)$$

$$I = \int_0^T I_0 dt, \quad (5)$$

其中, f_s 为采样率,所选设备的可控采样率取值范围为 1~2 000 Hz, T 为曝光时间。 I_0 为光谱仪单位时间内接收到的光强,假定在 0 到 T 的时间内二维位移平台没有运动,则始终对同一点进行测量,光谱仪接收到的光强不变,故 I_0 应为一个常数。由上式可知光谱仪输出光强与采样率反相关。根据这个关系,考虑到最佳光强比范围较大,不需要精确确定其值,所以我们采用二分法确定光谱共焦位移传感器的采样率。设当前采样率为 f_s ,最大采样率与最小采样率分别为 f_{\max} 和 f_{\min} 。控制采样率的程序流图如下图 4 所示:

为保证采样效率,设最大循环次数为 5,当循环进行到第 5 次时,采样率的变化区间长度小于 $f_{\max}/32$,此时采样率变化对光强的影响几乎可忽略不计。若在 5 次循环结束后,光强依然不能达到理想范围,则可认为当前点为噪点,采用中值滤波对这样的点单独进行滤除以消除它的影响。

在采样过程中,外部环境造成的震动会造成测量误差,我们以气浮平台作为隔绝外部震动的手段,多次测量了标准量块表面上 3 mm \times 3 mm 的区域,以此对整体测量误差进行分析。其中一次测量结果如图 5 所示。

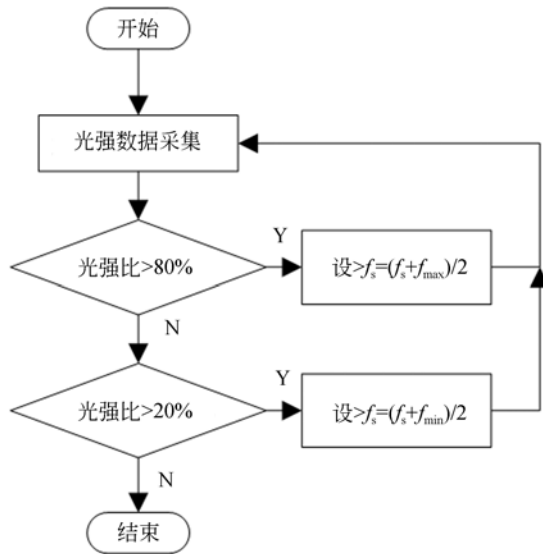


图 4 采样率控制流程图

Fig. 4 Flow chart of sampling rate control

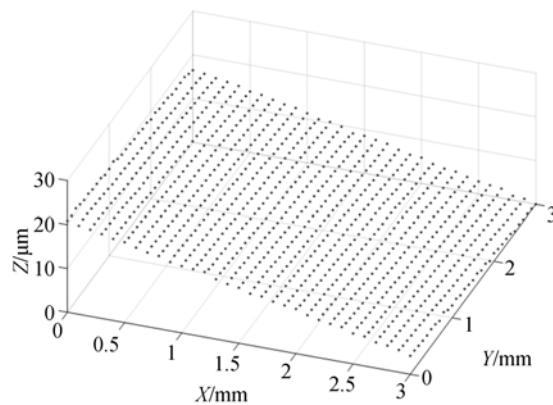


图 5 标准量块表面点云图

Fig. 5 Point cloud for surface of standard block

由图 5 可见,由于置物平台表面不是绝对水平的,使得测得的量块表面有一定的倾角。以 X 方向为行, Y 方向为列,抽取行和列绘制成折线图以分析其误差。图 6(a) 为抽取的第 16 行,图 6(b) 为抽取的第 16 列,红色直线为拟合的理想直线(彩图见期刊电子版)。通过与理想直线的对比,图 6(a) 最大误差为 0.129 μm ,平均误差为 0.042 μm ,标准差为 0.051 μm ;图 6(b) 最大误差为 0.126 μm ,平均误差为 0.050 μm ,标准差为 0.061 μm 。由残差分布直方图可见,各测量点的误差分布符合正态分布。对所有行和列的误差进行统计,统计结果如图 7 所示。

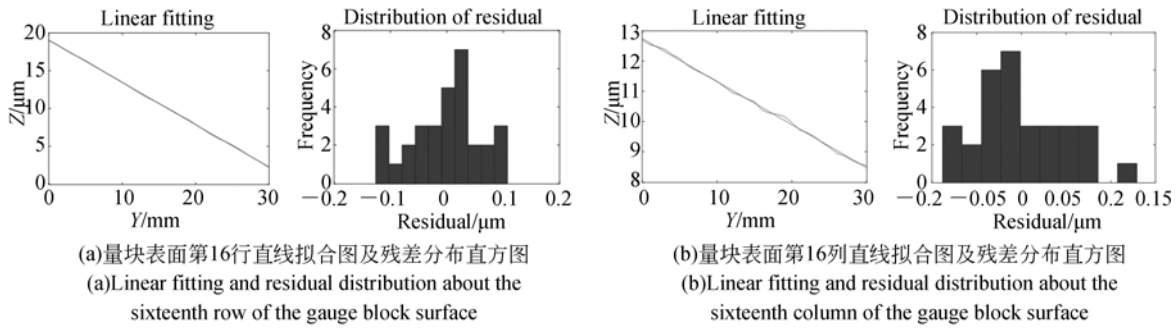


图 6 量块表面直线拟合图及残差分布直方图

Fig. 6 Linear fitting and residual distribution of the gauge block surface

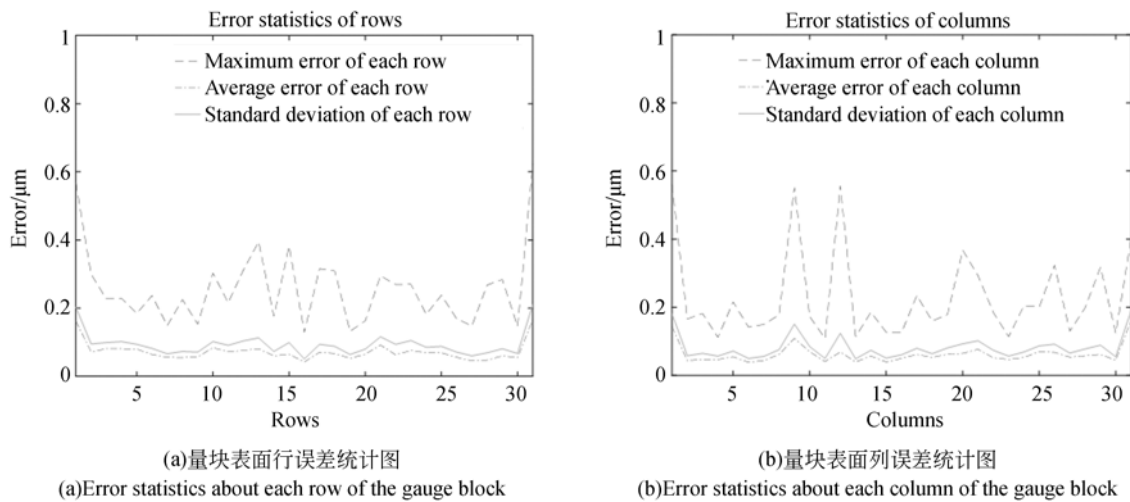


图 7 量块表面各行、列误差图

Fig. 7 Error statistics about each row and column of the block surface

通过对误差的分析,本系统的最大测量误差为 $0.624 \mu\text{m}$,平均测量误差为 $0.167 \mu\text{m}$,标准差为 $0.211 \mu\text{m}$ 。根据误差理论,测量不确定度为标准差的 3 倍,则系统的测量不确定度为 $0.633 \mu\text{m}$,满足设计需求。

4 显微镜镜头表面的瑕疵检测与三维重建

利用所设计的系统,以显微镜镜头为例,对有瑕疵和无瑕疵的显微镜镜头表面均进行了三维扫描,同时,对无瑕疵的显微镜镜头表面进行了两种方式的扫描,即采样率固定及自适应采样率控制,扫描结果如图 8 所示。

如图 8(a)可见在其表面靠近中心的位置存在一处微小凹陷,图 8(b)、(c)为表面无瑕疵的显微镜镜头。对比图 8(b)与图 8(c)可见采用自适

应采样率控制可以有效避免因光强问题导致的采样数据不准问题,有效地去除了杂散点的干扰。同时,可见,在大部分区域,光谱共焦位移传感器可以获得很好的测量效果。但是在边缘部分,近似于 90° 的垂直边缘超出了光谱共焦位移传感器的最大可测倾角,使得测量出现一定误差。图 8 (a)中圆弧部分凹陷处即为镜头的瑕疵。为便于观察,从俯视图和剖视图对有瑕疵及无瑕疵的镜头进行分析,如图 9 所示(彩图见期刊电子版),将瑕疵部分标记为红色。

从图 9(b)俯视图可见,在接近曲面中心处存在一处凹陷的瑕疵,并可观察到瑕疵边缘的具体形状,通过计算得到瑕疵面积为 0.338 mm^2 。从图 9(d)中,可见瑕疵的具体宽度和深度。在该剖面处,瑕疵宽度为 0.45 mm ,最大深度为 $47 \mu\text{m}$ 。根据所测数据对镜头表面进行三维重建得到如图 10 所示曲面图。计算得出所测显微镜镜头的直

径为 6.40 mm, 曲面顶点处曲率为 0.023。

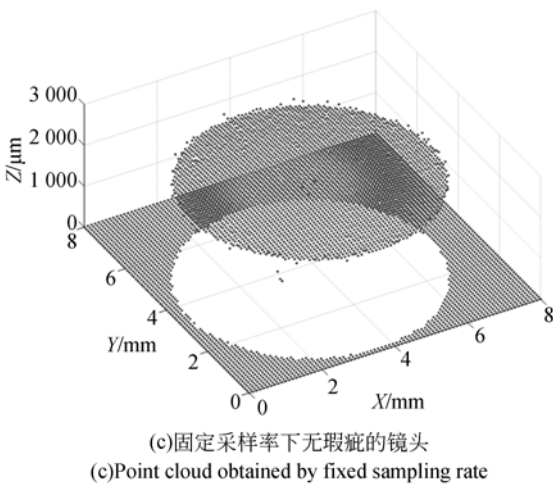
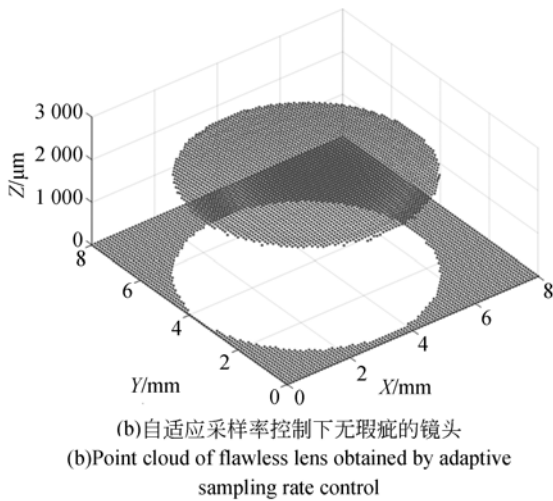
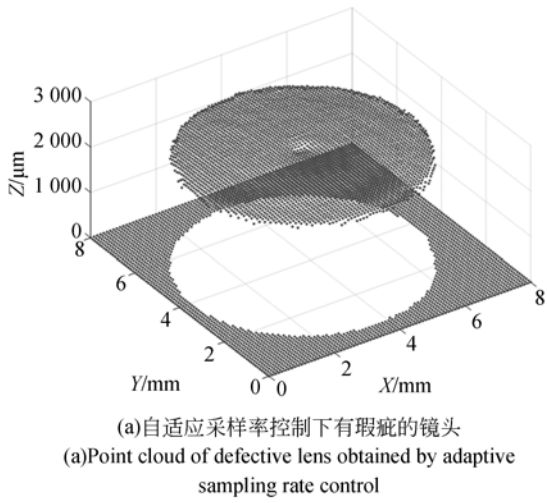


图 8 显微镜镜头表面点云图像

Fig. 8 Point cloud of microscope lens surface

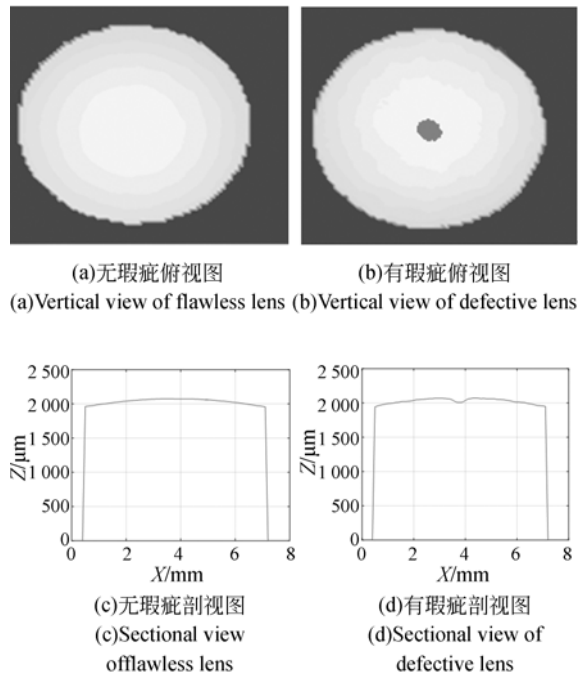


图 9 俯视图和剖视图

Fig. 9 Top view and Sectional view

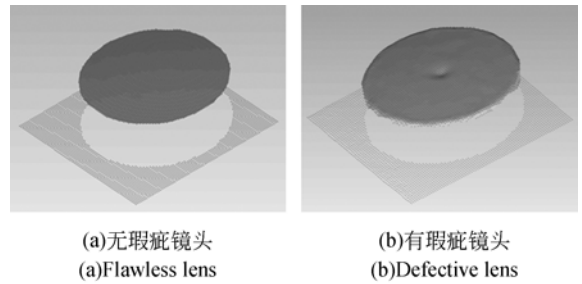


图 10 镜头表面三维重建图

Fig. 10 3D reconstruction of lens surface

5 结 论

本文详细介绍了光谱共焦位移传感器的测量原理, 并利用光谱共焦原理和高精度二维移动平台组建了一套高精度三维形貌扫描系统, 利用该系统可以实现物体表面的非接触式高精度瑕疵检测和三维重建, 可以应用到小尺寸透明物体的检测中。采用一种自适应的采样率控制方法有效降低了光强对光谱共焦位移传感器测量结果的影响, 并通过对测量误差的分析, 得到系统的最大测量误差为 $0.624 \mu\text{m}$, 平均测量误差为 $0.167 \mu\text{m}$, 标准差为 $0.211 \mu\text{m}$, 测量不确定度为 $0.633 \mu\text{m}$,

满足了高精度检测的要求。以显微镜镜头为例,利用该系统采集显微镜镜头表面三维点云数据,对显微镜表面存在的微小瑕疵在形状、面积和深度等方面进行了具体的数值分析。从采集到的点

云数据可见,在近似于 90° 的边缘部分,由于超出了光谱共焦位移传感器的最大可测倾角,所以存在一定的测量误差,但仍可以较好地实现边缘部分的检测和重建。

参考文献:

- [1] 李兵,孙彬,陈磊,等. 激光位移传感器在自由曲面测量中的应用[J]. 光学精密工程,2015,23(07):1939-1947.
LI B, SUN B, CHEN L, *et al.*. Application of laser displacement sensor to free-form surface measurement[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(07):1939-1947.
- [2] 毕超,房建国,刘京亮,等. 基于球形目标的激光位移传感器光束方向标定[J]. 光学精密工程,2015,23(03):678-685.
BI CH, FANG J G, LIU J L, *et al.*. Calibration of beam direction of laser displacement sensor based on spherical target[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(03):678-685.
- [3] 葛川,张德福,李朋志,等. 电容式位移传感器的线性度标定与不确定度评定[J]. 光学精密工程,2015,23(09):2546-2552.
GE CH, ZHANG D F, LI P ZH, *et al.*. Linearity calibration and uncertainty evaluation for capacitance displacement sensor[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(09):2546-2552.
- [4] 张德福,葛川,李显凌,等. 高精度位移传感器线性度标定方法研究[J]. 仪器仪表学报,2015,36(05):982-988.
ZHANG D F, GE CH, LI X L, *et al.*. Linearity calibration method of the high-precision displacement sensor[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2015, 36(05):982-988.
- [5] 李红伟,刘淑琴,于文涛,等. 电涡流传感器检测磁悬浮转子轴向位移的方法[J]. 仪器仪表学报,2011,32(07):1441-1448.
LI H W, LIU SH Q, YU W T, *et al.*. Maglev rotor axial displacement detection method using eddy current sensor[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2011, 32(07):1441-1448.
- [6] BROWNE M A, AKINYEMI O, CROSSLEY F, *et al.*. Stage-scanned chromatically aberrant confocal microscope for 3-d surface imaging[J]. *SPIE*, 1992, 1660:532-541.
- [7] MUELLER T, JORDAN M, SCHNEIDER T, *et al.*. Measurement of steep edges and undercuts in confocal microscopy. [J]. *Micron*, 2016, 84:79.
- [8] WANG B, ZOU L, ZHANG S, *et al.*. Super-resolution confocal microscopy with structured detection [J]. *Optics Communications*, 2016, 381:277-281.
- [9] 马小军,高党忠,杨蒙生,等. 应用白光共焦光谱测量金属薄膜厚度[J]. 光学精密工程,2011,19(01):17-22.
MA X J, GAO D ZH, YANG M SH, *et al.*. Measurement of thickness of metal thin film by using chromatic confocal spectral technology [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(01):17-22.
- [10] 蓝河,雷大江,钱林弘,等. 基于光谱共焦位移传感器的非接触式回转误差测量系统[J]. 制造技术与机床,2017,(03):141-145.
LAN H, LEI D J, QIAN L H, *et al.*. A non contact system for measurement of rotating error based on confocal chromatic displacement sensor [J]. *Manufacturing Technology & Machine Tool*, 2017, (03):141-145.
- [11] 毕超,刘红光,徐昌语,等. 基于光谱共焦技术的叶尖间隙测量方法研究[J]. 航空精密制造技术,2016,52(02):14-18.
BI CH, LIU H G, XU CH Y, *et al.*. Study on Measuring Method of Tip Clearance Based on Chromatic Confocal Technology[J]. *Aviation Precision Manufacturing Technology*, 2016, 52(02):14-18.
- [12] LYDA W, FLEISCHLE D, HAIST T, *et al.*. Chromatic confocal spectral interferometry for technical surface characterization[J]. *Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering*, 2009, 7432:74320Z-74320Z-9.
- [13] 朱方彬,曹世豪. 光谱共焦位移传感器测量透明材料厚度的应用[J]. 光机电信息,2011,28(09):50-53.
ZHU W B, CAO SH H. Application of Confocal Chromatic Displacement Sensors to Measuring Thickness of Transparent Material[J]. *OME In-*

formation, 2011, 28(09): 50-53.

- [14] 刘乾,杨维川,袁道成,等. 光谱共焦显微镜的线性色散物镜设计[J]. 光学精密工程, 2013, 21(10): 2473-2479.

LIU Q, YANG W CH, YUAN D CH, *et al.*. Design of linear dispersive objective for chromatic confocal microscope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(10): 2473-2479.

- [15] 熊慧,杨雪,周梅,等. 光谱仪动态采样时间特性的研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(04): 1130-1134.

XIONG H, YANG X, ZHOU M, *et al.*. Study of Time Characteristics in Spectrometer Dynamic Sampling[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2014, 34(04): 1130-1134.

作者简介:



宋丽梅(1976—),女,河北秦皇岛人,教授,1999年、2001年和2004年于天津大学分别获得学士、硕士和博士学位,主要从事计算机视觉、三维光学测量、逆向工程和模式识别方面的研究。E-mail: liliymay1976@126.com



魏泽(1992—),男,四川泸州人,硕士研究生,2015年于天津工业大学获得学士学位,主要从事机器视觉和图像处理等方面的研究。E-mail: weize456789@163.com

(本栏目编辑:曹金)