

# 非相干同轴数字全息望远系统的研究

杨旭锋, 张文斌, 谢一琳, 张敏敏, 涂标, 杨学凯, 马凤英, 弓巧侠, 杜艳丽

郑州大学物理工程学院, 河南 郑州 450001

**摘要** 基于菲涅耳非相干相关全息光路的望远系统,可以在较远距离下,得到目标物体的数字全息图。基于菲涅耳衍射理论,计算了成像过程的点扩展函数(PSF),理论上分析了菲涅耳非相干数字全息望远系统的成像原理、系统的横向放大率以及再现过程中的重建距离;搭建了基于菲涅耳非相干相关同轴光路的数字全息望远系统,在白光照明的条件下,利用探测器(CCD)记录物体的全息图,使用相移法消除了同轴光路下的零级像和共轭像,通过角谱算法得到清晰的重建像。孔径光阑的引入,解决了照明不均匀的问题,提高了成像质量。从实验上验证了系统的分辨率、景深以及三维成像特性。结果表明,当望远系统角放大率为2.0倍、望远距离为900 mm时,分辨率可达到16.00 lp/mm。

**关键词** 全息; 非相干同轴数字全息; 望远系统; 菲涅耳非相干相关全息

**中图分类号** O438.1 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP54.120902

## Incoherent On-Axis Digital Holographic Telescope System

Yang Xufeng, Zhang Wenbin, Xie Yilin, Zhang Minmin, Tu Biao,

Yang Xuekai, Ma Fengying, Gong Qiaoxia, Du Yanli

College of Physic Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou, Henan 450001, China

**Abstract** The telescope system based on Fresnel incoherent correlation optical path can obtain the digital hologram of the object at a long distance. Based on Fresnel diffraction theory, the imaging process of the point spread function (PSF) is calculated. The imaging principle, the lateral magnification and the reconstruction distance of the system are deduced. A digital holographic telescope system based on the Fresnel incoherent correlation on-axis light path is constructed, and the CCD is used to receive the holograms under the white light. The conjugate image and the zero-order image are eliminated by phase-shifting, and then the clear reconstruction image is obtained by the angular spectrum reconstruction algorithm. By introducing aperture diaphragm, we solve the problem, and improve the imaging quality. The resolution, depth of field and three-dimensional (3D) imaging characteristics of the system are verified experimentally. The experiment shows that the resolution is 16.00 lp/mm when the angle magnification is 2.0 and the distance is 900 mm.

**Key words** holography; incoherent on-axis digital holography; telescope system; Fresnel incoherent correlation holography

**OCIS codes** 090.1995; 110.6770; 070.6120

## 1 引言

传统望远成像技术通过记录物体的强度信息,实现较远目标的二维记录。全息技术通过光束的干涉记录物体的强度和相位信息,可以实现对目标的三维记录。1961年,Mertz等<sup>[1]</sup>将非相干光源运用于全息术,降低了全息记录中对光源高度相干性的要求。1967年,Goodman等<sup>[2]</sup>将计算机技术运用于全息领域,使全

收稿日期: 2017-07-10; 收到修改稿日期: 2017-07-24

基金项目: 河南省高等学校重点科研项目(15A140038)

作者简介: 杨旭锋(1994—),男,硕士研究生,主要从事非相干全息方面的研究。E-mail: 21147904@qq.com

导师简介: 杜艳丽(1979—),女,博士,副教授,硕士生导师,主要从事数字全息、光电检测方面的研究。

E-mail: duyanli@zzu.edu.cn (通信联系人)

息图由干板记录转向数字记录,代替了传统全息中繁琐的记录和再现过程。1997年,Yamaguchi等<sup>[3]</sup>通过相移术,解决了同轴光路中零级像和共轭像的问题,提升了同轴全息光路的分辨率。2007年,Rosen等<sup>[4]</sup>基于空间光调制器(SLM),提出了菲涅耳非相干相关全息(FINCH)系统,使用准单色光源,通过在SLM上加加载掩模的方式,将其作为分光器件和相移器件,使同一束光分为两束焦距不同的光波,在CCD表面干涉,实现了物体的三维记录和再现。2010年,Barak等<sup>[5]</sup>基于FINCH系统,通过合成孔径技术提高了的系统分辨率,突破了瑞利衍射极限。2013年,Roy等<sup>[6-7]</sup>通过引入单次曝光的方法搭建了改进的FINCH光路,解决了同轴全息中孪生像的问题。国内的Lai等<sup>[8]</sup>对提高FINCH的信噪比以及边缘对比度进行了研究。李滢滢等<sup>[9]</sup>用低通滤波的方法,对FINCH的零级像进行滤除,通过两幅全息图消去共轭项,实现了非相干数字全息的两步相移重建。陈宝鑫等<sup>[10]</sup>对两步相移法进行了算法优化。2016年,Yuval等<sup>[11]</sup>通过改变光源的形式,提出结构光照明非相干数字全息方法,使非相干光源经过正弦光栅的调制投影在物体上,使得成像的频域信息得到扩展,获得了等效截止频率增大的效果,实现了非相干全息的超分辨重建。

近年来对非相干数字全息的研究多集中于显微领域。目前主要研究有反射式白光全息显微、荧光全息显微<sup>[12-14]</sup>等,相关技术在细胞观测以及粒子流微粒追踪等领域有着广泛应用。2013年,Myung等<sup>[15-16]</sup>利用迈克耳孙干涉仪分光的方法,搭建了自然光下的全彩色全息望远成像系统,该系统中迈克耳孙干涉仪上的一条光路经曲面反射镜反射至探测器的表面,与另一条光路的光束发生干涉,在其中一条光路中引入压电陶瓷相移器实现三步相移,完成较远目标的全息记录。目前基于迈克耳孙干涉仪的成像系统对光路的稳定性有着很高的要求,环境因素对信噪比有很大影响,而基于FINCH系统的全息望远光路对环境因素要求不高,结构稳定,简洁易操作,相移可精确控制<sup>[17]</sup>。

本文在FINCH望远光路基础上改进了开普勒数字全息望远系统,角分辨率增加至2倍,提高了系统的分辨率,增加了记录距离,测定了系统景深,同时验证了对远处物体全息成像的三维特性。系统光路简单易于操作,结构稳定,对于环境因素(实验台震动,气流扰动)要求不高。

## 2 实验系统及成像理论

### 2.1 实验系统

实验光路如图1所示。虚框内是开普勒望远系统,实框内是FINCH数字全息成像系统。被测物体上的任意点光源经过自由空间的传播到达物镜(objective),通过望远系统后,光束经光阑(aperture)限制宽度,以消除杂散光使光照更加均匀,之后经目镜(ocular)到达FINCH系统,经过中心波长为632.8 nm的滤波片F滤波以及偏振片P的调制,到达空间光调制器(SLM)表面,被加载于SLM上的相位掩模调制,分为两束焦距不同的光束并反射。通过分光棱镜(BS)反射之后在CCD表面干涉,形成该点光源的自干涉图样。物体上所有点源发出的光相互之间不相干,所有物点自相干图样的非相干叠加的结果形成望远系统所测得的整个物体的全息图。

### 2.2 成像理论

在实验光路中,记物距为 $S$ ,物镜与目镜的焦距分别为 $F_a$ 和 $F_b$ ,两者距离为焦距之和为 $F$ 。目镜到SLM的距离为 $d$ ,SLM反射出的两束光路传播至CCD的距离记为 $Z_h$ 。物体所在坐标系为 $x_0o_0y_0$ ,物镜与目镜所在坐标系分别为 $x_1o_1y_1$ 和 $x_2o_2y_2$ ,SLM坐标系为 $x_{SLM}o_{SLM}y_{SLM}$ ,CCD表面坐标系为 $xoy$ 。下面根据菲涅耳衍射公式<sup>[18]</sup>推导系统的点扩展函数,其中 $Q(b) = \exp[i\pi/\lambda(x^2 + y^2)]$ 。

设物体上有一任意无穷小点的坐标为 $(x_s, y_s)$ ,则根据衍射理论,该点发出的光经过该系统后到达CCD表面的复振幅分布可表示为

$$U(x, y) = Q\left(\frac{1}{S}\right)Q\left(-\frac{1}{F_a}\right) * Q\left(\frac{1}{F_a + F_b}\right)Q\left(-\frac{1}{F_b}\right) * Q\left(\frac{1}{d}\right)R(x_{SLM}, y_{SLM}) * Q\left(\frac{1}{Z_h}\right) = \\ \left\{ \frac{i\pi}{\lambda S} [(x_1 - x_s)^2 + (y_1 - y_s)^2] \right\} \times \exp\left[-\frac{i\pi}{\lambda F_a} (x_1^2 + y_1^2)\right] * \exp\left\{\frac{i\pi}{\lambda F} [(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2]\right\} \times \\ \exp\left[-\frac{i\pi}{\lambda F_b} (x_2^2 + y_2^2)\right] * \exp\left\{\frac{i\pi}{\lambda d} [(x_{SLM} - x_2)^2 + (y_{SLM} - y_2)^2]\right\} \times R(x_{SLM}, y_{SLM}) *$$

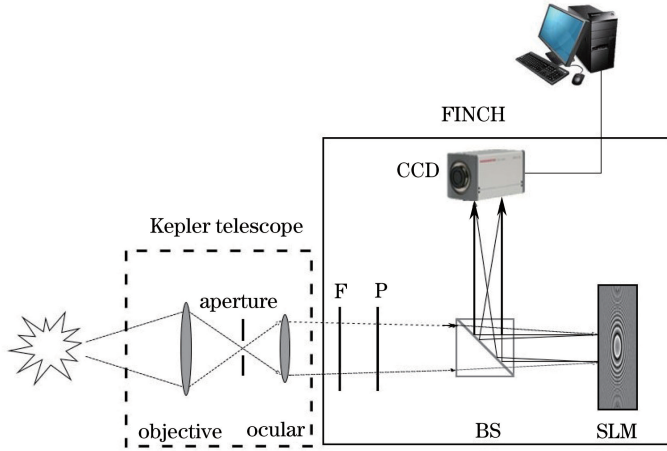


图1 非相干同轴数字全息望远系统原理图

Fig. 1 Schematic of incoherent on-axis digital holographic telescope system

$$\exp\left\{\frac{i\pi}{\lambda Z_h} [(x - x_{SLM})^2 + (y - y_{SLM})^2]\right\}, \quad (1)$$

式中“ $*$ ”表示二维卷积。 $R(x_{SLM}, y_{SLM})$ 为SLM上加载的双透镜掩模方程<sup>[19]</sup>,其具体表达形式为

$$R(x_{SLM}, y_{SLM}) = \frac{1}{2} \exp(i\theta) Q\left(-\frac{1}{F_{d1}}\right) + \frac{1}{2} Q\left(-\frac{1}{F_{d2}}\right), \quad (2)$$

掩模方程中的两个不同焦距用 $F_{d1}$ 和 $F_{d2}$ 表示, $\theta$ 为三步相移技术<sup>[20]</sup>引入的相位。则该点源经系统后在CCD记录面上的强度分布即点扩展函数为

$$I_p(x, y; x_s, y_s, z_s) = |U(x, y)|^2 = A \left\{ C + \exp\left\{\frac{i\pi}{\lambda z_r} [(x - Mx_s)^2 + (y - My_s)^2] + i\theta\right\} + \exp\left\{-\frac{i\pi}{\lambda z_r} [(x - Mx_s)^2 + (y - My_s)^2] - i\theta\right\} \right\}, \quad (3)$$

式中 $A, C$ 为常数;横向放大率 $M = -Z_h / [dFSL(S^{-1} - F_a^{-1} + F^{-1})]$ ;再现距离 $z_r = (F_1 F_2 Z_h^2) / (F_{d1}^{-1} - F_{d2}^{-1})$ ,其中 $F_1 = 1/d - 1/F_{d1} - 1/(d^2 L) + 1/Z_h$ , $F_2 = 1/d - 1/F_{d2} - 1/(d^2 L) + 1/Z_h$ , $L = \left[ \frac{1}{d} - \frac{1}{F_b} + \frac{1}{F} - \left[ F^2 \left( -\frac{1}{F_a} + \frac{1}{F} + \frac{1}{S} \right) \right]^{-1} \right]$ 。

对于整个物体,设表面强度分布 $g(x_s, y_s, z_s)$ ,则CCD记录的物体全息图为所有物点强度点扩展函数的非相干叠加,即

$$G(x, y) = g(x_s, y_s, z_s) * I_p(x, y) = \iiint g(x_s, y_s, z_s) dx_s dy_s dz_s + \iiint g(x_s, y_s, z_s) \exp\left\{\frac{i\pi}{\lambda z_r} [(x - Mx_s)^2 + (y - My_s)^2] + i\theta\right\} dx_s dy_s dz_s + \iiint g(x_s, y_s, z_s) \exp\left\{-\frac{i\pi}{\lambda z_r} [(x - Mx_s)^2 + (y - My_s)^2] - i\theta\right\} dx_s dy_s dz_s. \quad (4)$$

由(4)式可以看到,同轴全息光路中会产生零级像和共轭像,对重建结果有较大影响,因此采用三步相移技术消除零级像和共轭像。对 $\theta$ 取 $0^\circ, 120^\circ, 240^\circ$  3个相位,分别记为 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 。将 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$  3个相位的全息图 $G_1(x, y), G_2(x, y), G_3(x, y)$ 按照(5)式进行叠加计算,从而消除多余项对再现过程的影响。

$$G(x, y) = G_1(x, y) [\exp(-i\theta_3) - \exp(-i\theta_2)] + G_2(x, y) [\exp(-i\theta_1) - \exp(-i\theta_3)] + G_3(x, y) [\exp(-i\theta_2) - \exp(-i\theta_1)]. \quad (5)$$

随后,在计算机中对叠加后的全息图按照角谱衍射<sup>[21]</sup>的方法进行数值重建,可得到重建后的物体再现像 $S(x, y, z_r)$ 为

$$S(x, y, z_r) = \mathcal{F}^{-1} \left\{ \mathcal{F}[G(x, y)] \times \exp[ikz_r \sqrt{1 - \lambda^2 (f_x^2 + f_y^2)}] \right\}, \quad (6)$$

式中 $\mathcal{F}$ 为傅里叶变换过程, $\mathcal{F}^{-1}$ 为傅里叶逆变换; $f_x, f_y$ 分别代表和 $x, y$ 对应的频域坐标。

### 3 实验结果及分析

在实验光路中,使用非相干白光氙灯(CEL-TCX250,250 W)作为照明光源。开普勒望远系统使用焦距为 250 mm 和 125 mm 的透镜分别作为物镜和目镜,两透镜相距 375 mm;望远系统角放大率为 2,孔径光阑开孔半径为 5 mm。目镜后方 160 mm 处为 FINCH 系统的 SLM (德国 Holoeye,PLUTO-VIS),SLM 到 BS 与 BS 到 CCD(日本 Hamamatsu,C8484-05G2,分辨率为  $1366 \times 1024$ ,单个像素大小为  $6.4 \mu\text{m}$ ,实验使用分辨率为  $350 \times 350$ )的距离之和为 250 mm。偏振片方向为  $90^\circ$ ,与 SLM 调制敏感方向适配<sup>[22]</sup>,滤波片中心波长为 632.8 nm。在物镜前方 900 mm 处放置被观测物体并记录其全息图。

首先在 SLM 上加载双透镜掩模,掩模类似菲涅耳波带片的形式,包含 2 个不同焦距  $F_{d1}$  和  $F_{d2}$  的相位调制模式, $F_{d1}$  和  $F_{d2}$  分别为 245 mm 和 255 mm。取  $120^\circ$  为相移量,加载的 3 张不同相位的掩模如图 2 所示。

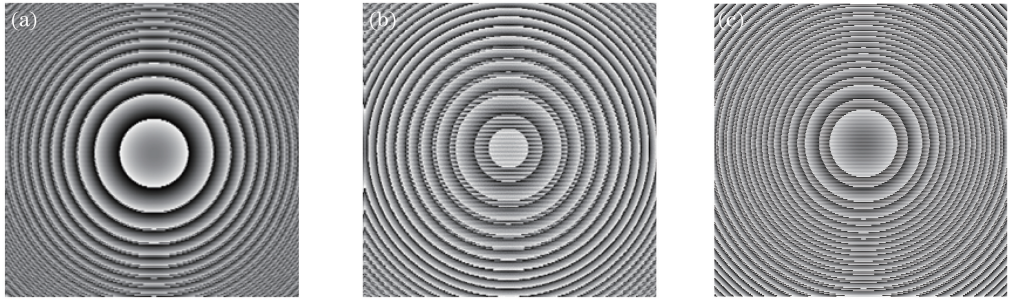


图 2 空间光调制器上加载的双透镜相位掩模示意图。(a)  $0^\circ$ ;(b)  $120^\circ$ ;(c)  $240^\circ$

Fig. 2 Phase masks of double lenses loaded on the spatial light modulator. (a)  $0^\circ$ ; (b)  $120^\circ$ ; (c)  $240^\circ$

在系统物镜前方 900 mm 处,放置美国空军标准(USAF)分辨率板,图 3 为实验结果。从重建结果可以看到的的最小单元是第 4 组的第 1 线对,该望远系统的空间分辨率可达 16.00 lp/mm。

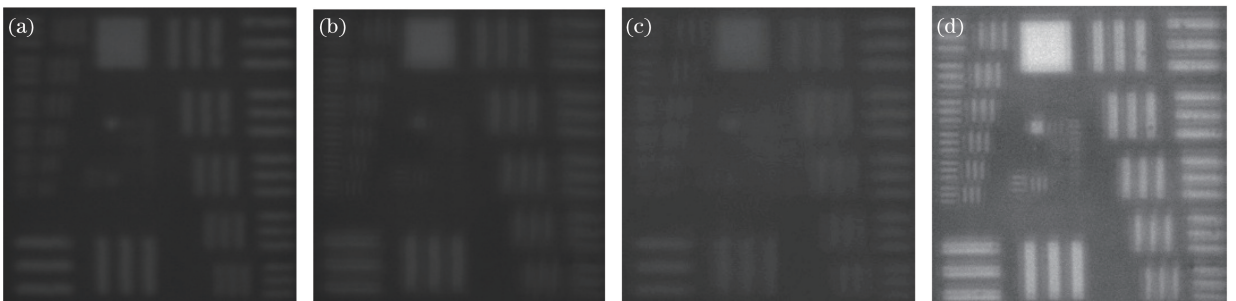


图 3 分辨率板的全息图与数值重建像。(a)  $0^\circ$ 相位全息图;(b)  $120^\circ$ 相位全息图;(c)  $240^\circ$ 相位全息图;(d)重建结果

Fig. 3 Hologram and reconstructed image of USAF. (a)  $0^\circ$  phase hologram; (b)  $120^\circ$  phase hologram; (c)  $240^\circ$  phase hologram; (d) reconstruction image

景深是成像系统的一项重要参数,数字全息成像系统中,景深是指单次记录能够清晰重建物场的纵向深度。由光路计算可知,光学系统的景深可表示为

$$\Delta = \Delta_1 + \Delta_2 = \frac{S^2 \epsilon}{2r - S\epsilon} - \frac{S^2 \epsilon}{2r + S\epsilon} = \frac{4rS^2 \epsilon}{4r^2 - S^2 \epsilon^2}, \quad (7)$$

式中  $S$  为物距, $r$  为通光孔径半径, $\epsilon$  为景深判据分辨角。在本系统中,取人眼的极限分辨角  $1'$  为  $\epsilon$  的值。 $S$  和  $r$  分别为 900 mm 和 5 mm,可得远景深  $\Delta_1$  和近景深  $\Delta_2$  分别为 24.1195 mm 和 22.8925 mm,则景深  $\Delta$  为 47.012 mm。

图 4 是分辨率板位于对准平面前后不同位置在同一像平面记录的最佳再现像。右上方曲线是蓝色虚框中第 4 组第 1 线对的纵向灰度分布。

图 4 中位于景深近点(a)和远点(b)时,由灰度图可以看到在允许判据内第 4 组第 1 线对均能清晰再现,而当超过景深范围 3 mm 时,图(c)和图(d)中分辨率有了明显降低,表明了上述分析的正确性。

为了验证该全息望远系统的三维成像特性,使用前后纵深 10 mm 的两枚硬币进行实验,图 5 为实验结果。



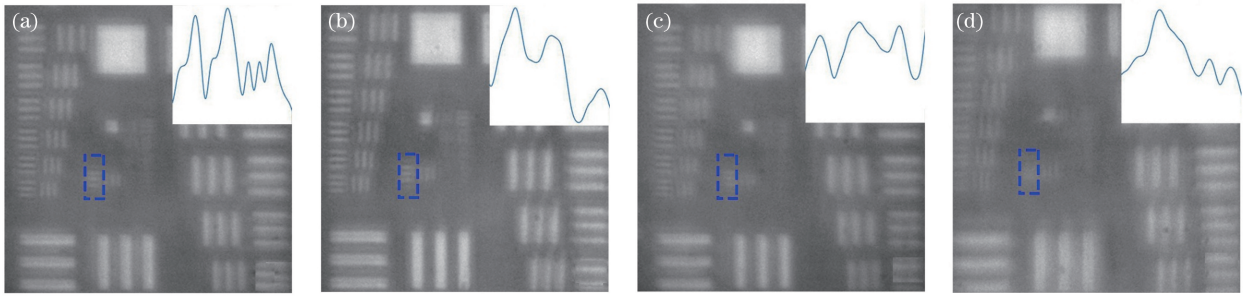


图4 分辨率板不同位置的最佳再现像。(a) 924 mm 物距;(b) 877 mm 物距;(c) 927 mm 物距;(d) 874 mm 物距  
Fig. 4 Optimum reconstruction image of the USAF at different locations. (a) Distance is 924 mm;  
(b) distance is 877 mm; (c) distance is 927 mm; (d) distance is 874 mm

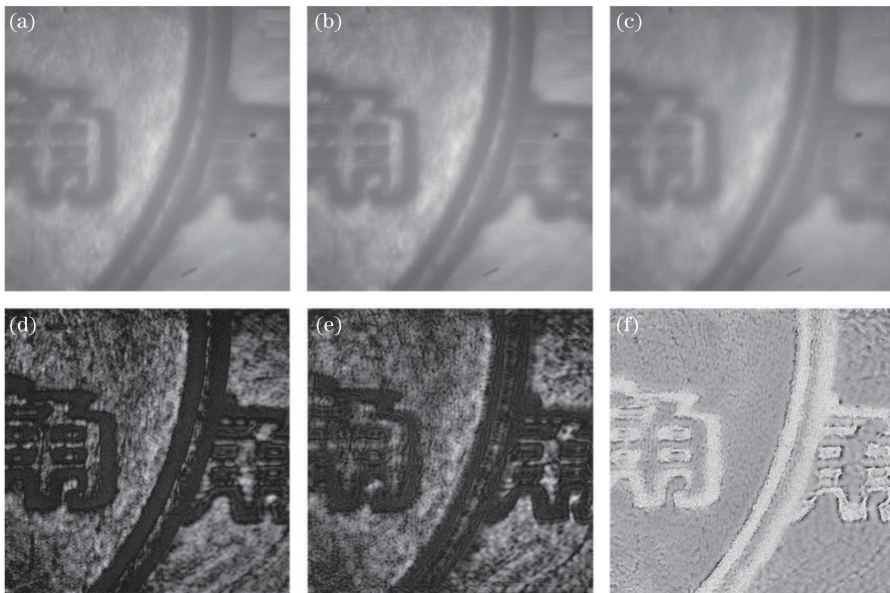


图5 硬币的全息图及在不同焦平面的再现像。(a)、(b)、(c)硬币的全息图;  
(d)上面硬币最佳焦平面的再现像;(e)下面硬币最佳焦平面的再现像;(f)相位分布图  
Fig. 5 Reconstructed images of coins' holograms in the different distances. (a), (b), (c) Hologram of coin;  
(d) reconstruction image when the upper coin is at the best focus plane; (e) reconstruction image  
when the below coin is at the best focus plane; (f) phase image

在图5中可以看到当(d)的再现距离为1.0 mm,上面硬币在最佳焦平面再现时,下面硬币不清晰;当(e)的再现距离为20.0 mm,下面硬币在最佳焦平面再现时,上面硬币不清晰。对同一张全息图的不同焦平面进行聚焦重建,可以分别再现出不同平面上清晰的像,验证了该全息望远系统的三维成像特性,可以实现较远真实物体的较高分辨率全息拍摄与重建。

## 4 结 论

基于前置开普勒望远系统的 FINCH 数字全息成像系统可以获得非相干光照明下物体的全息图。本文利用菲涅耳衍射理论分析了该望远成像系统的点扩展函数,研究全息图的记录及再现原理,搭建了实验光路并拍摄物体全息图,并数值再现出物体信息。引入可变光阑调节光束宽度,提高成像质量。通过分辨率板实验验证了该成像系统的可行性,提高了系统的分辨率,分辨率高达 16.00 lp/mm;通过理论计算和实验验证可得系统具有一定景深。通过对不同深度的物体成像,验证了系统具有三维成像特性。该系统结构简洁易搭建,稳定性好,分辨率高,对光源相干性及环境因素要求较低。只需改变前置望远系统结构即可实现更远距离物体的记录,为室外全息望远成像的发展奠定了基础,未来可应用于军事、遥感、天文等领域。

## 参 考 文 献

- [1] Mertz L, Young N O. Fresnel transformations of images[C]. London: Optical Instruments and Techniques, 1961: 305-310.
- [2] Goodman J W, Lawrence R W. Digital image formation from electronically detected holograms[J]. Applied Physics Letters, 1967, 11(3): 77-79.
- [3] Yamaguchi I, Zhang T. Phase-shifting digital holography[J]. Optics Letters, 1997, 22(16): 1268-1270.
- [4] Rosen J, Brooker G. Digital spatially incoherent Fresnel holography[J]. Optics Letters, 2007, 32(8): 912-914.
- [5] Barak K, Rosen J. Super-resolution in incoherent optical imaging using synthetic aperture with Fresnel elements[J]. Optics Express, 2010, 18(2): 962-972.
- [6] Roy K, Rosen J. New method for recording digital holograms[C]. SPIE, 2013, 39(4): 569-672.
- [7] Roy K, Rosen J. Enhanced resolution in Fourier incoherent single channel holography(FISCH) with reduced optical path difference[J]. Optics Express, 2013, 21(17): 20131.
- [8] Lai X M, Zhao Y, Lü X H, *et al.* Fluorescence holography with improved signal-to-noise ratio by near image plane recording[J]. Optics Letters, 2012, 37(13): 2445-2447.
- [9] Li Yingying, Qin Wan, Gao Zhi, *et al.* Two step phase-shifting based incoherent digital holographic microscopy[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(4): 040901.  
李滢滢, 秦琬, 高志, 等. 基于两步相移的非相干数字全息显微技术[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(4): 040901.
- [10] Chen Baoxin, Tian Yongzhi, Zhao Nannan, *et al.* Optimization of two-step phase-shifting digital hologram algorithm and experimental verification[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(8): 080903.  
陈宝鑫, 田勇志, 赵楠楠, 等. 两步相移数字全息算法的优化及实验验证[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(8): 080903.
- [11] Yuval K. Enhanced super resolution using Fresnel incoherent correlation holography with structured illumination[J]. Optics Letters, 2016, 41(7): 1558-1561.
- [12] Rosen J, Brooker G. Fresnel incoherent correlation holography (FINCH): A review of research[J]. Advanced Optical Technologies, 2012, 1(3): 151-169.
- [13] Rosen J, Brooker G. Non-scanning motionless fluorescence three-dimensional holographic microscopy[J]. Nature Photonics, 2008, 2(3): 190-195.
- [14] Rosen J, Siegel N, Brooker G. Theoretical and experimental demonstration of resolution beyond the Rayleigh limit by FINCH fluorescence microscopic imaging[J]. Optics Express, 2011, 19(27): 26249-26268.
- [15] Myung K. Incoherent digital holographic adaptive optics[J]. Applied Optics, 2013, 52(1): A117-A130.
- [16] Myung K. Full color natural light holographic camera[J]. Optic Express, 2013, 21(8): 185997.
- [17] Zhao Nannan. Research of imaging characteristic of the SLM-based incoherent telescopic digital holography[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2015: 22-26.  
赵楠楠. 基于 SLM 的非相干望远数字全息成像特性的研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2015: 22-26.
- [18] Su Xianyu. Information optics[M]. Beijing: Science Press, 1999.  
苏显渝. 信息光学[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [19] Katz B, Rosen J, Roy K. Enhanced resolution and throughput of Fresnel incoherent correlation holography (FINCH) using dual diffractive lenses on a spatial (SLM)[J]. Optics Express, 2012, 20(8): 9109-9121.
- [20] Li Junchang, Fan Zebin, Peng Zujie. Application research on the zoom system of digital holography[J]. Acta Photonica Sinica, 2008, 37(7): 1420-1424.  
李俊昌, 樊则宾, 彭祖杰. 数字全息变焦系统的研究及应用[J]. 光子学报, 2008, 37(7): 1420-1424.
- [21] Li Junchang, Song Qinghe, Picart P, *et al.* Discussion of wavefront reconstruction of off-axis digital holography[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(2): 0209008.  
李俊昌, 宋庆和, Picart Pascal, 等. 离轴数字全息波前重建算法讨论[J]. 中国激光, 2014, 41(2): 0209008.
- [22] Du Yanli, Ma Fengying, Gong Qiaoxia, *et al.* Optical microscopic imaging technology based on spacial light modulator [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(2): 020002.  
杜艳丽, 马凤英, 弓巧侠, 等. 基于空间光调制器的光学显微成像技术[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(2): 020002.