

基于自聚焦透镜的光纤数字全息系统实验研究*

李世扬 赵建林** 范琦 宋小杉

(西北工业大学理学院光信息科学与技术研究所, 西安 710072)

摘要 在光纤数字全息光路中引入自聚焦透镜, 利用其特有的成像特性, 作为物光波的中继传输器件, 构成一套紧凑型光纤数字无透镜傅里叶变换全息记录系统, 以实现微小物体的全息记录与数值再现. 研究表明, 结合自聚焦透镜和光纤数字全息术的特点, 不仅可使光学测试系统紧凑、微型化, 而且还可以对一些特殊环境、光线难以直接到达的隐藏区域或封闭系统内部进行测量.

关键词 自聚焦透镜; 光纤数字全息术; 无透镜傅里叶变换全息图; 数值再现像

中图分类号 O438.1 **文献标识码** A

0 引言

数字全息术作为一种高灵敏度、高准确度及便捷的测量技术, 由于可直接得到物场的三维信息, 而被广泛应用于多种参数的测量^[1]. 但普通数字全息测量系统由于体积较大而难以用于一些封闭结构或光束不易直接照射到的隐蔽区域测量. 光纤数字全息系统省去了普通全息光路中必不可少的各种分立光学元件, 不仅使系统更加紧凑, 对环境稳定性的要求也不像传统全息光路那样严格. 自聚焦透镜与传统的球面透镜相比, 除了具有重量轻、体积小等特点外, 还能较好地校正像差^[2,3]、且易于与光纤耦合及连接等优点, 而被广泛应用于光纤传感系统中^[3,4], 用以测量位移^[5]、振动^[6]、内外三维曲面和微观形貌^[7,8]等. 同样, 将自聚焦透镜运用到光纤数字全息光路中作为物光复振幅的中继传输器件, 不仅可使光学系统小型化, 而且还可以利用其特有的结构特性对一些光线难以到达的隐藏区域进行近距离成像, 从而可实现对物体的隐蔽区域或封闭系统内部全息图的数字记录. 本文从实验上初步探讨了自聚焦透镜在光纤数字全息术中的应用, 分别得到了通过自聚焦透镜记录的物体的数字全息像, 以及反映物场变化的全息干涉图样.

1 1/4 截距自聚焦透镜的成像特性

自聚焦透镜的折射率沿径向呈梯度变化, 因而与传统的具有均匀折射率分布的普通透镜不同, 光线在自聚焦透镜内的传播轨迹为曲线, 且呈周期性变化^[6], 如图 1. 图中 x_0 和 p_0 分别表示光线在入射点的径向坐标和斜率, x 和 p 分别表示相应的出射点

的坐标和斜率. 设 α 为自聚焦透镜的折射率分布常数, 则当传播距离 $z=2\pi/\alpha$ 时, $x=x_0$, $p=p_0$, 光线在自聚焦透镜中的传播路程为一个周期, 故一般将此长度 $2\pi/\alpha$ 称为自聚焦透镜的截距, 并表示为 P .

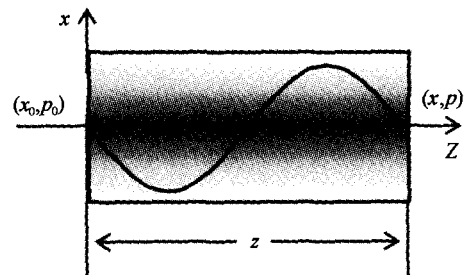


图 1 光线在自聚焦透镜中的传播

Fig. 1 Propagation of the paraxial ray in self-focusing lens

当自聚焦透镜具有多个截距时, 其焦距和主平面位置随截距 P 呈周期性变化^[9]. 可以证明, 对于 1/4 截距的自聚焦透镜, 其焦距 $f=1/n_0\alpha$ 为最小, 且实焦点 F 、 F' 恰好在透镜两端面上. 此时物像关系式^[9]为

$$dd' = f^2 \quad (1)$$

式中 d 和 d' 分别为自聚焦透镜的物距(物平面到透镜前端面的距离)和像距(像平面到透镜后端面的距离). 由式(1)可知, 当 f/d 趋近于 0 时, d' 很小, 即物体经 1/4 截距的自聚焦透镜成像后, 像平面到透镜后端面的距离趋于 0. 此时若以自聚焦透镜的后端面为像平面, 则离焦量趋于 0, 故一般可近似认为自聚焦透镜的后端面为在焦像平面. 由于成像性质类似于薄透镜^[10], 自聚焦透镜可以在许多成像和光学信息处理系统中有效地代替薄透镜, 同时由于其折射率呈梯度渐变分布, 所以校正像差的自由度大大提高, 并且因其体积小、重量轻, 还可以使光学系统实现微型化.

2 自聚焦透镜在光纤数字全息系统中的应用

光纤数字全息系统中, 光纤本身的可绕曲性使

*航空科学基金(批准号:02I53075)和西北工业大学研究生创业种子基金(项目编号:Z20040065)资助项目

** Tel:029-88495724-801 Email:jlzhao@nwpu.edu.cn

收稿日期:2004-10-26

得整个光路调节起来更加灵活、方便,因而很适用于内窥式探测.用光纤数字全息系统对物体的隐蔽区域或封闭系统内部进行测量时,对隐藏区域的照明可以采用光纤传光来实现,因此如何使探测器件清楚地接收物光复振幅信息成为整个系统的关键.由于 CCD 的尺寸等因素而难以靠近被测对象并有效地记录数字全息图,所以必须对物体反射光波进行必要的中继传输,以便近距离地被 CCD 接收.目前采用光纤传像束可以传输物光信息,但分辨率较低^[3],因而会影响测量准确度.利用多截距、低色差的长自聚焦透镜棒代替光纤束作为物光复振幅的中继传输器件,不仅可以解决探测器件接收物光和对全息图的记录问题,还可使测量结果具有较高的分辨率,以保证测量结果的准确度.

在本文的光纤数字全息实验光路中,采用 1/4 截距的自聚焦透镜将一定距离之外的物体成像在自聚焦透镜后端面,再用 CCD 接受该像场光波与参考光波的全息图.进而通过数值再现分别得到了经自聚焦透镜记录的数字全息图的再现像和相位干涉图样.

2.1 微小物体的全息记录与数值再现

实验光路如图 2.由 He-Ne 激光器发出的竖直偏振的细激光束经分束镜 BS 分成两束,一束由扩束镜 BE₁ 耦合进多模光纤后照射物体,该物体经 1/4 截距的自聚焦透镜成像到透镜的后端面附近,相应的像场光波投射到 CCD 靶面;另一束由扩束镜 BE₂ 耦合进单模光纤,自光纤输出端出射的光波可视为球面波,并被直接投射到 CCD 靶面.两光波在 CCD 靶面发生干涉并被 CCD 记录.实验中,调整自聚焦透镜的后端面 and 单模光纤输出端到 CCD 靶面的距离相等,构成无透镜傅里叶变换全息光路.其中自聚焦透镜和单模光纤输出端固定在一个小的载物台上,从而使整个装置结构紧凑、且易于调节.无透镜傅里叶变换全息图的特点是,仅需对所记录

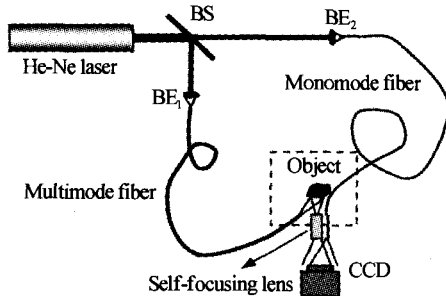


图 2 基于自聚焦透镜成像的光纤数字无透镜傅里叶变换全息光路

Fig. 2 Experimental setup with fiber and self-focusing lens for recording the digital lensless fourier transform holograms

的全息图作一次傅里叶变换就可得到清晰的数值再现像^[11].此外,实验操作中自聚焦透镜的后端面和点光源不严格等距的问题,可以通过数值校正的方法进行补偿.与 M. Gustafsson 等提出的无透镜全息显微装置中^[12]利用 1/4 截距的自聚焦透镜实现靠近被照明物体的参考点源相比较,本系统可利用自聚焦透镜成像的周期特性,截取不同长度的自聚焦,透镜棒对一些封闭结构和隐蔽区域实现相关量的测量.

实验中使用的自聚焦透镜长 5 mm,端面为平面,直径为 1.8 mm.分别以打印在白纸上的字母“DH”和 1.5 cm 长的实物螺钉为记录物.为了提高系统的成像放大率,在光路中适当调整物平面到自聚焦透镜前端面的距离,使物体在自聚焦透镜后端面所成的像尽可能占满透镜端面.将端面所在的平面作为物平面记录全息图,最后通过数值再现即可得到其再现像如图 3.图中的 0 级衍射斑已通过 V 型滤波^[13]进行抑制处理.

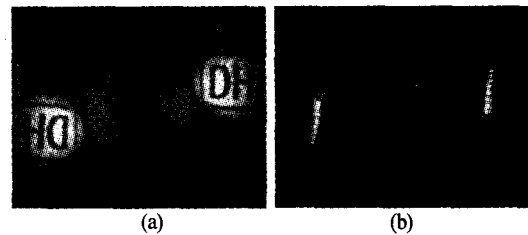


图 3 自聚焦透镜对字母和螺钉成像后的全息再现结果
Fig. 3 Reconstructed holographic images of different objects imaged by self-focusing lens

2.2 物场变化的全息干涉测量

利用图 2 光路对平板的离面弯曲进行了定性测量.试样为长 6.5 cm,宽 3.2 cm,厚 1.2 mm 的薄铝板,其下端固定,上端施加适当大小的向后拉力.对所记录的铝板变形前后的两幅全息图,分别采用两种数值再现方法^[14,15]获得其变形信息.第一种方法为模拟光学二次曝光法进行数值重建.即先将所记录的两幅数字全息图相加,然后对叠加后的数字全息图进行数值再现,不同时刻的物光波被同时再现,图 4(a)所示只保留共轭像部分,所得结果反映了两种状态下再现的物光波的干涉图样.第二种方法是先对铝板表面在不同状态下记录的两幅数字全息图分别进行数值再现,再从各自得到的复振幅分布中提取相应的相位信息,然后仅对相位分布作相减运算,即可得到反映表面变形的包裹相位差图,如图 4(b).通过对包裹相位差进行分析,经相位解包裹运算解调出连续的相位差分布信息^[16],如图 5,再利用自聚焦透镜的物象放大关系就可得到铝板表面实际形变大小及分布.

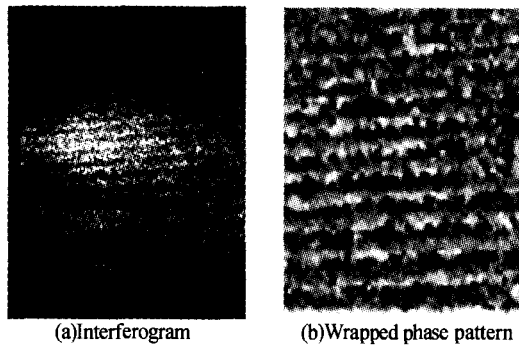


图 4 变形物场在自聚焦透镜端面的全息干涉图样和包裹相位差图样

Fig. 4 Reconstructed holographic interferogram and wrapped phase pattern corresponding to the deformed aluminium board on the surface of self-focusing lens

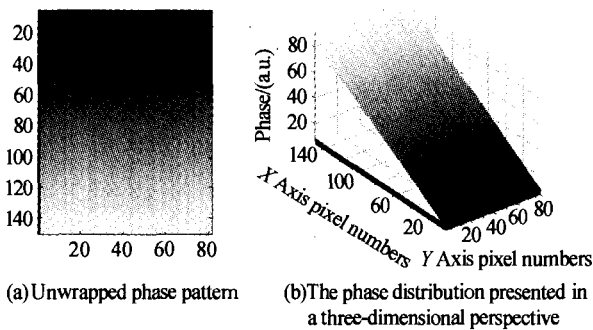


图 5 解包裹后自聚焦透镜端面得到的连续相位分布
Fig. 5 Unwrapped phase pattern corresponding to the deformed aluminium board on the surface of self-focusing lens

从图 4(a)和 4(b)的结果可以看出,采用自聚焦透镜作中继成像后,形变前后铝板表面均成像于自聚焦透镜后端面附近,使得所再现出的干涉条纹图样和包裹相位差图样也位于自聚焦透镜后端面附近.因而所显示出的条纹相对密集,经简单放大后的包裹位相差图样也不是很清晰.对此可以通过加显微镜和高像质放大的数字处理手段来放大细节信息,以进一步提高系统的分辨率.

2.3 光纤作为传输介质对全息图记录的影响及讨论

由于光源的相干性影响,物参光的光程差超过一定范围时将无法拍摄出全息图. He-Ne 激光虽然相干性较好,但相干长度仍然有限,因而在实验中物参光的光程是一个必须考虑的问题. 由于光波在多模光纤和单模光纤中传播的轨迹不同,在实验中调整物光和参考光的光程差尽可能小仍然为记录全息干涉图的关键. 在多模光纤输出中的部分模式与单模光纤中的基模模式相干情况下,多模光纤中的其他输出模式则会影响到全息干涉图的记录,即在全息图记录面上形成背景噪声. 对于光学全息术,用原参考光或其共轭光照明再现时,背景噪声影响了

全息图光栅结构的衍射效率,结果导致再现像质量降低,而数字全息术可以通过对数值再现像进行相应的图像处理^[13,17,18],而明显改善再现像的质量,从而弥补实验器件及实际操作带来的噪声影响. 此外,记录全息图时,如果物光与参考光的偏振方向平行,效果最好. 光波经一般光纤传输后,偏振态变化为随机分布,相干性有所降低,若用于全息干涉图样显示,对干涉条纹的形成和清晰度没有任何影响^[19],但对于单幅全息图则会造成再现像的清晰程度下降,因此在拍摄全息图的过程中,为了能使数值再现像具有较好的效果,需要选择合适的光纤,如果采用单模保偏光纤同时传输物体照明光和参考光,则可以较好地解决光程差和偏振态的问题.

光纤的弯曲、应力状态、损耗^[20]及外界的震动等也都会对传输光产生影响,所以在测量过程中,在调整好的状态下,应适当把光纤固定,尤其是输出端的设置,通过改进光路设计,优化系统,光纤自身的影响可以降到很小,容易得到较为满意的实验结果.

本实验中采用单模光纤传输参考光,使输出光场有较好的均匀性,但为了提高照明物体表面反射光的亮度,采用芯径较大的多模光纤传输物体照明光,模斑场的影响虽然会使照明光场不均匀,但可被物体表面的漫反射平均掉,当然也可以在光纤的出射端外侧插入一块毛玻璃以提高照明光斑的均匀性. 此外,由于系统中物体信息成像于自聚焦透镜端面,所以选用多模光纤传输物体照明光所带来的模式干扰和偏振态去偏可以忽略,最终得到的数值再现像具有较高的信噪比.

3 结论

以上两组实验中均采用自聚焦透镜对物光复振幅进行了中继传输,从数值再现的全息像和全息干涉图样可以看出,无论是振幅分布还是相位变化,都能反映出原物场的信息和状态改变. 因此,利用数字全息术可同时实现形貌测量和形变分析,同时又具有无损、高灵敏度、高准确度、及测试范围宽等优点,将自聚焦透镜与光纤数字全息术相结合,利用光纤具有细小轻柔、抗电磁干扰、耐腐蚀等特点,并通过优化系统设计,降低光纤对全息图记录的影响,就可构成一种灵巧的数字全息测量系统,并可望用于各种复杂环境、强电磁干扰和强腐蚀性环境等,以及深入到一些封闭结构或一般测量手段难以进行直接测量的隐蔽区域里进行相关量的有效测量.

参考文献

- 1 Seebacher S, Osten W, Jüptner W. The determination of material parameters of microcomponents using digital holography. *Optics and Lasers in Engineering*, 2001, **36**

- (2):103~126
- 2 季光明,蒲政才.利用矩阵光学研究平凸自聚焦透镜的成像特性.重庆师范学院学报(自然科学版),1998,15(4):51~56
Ji G M, Pu Z C. *Journal of Chongqing Teachers College (Nature Science Edition)*, 1998, 15(4): 51~56
 - 3 谭久彬,张杰.自聚焦透镜在传感应用中的研究进展.光电子·激光,2001,12(9):984~911
Tan J B, Zhang J. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2001, 12(9): 984~911
 - 4 张杰,谭久彬.基于共焦原理的反射式自聚焦光纤传感技术研究.光子学报,2001,30(11):1361~1365
Zhang J, Tan J B. *Acta Photonica Sinica*, 2001, 30(11): 1361~1365
 - 5 黄伟同,俞本立,杨瀛海,等.使用自聚焦透镜测量小位移的新方法.光学学报,1996,16(6):816~821
Huang W T, Yun B L, Yang Y H, et al. *Acta Optica Sinica*, 1996, 16(6): 816~821
 - 6 Gangopadhyay T K, Henderson P J, Stokes A D. Vibration monitoring by using a dynamic proximity sensor with interferometric encoding. *Applied Optics*, 1997, 36(22): 5557~5561
 - 7 孙晓红,明海,白明,等.用斐索自聚焦光纤干涉仪测微区面形.中国激光,1999,26(10):907~911
Sun X H, Ming H, Bai M, et al. *Chinese Journal of Lasers*, 1999, 26(10): 907~911
 - 8 张杰,谭久彬.共焦自聚焦光纤传感器回波干扰抑制方法分析.光电子·激光,2002,13(2):114~116
Zhang J, Tan J B. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2002, 13(2): 114~116
 - 9 郑光昭.自聚焦透镜及其成像分析.广东机械学院院报,1995,13(1):5~14
Zheng G Z. *Journal of Guangdong Mechanical Institute*, 1995, 13(1): 5~14
 - 10 谭久彬,张杰.自聚焦透镜的三维相干成像特性分析.光学学报,2002,22(12):1484~1487
Tan J B, Zhang J. *Acta Optica Sinica*, 2002, 22(12): 1484~1487
 - 11 Hristoph Wagner, Sönke Seebacher, Wolfgang Osten, et al. Digital recording and numerical reconstruction of lensless Fourier holograms in optical metrology. *Applied Optics*, 1999, 38(22): 4812~4820
 - 12 Gustafsson M, Sebesta M, Bengtsson B, et al. High-resolution digital transmission microscopy—a Fourier holography. *Optics and Lasers in Engineering*, 2004, 41(3): 553~563
 - 13 徐莹,赵建林,向强,等.无透镜傅里叶变换全息图数值再现中的图像处理.光学学报,2004,24(11):1503~1506
Xu Y, Zhao J L, Xiang Q, et al. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(11): 1503~1506
 - 14 Sekanina H, Hledik S. Holographic interferometry using a digital photo-camera. *Acta Physica Slovaca*, 2001, 51(4): 261~270
 - 15 Schnars U, Jüptner W P O. Digital recording and reconstruction of holograms in hologram interferometry and shearography. *Applied Optics*, 1994, 33(20): 4373~4377
 - 16 William W, Macy Jr. Two-dimensional fringe-pattern analysis. *Applied Optics*, 1983, 22(23): 3898~3901
 - 17 刘诚,刘志刚,薄峰,等.数字全息再现像分离问题的研究.光子学报,2003,32(5):588~591
Liu C, Liu Z G, Bo F, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2003, 32(5): 588~591
 - 18 曾然,赵海发,刘树田.数字全息再现像中零级干扰噪声消除及图像增强研究.光子学报,2004,33(10):1229~1232
Zeng R, Zhao H V, Liu S T. *Acta Photonica Sinica*, 2004, 33(10): 1229~1232
 - 19 王国志.光纤全息散斑干涉计量.光子学报,1994,23(5):487~492
Wang G Z. *Acta Photonica Sinica* 1994, 23(5): 487~492
 - 20 宋宁,殷宗梅,葛文萍.光纤传输特性的理论计算.光子学报,2002,31(5):566~569
Song N, Yin Z M, Ge W P. *Acta Photonica Sinica*, 2002, 31(5): 566~569

Experimental Investigation of Digital Fiber Holography with Self-focusing Lens

Li Shiyang, Zhao Jianlin, Fan Qi, Song Xiaoshan

Institute of Optical Information Science and Technology, School of Science, Northwestern

Polytechnical University, Xi'an 710072

Received date: 2004-10-26

Abstract Applying self-focusing lens as a key device for optical sensor in fiber digital holographic system, one fiber carried the beam for illuminating the object and the others conveyed the reference beam to the CCD. The reflective wave scattered from the object surface was collected with a self-focusing lens to interfere with the reference beam on the CCD target. The lensless Fourier transform holograms thus formed were digitally recorded and the experimental results show that the reconstructed images and the interferogram can be evaluated for object deformation. It is shown that with the use of a self-focusing lens by its special imaginary property, the fiber system presented here can be used for measuring small areas of an object or objects difficult to access, while the whole setup is compact and more flexible.

Keywords Self-focusing lens; Fiber digital holography; Lensless Fourier transform hologram; Reconstructed image



Li Shiyang was born in 1978 and graduated from the Northwestern Polytechnical University (NPU) in 1999. Currently she is pursuing her Master's Degree in optical engineering at School of Science in NPU. Her major research interests focus on digital holography applied for precision measurement in micro-components.