

文章编号 1004-924X(2012)06-1182-06

光学元件表面的数字全息在线检测

王璠璟*, 肖文, 潘锋, 丛琳, 李建毅
(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100191)

摘要: 针对光学元件表面质量在线检测的特点, 设计了基于数字全息的三维再现检测系统。该系统采用离轴光路, 避免了被测元件的光轴, 在数字全息再现过程中应用倾斜相差补偿技术去除了由于离轴检测引入的倾斜相位畸变。在检测过程中, 利用围绕光轴旋转被测元件的方法来改变入射照明光方向矢量和相应的观察方向, 实现了多照明矢量合成孔径技术的应用, 扩展了系统的检测距离, 提高了系统分辨率。同时, 多照明角度下检测数据的叠加, 还有效地抑制了检测过程中出现的散斑噪声对结果准确度的影响。通过对分辨率板、高精度玻璃反射镜的检测实验, 验证了该系统在光学元件表面检测中的作用。当记录距离为 40 cm 时, 其分辨率能够达到 10 μm , 满足光学元件表面检测的需要。

关键词: 数字全息; 光学元件; 离轴检测; 相位补偿; 合成孔径

中图分类号: O438.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20122006.1182

Digital holographic on-line detection of optic component surface

WANG Fan-jing*, XIAO Wen, PAN Feng, CONG Lin, LI Jian-yi

(School of Instrument Science and Opto-Electronics Engineering,
Beihang University, Beijing 100191, China)

* Corresponding author, E-mail: wangfj@aspe.buaa.edu.cn

Abstract: An on-line 3D detection system for optic component surface measurement was designed based on digital holography. An off-axis structure was chosen to evade the optical axis of a test object and the tilt phase compensation was used to eliminate the tilted phase distortion caused by an off-axis optic path. In this system, the illuminating angle and view direction could be changed by rotating the object around the optical axis, by which the recording distance was increased and the resolution was improved using synthetic aperture technique. Meanwhile, the superposition of reconstruction images could decrease the effect of speckle noise on the reconstructed distribution. The proposed method is experimentally validated by a resolution test target and an optic mirror, and it shows that the 2D resolution of the system has been 10 μm at a recording distance of 40 cm and the system noise also be suppressed effectively.

Key words: digital holography; optic component; off-axis detection; phase compensation; synthetic aperture

收稿日期: 2012-01-06; 修订日期: 2012-03-01.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 31000387, 61177006)

1 引言

高功率激光装置中,光学元件表面损伤会造成激光器性能退化,对光束质量也会产生影响;因此,必须对光学元件的损伤实施在线检测^[1-2],另外,当疵病恶化到一定程度时,必须予以更换^[3]。美国劳伦斯·利佛莫尔实验室(Lawrence Livermore National Laboratory, LLNL)研制的光学元件在线检测系统已应用到了美国国家点火装置(National Ignition Facility, NIF)中^[4]。目前,主要的光学元件损伤在线检测装置均采用暗场成像技术^[5],能够通过探测疵病的散射光来对元件的质量情况做出评估;然而该方法仅能够判断疵病的尺寸和形状,无法对其内部情况进行准确的描绘,同时,由于成像镜头的应用,使得该技术只能通过机械调节的方式进行对焦,无法在后期进行更为方便、有效的处理。

数字全息技术^[6-7]是传统全息术与现代光电技术结合的产物,它利用 CCD 等电子成像器件代替传统胶片、干板等介质,数字化地记录全息图,并通过电子计算机进行数字化的全息再现。数字全息不仅能够获取物体表面物光波场的强度分布图像,还能够获得相应的相位分布图像,并通过解算还原被测表面的三维形貌分布。由于采用计算机实现数字化的再现计算过程,因此数字全息可以灵活地进行干扰项滤除^[8]、相位补偿^[9]、自动聚焦^[10]等调整,无需在数据采集过程中进行机械调整,从而提高了检测效率和灵活性。由于被测表面的数据以数字化形式存储、记录,数字全息技术可以将不同状态、不同时刻下的测量数据进行高效的信息融合,得到更为全面、精确的测量结果。由于具有以上介绍的诸多优势,数字全息已经被广泛应用于三维检测等领域^[11-13]。

本文针对光学元件在线检测,设计了基于数字全息的光学元件三维离轴检测系统。通过利用倾斜相位补偿的方法解决离轴观测引起的相位畸变,该系统能够在避开主光轴的条件下得到光学元件表面的精确三维形貌分布。该系统还利用多照明矢量合成孔径方法延长了表面三维检测的距离,改善了分辨力,同时抑制了噪声,为光学元件表面的在线实时高精度三维检测打下了基础。

2 理论分析

光学元件的表面数字全息在线三维检测需要检测系统具有离轴光路,在避开被测元件光轴的同时,还要求具有较长的工作距离和较高的分辨率。但是离轴光路会在检测过程中引入倾斜相差,而较长的工作距离又会减小检测系统的等效孔径,进而影响系统的分辨率。

在数字全息再现过程中利用倾斜相位补偿方法可以去除该倾斜相位畸变。数字全息的再现是在计算机中利用虚拟的平面光波对全息图进行照明,并通过虚拟计算衍射光波的传播来实现的。再现计算中,数字全息可以通过调整再现距离的方法对不同记录距离的物体进行成像,无需机械对焦。当再现距离与被测表面的记录距离相等时(可以通过自动聚焦算法获取),便可以得到被测光学元件表面的物光波场分布数据。倾斜相位补偿的原理如图 1 所示。

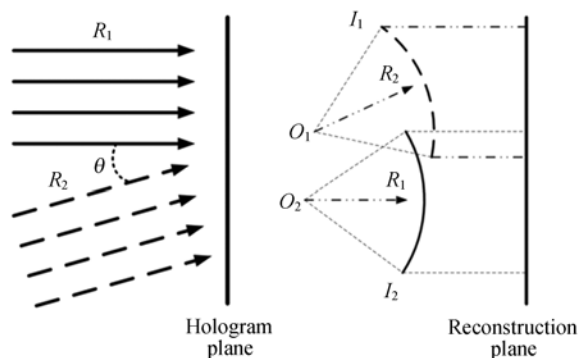


图 1 倾斜因子补偿原理示意图

Fig. 1 Layout of tilt compensation

图中 R_1 , R_2 为不同角度的再现照明光波, O_1 , O_2 为相应的再现物光波, 右侧为再现得到的物光波场相位分布图。倾斜相差补偿就是通过改变再现照明光波的角度来为全息图引入相差补偿, 等效地改变再现过程中虚拟平面照明光波的角度, 实现对再现物光场波前传播方向的调整, 最终去除倾斜相差对检测结果的影响。

为了延长系统的检测距离, 提升数字全息检测的分辨率, 本文采用多照明矢量的合成孔径方法来扩展系统的等效孔径。多照明矢量合成孔径的技术原理如 2 所示。

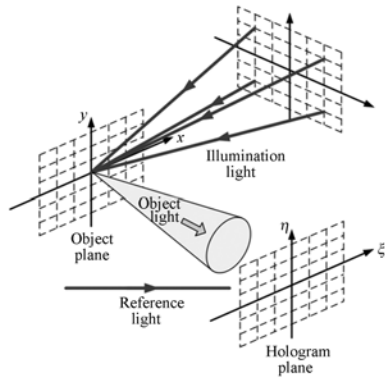


图 2 实验光路原理图

Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup

被测光学元件的表面处于 (x, y) 平面上, 设其形貌分布为 $O(x, y)$ 。当照明平面光波与 x 轴、 y 轴的夹角分别为 ϕ_i 与 φ_i 时, 其相应的空间频率分别为 $\gamma_i = \cos \phi_i / \lambda$ 和 $\zeta_i = \cos \varphi_i / \lambda$, 因此, 照明光波在 (x, y) 平面上的光场分布为:

$$I_i = A_0 \exp[-j2\pi(\gamma_i x + \zeta_i y)] \quad (i=1, 2, 3, 4 \dots) \quad (1)$$

因此, 被测表面处的反射光场(物光波)可以表示为:

$$U_i(x, y) = O(x, y) I_i(x, y, \gamma_i, \zeta_i) \quad (2)$$

其频谱(即傅里叶变换)可以表示为:

$$\begin{aligned} \overline{U}_i(f_x, f_y) &= \text{FFT}\{O(x, y)\} \cdot \\ &A_0 \exp[-j2\pi(\gamma_i x + \zeta_i y)] = \\ &A_0 O'(f_x + \gamma_i, f_y + \zeta_i), \end{aligned} \quad (3)$$

其中, $O'(f_x, f_y)$ 为 $O(x, y)$ 的频谱, f_x 和 f_y 为空间频率。由该式可以看出, 在照明光的影响下, 物光的频谱在频域上发生了平移, 且平移矢量为 (γ_i, ζ_i) 。

在全息记录面 (ξ, η) 上, 系统的等效孔径受到 CCD 光敏面尺寸的制约, 在频谱响应上受到限制^[14]。因此, 系统能够接收到的实际的物光频谱为:

$$\begin{aligned} \overline{U}_0(f_x, f_y) &= A_0 CO'(f_x + \gamma_i, f_y + \zeta_i) \\ &\text{rect}\left(\frac{\lambda d f_x}{L}\right) \text{rect}\left(\frac{\lambda d f_y}{N}\right), \end{aligned} \quad (4)$$

其中, C 为复常数, rect 为矩形函数, d 为记录距离, L, N 分别为 CCD 光敏面的长和宽。可以看出, 全息再现光场的频谱, 是平移后的物光频谱和矩形函数的乘积。同时, 物光谱的位移量由照明光的角度决定, 而矩形函数的尺寸由 CCD 光敏面的大小决定。

当改变照明光的方向, 记录一系列包含物光波不同频谱分量的全息图时, 通过对再现物光波的非相干叠加, 可以得到合成光波场:

$$\begin{aligned} \overline{U}_0^{\text{sum}}(f_x, f_y) &= \sum_i A_0 CO'(f_x + \gamma_i, f_y + \zeta_i) \cdot \\ &\text{rect}\left(\frac{\lambda d f_x}{L}\right) \text{rect}\left(\frac{\lambda d f_y}{N}\right) = \\ &A_0 CO'(f_x, f_y) SA(f_x, f_y). \end{aligned} \quad (5)$$

其中

$$SA(f_x, f_y) = \sum_i \text{rect}\left[\frac{\lambda d(f_x + \gamma_i)}{L}\right] \text{rect}\left[\frac{\lambda d(f_y + \zeta_i)}{N}\right],$$

即多个具有不同位移量的矩形孔径叠加而成的合成孔径。

可以看出, 通过改变照明光的照明角度, 检测系统的等效孔径得到了相应改善, 能够接收到更多的物光高频信息, 提升了系统的分辨率。在得到合成孔径效果的同时, 由于照明光方向的改变, 不同全息图之间的散斑噪声也具有统计独立性, 因此, 通过叠加处理, 散斑噪声也能够得到有效抑制^[15]。

3 系统设计及实验结果分析

基于以上分析, 本文设计了如图 3 所示的数字全息离轴检测实验系统。

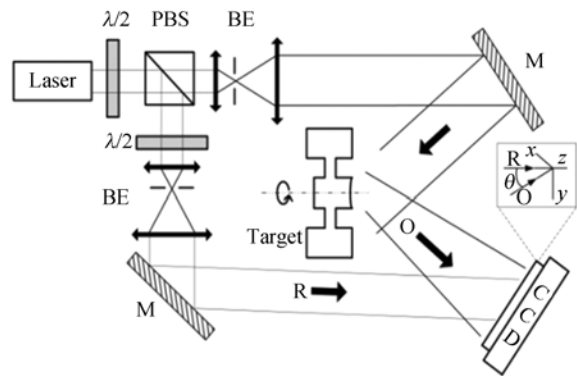


图 3 实验光路原理图

Fig. 3 Schematic diagram of experimental setup

该光路结构以无透镜离轴全息光路为基础, 采用 532 nm、20 mW 半导体泵浦固体激光器作为相干光源。光路中参考臂和照明臂的光强比可以通过半波片($\lambda/2$)和偏振分光棱镜(PBS)进行调节, 并利用扩束器(BE)进行扩束和准直。照明光为平面波, 以一定的夹角照射在被测物体(Target)上。为了简化试验系统设计, 被测物体被安

装在一个旋转台上,可以围绕其光轴进行旋转。CCD 放置在被测面反射光的方向上,与被测面的距离约为 40 cm。被测表面反射的物光(O)与参考光(R)在 CCD 光敏面汇合,形成干涉图。物光和参考光的夹角可以通过旋转参考臂上的反射镜(M)来调节。

为了验证该检测系统的有效性,本文首先对 USAF1953 分辨率板进行了实验分析。通过绕中心轴旋转分辨率板,获取了一系列全息图后,利用频域滤波方法去除零级像和共轭像,同时采用倾斜因子补偿调整再现物光波的角度,并利用自动聚焦算法得到了准确的再现距离。为了使得各全息图的再现像具有相同的放大倍率,本文利用双步菲涅尔算法^[16]进行再现计算,再现光波场的强度分布如图 4 所示。

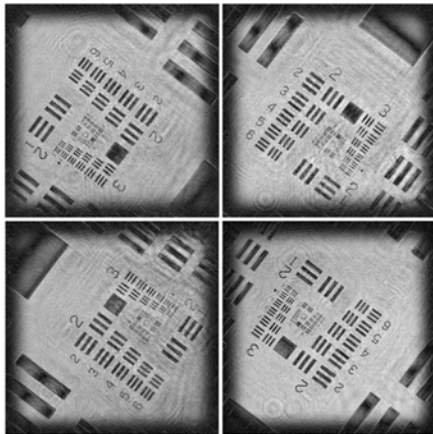
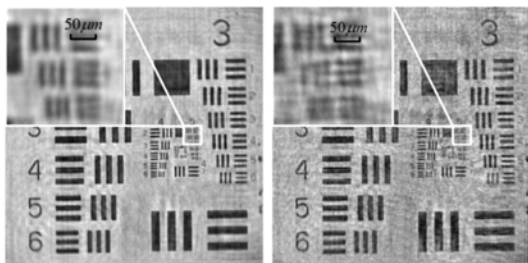


图 4 不同旋转角度下分辨率板再现图像

Fig. 4 Reconstruction images of holograms with different angles

为了实现多再现光波场的准确叠加,需要对再现图进行配准,叠加处理结果如图 5 所示。图



(a) 处理后的再现图像 (b) 处理前的图像

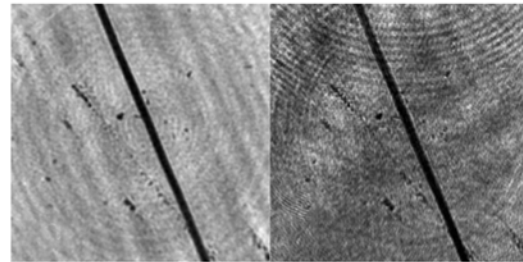
(a) After superposition (b) Before superposition

图 5 分辨率板叠加

Fig. 5 Reconstruction images of resolution test target

中(a)为配准叠加后的结果,(b)为未叠加的全息再现图像。不难看出,应用合成孔径方法,该离轴检测系统分辨率得到了明显的提升,能够较好地分辨 10 μm 左右的条纹,同时,较好地抑制了再现图像的噪声。

利用该装置,本文还对激光器谐振腔反射镜进行了检测。被测面是一个口径为 5 mm,曲率半径为 8 m 的球形光滑表面,检测结果如图 6 所示。图中(a)为经过叠加处理后的再现强度图像,(b)为未经叠加处理的数据。图中的黑色直线是放置在被测元件表面用来作为参考的直径为 70 μm 左右的头发丝。可以看出,通过合成孔径的应用,图像中各部分的边缘变得更加清晰,检测的分辨率得到了提升,背景噪声也得到了抑制。



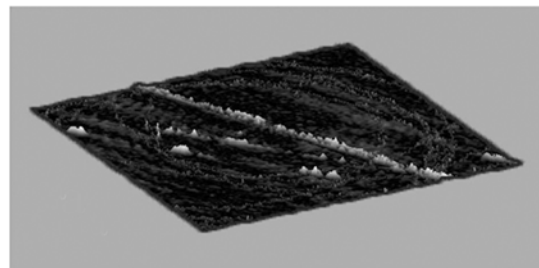
(a) 叠加后 (b) 叠加前

(a) After superposition (b) Before superposition

图 6 光学反射镜面再现强度图

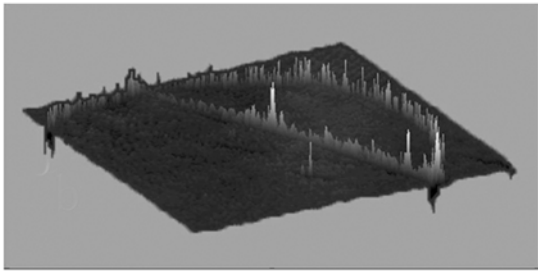
Fig. 6 Reconstruction amplified images of test mirror

为了去除大尺度的形貌变化,更好地实现被测元件表面微观疵病形貌的检测,本文利用参考文献[17]中所述的方法,将大尺度的球形形貌分布从相位图中去除,经解算处理后,得到如图 7 所示的被测表面的三维形貌图像。图中(a)为经过叠加处理后的表面三维形貌分布,(b)为未经叠加处理的形貌数据。图中环形的扰动是在解包裹过程中相位跳变引发的噪声。不难看出,通过合



(a) 叠加后

(a) After superposition



(b) 叠加前

(b) Before superposition

图 7 光学反射镜面再现强度图

Fig. 7 Reconstruction phase images of test mirror

成孔径技术的应用,噪声的强度得到了明显的抑制,而淹没在噪声中的表面微观疵病被有效地突出出来,从而实现了表面疵病的三维提取和检测。

参考文献:

- [1] 解亚平,孙志红,成泽,等. 光学元件损伤在线检测中的图像处理[J]. 强激光与粒子束,2006,18(7):1085-1089.
XIE Y P, SUN ZH H, CHENG Z, *et al.*. Image processing in online inspection of damage in optics [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006,18(7):1085-1089. (in Chinese)
- [2] 杨李茗,叶海仙. 大口径大曲率半径光学元件的高精度检测[J]. 光学 精密工程,2011,19(6):1207-1212.
YANG L M, YE H X. High-precision metrology for optical components with large-apertures and large radii of curvature[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011,19(6):1207-1212. (in Chinese)
- [3] THOMPSON C E, KNOPP C F. Optics damage inspection for the NIF[C]. *Third International Conference on Solid State Lasers for Application to Inertial Confinement Fusion*, Monterey, USA: SPIE, 1999:943-954.
- [4] RAINER F. Mapping and inspection of damage and artifacts in large-scale optics [C]. *Laser-Induced Damage in Optical Materials*, Boulder, USA: SPIE, 998:272-281.
- [5] 任冰强,黄惠杰,张维新,等. 光学元件损伤在线检测装置及实验研究[J]. 强激光与粒子束,2004,16(4):465-468.
REN B Q, HUANG H J, ZHANG W X, *et al.*. Online inspection apparatus and experiments on optics damage[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004,16(4):465-468. (in Chinese)
- [6] GOODMAN J W, LAWRENCE R W. Digital image formation from electronically detected holograms[J]. *Applied Physics Letters*, 1967,11(3):77-79.
- [7] SCHNARS U, JÜPTNER W. Direct recording of holograms by a CCD target and numerical reconstruction[J]. *Applied Optics*, 1994,33(2):179-181.
- [8] NICOLAS P, CHANDRA S S, JONAS K, *et al.*. Suppression of the zero-order term in off-axis digital holography through nonlinear filtering[J]. *Applied Optics*, 2009,48(34):H186-H189.
- [9] DI J L, ZHAO J L, SUN W W, *et al.*. Phase aberration compensation of digital holographic microscopy based on least squares surface fitting[J]. *Optics Communications*, 2009,282(19):3873-3877.
- [10] SHEN B CH, CHEN C H. Application of autofocus algorithms in holographic reconstruction[C]. *Remote Sensing and GIS Data Processing and Other Applications*, Yichang, P. R. China: SPIE, 2009:74984G1-6.
- [11] 朱越,刘文耀,刘方超,等. 用数字全息术检测轮胎气泡缺陷[J]. 光学 精密工程,2009,17(5):1099-1104.
ZHU Y, LIU W, LIU F CH, *et al.*. Inspection of air bubble defect in tires by digital holography[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009,17(5):1099-1104. (in Chinese)
- [12] 周文静,彭娇,于瀛洁. 基于数字全息技术的变形测量[J]. 光学 精密工程,2005,13(增):46-51.

4 结 论

本文设计了一种基于数字全息的光学元件离轴检测光路,通过对倾斜相位畸变的补偿,该系统能够避开被测元件的主光轴对它进行三维的高精度检测。在此基础上,通过应用多照明矢量合成孔径技术,系统的检测距离得到了延展,分辨力得到了有效的提高。通过理论分析和实验验证,该系统能够在离轴状态下对光学元件表面进行高精度检测,并有效抑制散斑噪声等带来的影响,能够得到优于 $10 \mu\text{m}$ 的横向分辨率。分辨率的进一步提高和实时化测量设备的研制将在今后的研究中进一步的开展。

- ZHOU W J, PENG J, YU Y J. Deformation measurement via digital holography[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13 (Supp.): 46-51. (in Chinese)
- [13] 黎发志,罗霄,赵晶丽,等. 离轴非球面的计算全息图高精度检测技术[J]. *光学精密工程*, 2011, 19 (4):709-716.
- LI F ZI, LUO X, ZHAO J L, *et al.*. Test of off-axis aspheric surfaces with CGH[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(4):709-716. (in Chinese)
- [14] GUO CH SH, ZHANG L, RONG ZH Y, *et al.*. Effect of the fill factor of CCD pixels on digital holograms: comment on the papers "frequency analysis of digital holography" and "frequency analysis of digital holography with reconstruction by convolution"[J]. *Optical Engineering*, 2003, 42 (9):2768-2771.
- [15] XIAO W, ZHANG J, RONG L, *et al.*. Improvement of speckle noise suppression in digital holography by rotating linear polarization state[J]. *Chinese Optics Letters*, 2011, 9(6):060901-1-3.
- [16] ZHANG F C, ICHIROU Y. Algorithm for reconstruction of digital holograms with adjustable magnification[J]. *Optics Letters*, 2004, 29(14):1668-1670.
- [17] WANG F J, XIAO W, PAN F, *et al.*. Curvature measurement of optical surface using digital holography[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2011, 49(7):903-906.

作者简介:



王璠璟(1983—),男,山西大同人,博士研究生,2006年于北京理工大学获得学士学位,主要从事数字全息方面的研究。E-mail: wangfj@aspe.buaa.edu.cn



李建毅(1985—),天津人,硕士研究生,2008年于北京航空航天大学获得学士学位,主要从事全息干涉检测方面的研究。E-mail: ljy1985007@aspe.buaa.edu.cn



潘锋(1979—),男,广西桂林人,讲师,硕士生导师,2001年于哈尔滨理工大学获学士学位,2003、2007年于哈尔滨工业大学分别获硕士和博士学位,主要从事数字全息显微及干涉测量方面的研究。E-mail: panfeng@buaa.edu.cn

导师简介:



肖文(1962—),男,陕西西安人,教授,博士生导师,1984年于西北大学获学士学位,1995年于中国科学院获博士学位,现为北京航空航天大学仪器科学与光电学院副院长,主要从事光纤传感器、光学元件抗辐照加固以及数字全息等方面的研究。E-mail: xiaow@buaa.edu.cn



丛琳(1977—),黑龙江哈尔滨人,博士研究生,讲师,2000年于哈尔滨理工大学获学士学位,主要从事光学传感器和散斑干涉检测方面的研究。E-mail: conglin@aspe.buaa.edu.cn