

非相干光照明数字全息实验研究

石 侠 朱五凤 袁 斌 杜艳丽 弓巧侠 郭茂田 梁二军 马凤英

郑州大学物理工程学院, 河南 郑州 450001

摘要 搭建了基于空间光调制器的非相干光照明全息记录系统,建立了系统的波动数学模型,获得了系统的点扩展函数、横向放大率以及再现距离的具体表达式。实验给出了分辨率板的相移数字全息图和重建像,然后对两个非荧光骰子进行全息拍摄,在不同平面实现了数字聚焦。给出了该系统下的彩色全息实验结果。结果表明这种非相干光照明全息系统可以快速获取三维物体的全息图,再现时结合相移算法可以得到无零级像和共轭像的高质量重建像。

关键词 全息; 非相干全息; 相移数字全息; 点扩展函数; 空间光调制器

中图分类号 O438

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.1209003

Experimental Study of the Incoherent Digital Holography

Shi Xia Zhu Wufeng Yuan Bin Du Yanli Gong Qiaoxia Guo Maotian

Liang Erjun Ma Fengying

School of Physical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou, Henan 450001, China

Abstract A holographic recording system is built under incoherent light illumination based on a spatial light modulator and the mathematical model of the system has been established, then we get the specific forms of the point spread function, the axial magnification and the reconstruction distance. The experiments give the three phase-shift holograms and its reconstruction of a negative test slide. Then the holograms of two non-fluorescent dice are captured and digital reconstructed in different planes. The color holographic results are also given. The results show that the system can obtain holograms of real objects simply and rapidly. And we can get a clearly reconstruction without the zero-order and twin image by using the phase-shift algorithm.

Key words holography; incoherent holography; phase-shift digital holography; point spread function; spatial light modulator

OCIS codes 090.1995; 070.2025; 210.4770; 110.6880; 330.1690

1 引 言

光全息术^[1]的目的在于记录完整的物光场信息,实现空间三维成像。相干光源照明时,不仅要求系统具备极高的稳定性,还会引入严重的相干噪声,限制了全息术在许多领域的应用。Mertz等^[2]首先将全息技术推广到了非相干领域,Lohmann等^[3-4]结合光的波动本质发展了非相干全息术的理论,其基本思想是非相干光源照明下的物体表面可看作无数空间非相干点源的集合,每个点发出的球面波经某种分光系统分成两束相干光,干涉图案为点源全息图,所有点源全息图的非相干叠加形成物体的全息图。基于迈克耳孙干涉仪分光法、马赫-曾德尔干涉仪分光法、三角干涉光路分光法等的非相干全息技术均得到了一定程度的发展。近年来,随着计算机、高分辨率CCD和空间光调制器(SLM)的发展,数字全息术受到越来越多的关注^[5-7],同时非相干光源照明的数字全息也展现了其独特的魅力。Kim等^[8-9]研究了非相干三角全息中的分辨率、相移误差补偿等问题。Kim^[10]利用迈克耳孙干涉仪,实现了自然光照明下物体的全息记录与数字再现。万玉红等^[11]总结了非相干光全息的成像特性和研究进展,提出了基于三角干涉光路的非相干离轴傅里叶彩色数字全息术

收稿日期: 2015-05-11; 收到修改稿日期: 2015-06-24

基金项目: 国家自然科学基金(61307019、11504333)、河南省教育厅重点项目(14A140003、15A140038)

作者简介: 石 侠(1990—),男,硕士研究生,主要从事非相干全息方面的研究。E-mail: shixiahero@163.com

导师简介: 马凤英(1975—),女,博士,副教授,主要从事非相干数字全息成像方面的研究。

E-mail: mafy@zzu.edu.cn(通信联系人)

(IFTCH)^[12]。利用空间光调制器分光的菲涅耳非相干相关数字全息术(FINCH)由 Rosen 等^[13]于 2007 年提出,空间光调制器同时作为系统的分光元件和移相元件,将来自于物体表面的光分成传播方向相同但曲率半径不同的两束光,在 CCD 表面实现干涉记录;拍摄三张不同相移的全息图,在计算机中进行数值处理并模拟菲涅耳衍射实现物光场的三维再现。Bouchal 等^[14-15]研究了 FINCH 系统的点扩展函数和分辨率,改进实验光路增大两束光干涉的面积,提高了系统的分辨率。刘英臣等^[16]对 FINCH 技术的记录以及再现过程进行了理论分析和实验验证。目前 FINCH 系统广泛应用于 3D 荧光物体的多色全息成像^[17]、3D 显微成像^[18-20]和基于菲涅耳元件的合成孔径系统^[21-22]。本文搭建了非相干照明下的全息记录系统,从波动光学的理论出发,给出了系统的数学模型,得到了系统的点扩展函数(PSF)、横向放大率和再现距离的具体表达式;在 SLM 上加载双透镜模式的相位掩模^[23],对分辨率板进行全息记录和再现,实验验证了系统的基本成像特性;然后对两个非荧光骰子进行三维全息拍摄,结合相移算法^[24]消除了零级像和共轭像,实现了物光场不同平面处的清晰再现,并给出了该系统对非荧光骰子的彩色全息成像结果。

2 非相干光照明全息记录与再现原理

图 1 所示系统为非相干光照明下的全息记录系统原理示意图,纯相位反射式 SLM 作为系统的分光元件和移相元件,加载波长为 λ 的两个焦距分别为 f_{d1} 和 f_{d2} 的透镜相位掩模,其复振幅反射系数为

$$R(x, y) = B \exp(i\theta) Q\left(-\frac{1}{f_{d1}}\right) + B' Q\left(-\frac{1}{f_{d2}}\right), \quad (1)$$

定义 $Q(b) = \exp[i\pi b \lambda^{-1}(x^2 + y^2)]$, λ 为工作波长, θ 为附加相移常数, B 和 B' 为两个实常数,制作的 $\theta = 0^\circ$ 时的相位掩模如图 2 所示。

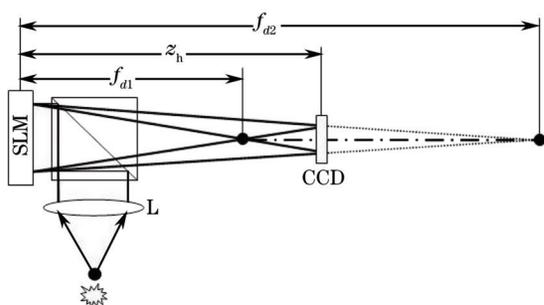


图 1 典型的非相干光照明全息记录系统

Fig.1 Schematic diagram of typical incoherent digital holography recorder

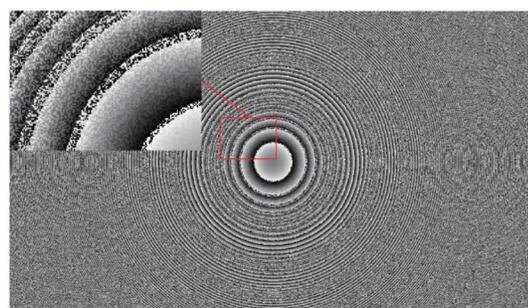


图 2 空间光调制器上加载相位常数为 0° 的相位掩模(左上图为圈中区域的部分放大)

Fig.2 Phase mask of the SLM with the phase factor equals zero (partial magnified views displayed in the top left)

透镜 L(焦距 f_0)与 SLM 的距离记为 d ,其焦平面附近任意一点 $(x_s, y_s, -z_s)$ 可以看作一个理想的点光源,根据波动光学理论可以计算出 CCD 表面的强度分布,即为系统的强度点扩展函数^[23]。其表达式为

$$I_{\text{psf}}(x, y; x_s, y_s, z_s) = C + C_1 \exp\left\{\frac{i\pi}{\lambda z_r} \left[(x - M_T x_s)^2 + (y - M_T y_s)^2 \right] + i\theta\right\} + \text{c.c.}, \quad (2)$$

式中 $C = B^2 + B'^2$, $C_1 = BB'$, c.c. 为等号右侧第二项的复共轭, $f_c = \frac{z_s f_0}{f_0 - z_s}$, $f_{1,2} = \frac{f_{d1,2}(f_c + d)}{f_{d1,2} - (f_c + d)}$, $M_T = -\frac{z_h f_c}{z_s(f_c + d)}$

为系统的横向放大率,再现距离为

$$z_r = \frac{(f_1 + z_h)(f_2 + z_h)}{f_2 - f_1}. \quad (3)$$

若三维物体表面的反射强度分布为 $g(x_s, y_s, z_s)$,则 CCD 上记录的干涉图案为三维物体表面所有点源全息图的非相干叠加,即

$$H(x, y) = C \iiint g(x_s, y_s, z_s) dx_s dy_s dz_s + C_1 \iiint g(x_s, y_s, z_s) \exp\left\{\frac{i\pi}{\lambda z_r} \left[(x - M_T x_s)^2 + (y - M_T y_s)^2 \right] + i\theta\right\} dx_s dy_s dz_s + \text{c.c.}, \quad (4)$$

式中等号右侧第一项代表的是零级像,第二项和第三项代表物体原始像和共轭像信息。

该系统是同轴全息记录系统,要实现三维物体的真实再现,提高像的反衬度和分辨率,需消除零级像和共轭像的影响。结合三步相移技术,调节记录全息图时SLM上附加的相位常数 θ ,曝光3次,得到三张全息图。全息再现时,将3次记录的全息图进行叠加计算得到一个复值全息 $H_F(x,y)$:

$$H_F(x,y) = H_1(x,y)[\exp(\pm i\theta_3) - \exp(\pm i\theta_2)] + H_2(x,y)[\exp(\pm i\theta_1) - \exp(\pm i\theta_3)] + H_3(x,y)[\exp(\pm i\theta_2) - \exp(\pm i\theta_1)] = C_2 \iiint g(x_s, y_s, z_s) \exp\left\{\frac{\mp i\pi}{\lambda z_r} [(x - M_T x_s)^2 + (y - M_T y_s)^2]\right\} dx_s dy_s dz_s. \quad (5)$$

然后在计算机中模拟衍射过程进行数字再现,使用的再现算法为角谱衍射算法^[25],再现图像取样间隔与CCD的采样间隔相同,再现图像大小不随再现距离的变化而变化。最终得到消除零级像和共轭像的清晰再现:

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

式中 $k = 2\pi/\lambda$, F 和 F^{-1} 分别表示正逆傅里叶变换, f_x 和 f_y 为与 x,y 对应的频域坐标。

3 实 验

搭建图3所示的非相干光照明反射式全息记录实验系统,其中光源为白光连续光谱光源(CEL-TCX250, 250 W),光纤输出,光斑半径约为1 cm,BS为分束器,BF为窄带滤光片(中心波长632.8 nm,带宽20 nm),P为偏振片(偏振方向与空间光调制器的液晶长轴方向一致), $L_2(f=250\text{ mm})$ 为准直透镜。在空间光调制器SLM(Holoeye Pluto, 1920 pixel×1080 pixel)上随机选择一半像素加载焦距为 f_{d1} 的透镜相位,另一半加载焦距为 f_{d2} 的透镜相位^[14],如图2所示。CCD(Hamamatsu Digital Camera C8484-05, 1344 pixel×1024 pixel)的像素大小为 $6.45\ \mu\text{m}$,为便于后续处理,拍摄时使用了 1024×1024 个像素点。物体到透镜 $L_1(f=60\text{ mm})$ 的距离为180 mm, L_1 到 L_2 的距离为340 mm, L_2 到SLM 的距离为150 mm,SLM和CCD之间的距离为 z_h ,具体的数值需要与SLM上加载的透镜焦距大小相匹配^[14],以获得最佳的干涉效果。

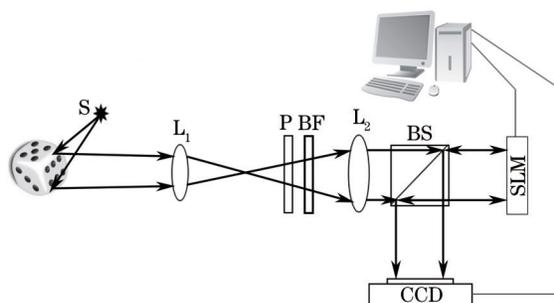


图3 非相干数字全息实验光路

Fig.3 Experimental set-up of incoherent digital holography

3.1 分辨率板的全息记录与重构

用USAF1951分辨率板作为测试物体,采用图3所示的光路设置,取 $f_{d1} = 245\text{ mm}$, $f_{d2} = 255\text{ mm}$, $z_h = 250\text{ mm}$ 。拍摄的不同相移的三张全息图如图4(a)~(c)所示,相位常数 θ 分别为 $0^\circ, 120^\circ, 240^\circ$,采用(5)、(6)式的再现原理进行全息重构,得到的最佳焦平面重建像如图4(d)所示。系统的横向放大率约为1.14,分辨率可达40 lp/mm,重建

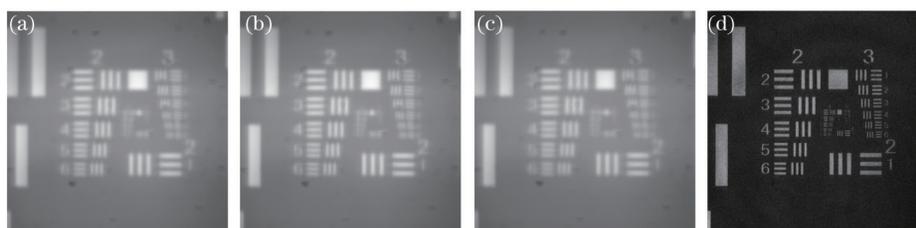


图4 分辨率板的相移全息图(a) $\theta = 0^\circ$, (b) $\theta = 120^\circ$, (c) $\theta = 240^\circ$, (d)重建像

Fig.4 Phase-shift holograms with (a) $\theta = 0^\circ$, (b) $\theta = 120^\circ$, (c) $\theta = 240^\circ$, (d) the reconstructed image

像噪声较小,图像质量高。结果表明该系统在非相干光照明下可以快速获取物体的全息图,结合相移算法可以得到高质量的重建像。

3.2 两个骰子的全息记录与重构

为验证系统的三维成像特性,用两个真实的非荧光骰子作为记录物体。单个骰子的大小为 $5\text{ mm} \times 5\text{ mm} \times 5\text{ mm}$,两个骰子相距 5 mm ,作为对照,对骰子直接成像如图5(a)所示。然后在非相干光照明下进行全息记录,采用图3所示的光路设置,取 $f_{d1} = 245\text{ mm}$, $f_{d2} = 255\text{ mm}$, $z_h = 250\text{ mm}$ 。其中图5(b)为CCD记录的其中一张相位常数为 0° 的全息图;改变相位常数($120^\circ, 240^\circ$)得到三张全息图后进行数字再现;图5(c)为前面骰子最佳焦平面重建像,图5(d)为后面骰子最佳焦平面重建像。

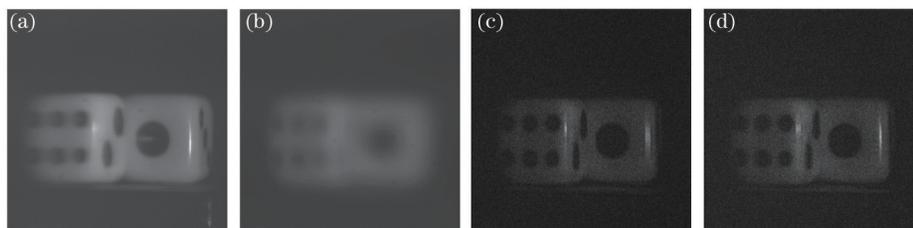


图5 实验结果。(a) 骰子的像;(b) 记录的 θ 为 0° 时的全息图;(c) 前面骰子最佳焦平面的重建像;(d) 后面骰子最佳焦平面的重建像

Fig.5 Experimental results. (a) Image of the dices; (b) one of the recorded holograms with the phase factor equals zero and (c) the reconstructed image with the first dice focused; (d) the reconstructed image with the second dice focused

结果表明在计算机中对全息图进行数字再现,能够实现对物光场任意平面的数字聚焦,该系统可以实现真实三维物体的非相干全息拍摄与重构。

3.3 骰子的彩色全息记录与重构

基于颜色的RGB模型,三通道的中心波长分别为 $480, 550, 640\text{ nm}$ 。采用图3所示的光路设置,取 $f_{d1} = 470\text{ mm}$, $f_{d2} = 523\text{ mm}$, $z_h = 495\text{ mm}$ 。每个通道拍摄三张全息图,分别进行数字再现,然后融合得到最终彩色重建像。图6(a)~(c)分别为三色通道最佳焦平面重建像。图6(d)为三色合成后的彩色重建像。

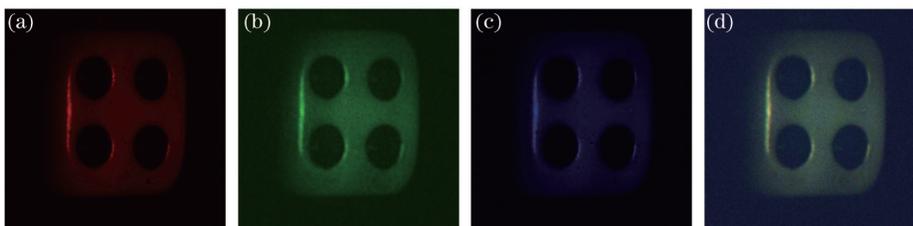


图6 实验结果。(a) R通道;(b) G通道;(c) B通道最佳重建像;(d) 三色合成结果

Fig.6 Experimental results. (a) R channel; (b) G channel; (c) B channel's best focused reconstructed image;(d) synthetic results

从图6可以看到,三色通道均能实现全息图的拍摄与重构。由于SLM本身的色散,三个通道只有一个通道满足最佳干涉条件,彩色合成结果中骰子白色部分有一定的偏差,背景也有一定的噪声,但是基本上还原了原始物体的颜色信息。结果表明该系统可以通过不同波长下的多次曝光获取真实彩色物体的全息图,数字处理后可以还原物体的空间结构和颜色。

4 结 论

非相干光照明数字全息通过单通道同轴非相干干涉仪实现记录过程,无需对物体在空间或时间上进行扫描,可以快速获取真实三维物体的全息图,结合相移算法可以实现对真实物体的全息记录与高质量再现。不同滤光片多次曝光可获得物体的彩色全息记录与再现。系统采用非相干光做光源,可以考虑与多/超光谱成像技术结合,获得物体的四维信息(包括空间三维信息和光谱维信息),在遥感、探测、军事、天文、艺术、材料分析等领域有潜在的应用价值。

参 考 文 献

- 1 D Gabor. A new microscopic principle[J]. Nature, 1948, 161(4098): 777-778.

- 2 L Mertz, N O Young. Fresnel transformations of images[C]. *Optical Instruments and Techniques*, 1961: 305–310.
- 3 A W Lohmann. Wavefront reconstruction for incoherent object[J]. *J Opt Soc Am*, 1965, 55(11): 1555–1556.
- 4 G Cochran. New method of making Fresnel transforms with incoherent light[J]. *J Opt Soc Am*, 1966, 56(11): 1513–1517.
- 5 L Xu, X Peng, Z Guo, *et al.*. Imaging analysis of digital holography[J]. *Opt Express*, 2005, 13(7): 2444–2452.
- 6 G Pedrini, H Li, A Faridian, *et al.*. Digital holography of self-luminous objects by using a Mach-Zehnder setup[J]. *Opt Lett*, 2012, 37(4): 713–715.
- 7 Wolfgang Osten, Ahmad Faridian, Peng Gao, *et al.*. Recent advances in digital holography[J]. *Appl Opt*, 2014, 53(27): G44–G63.
- 8 S G Kim, B Lee, E S Kim, *et al.*. Resolution analysis of incoherent triangular holography[J]. *Appl Opt*, 2001, 40(26): 4672–4678.
- 9 S G Kim, J Ryeom. Phase error analysis of incoherent triangular holography[J]. *Appl Opt*, 2009, 48(34): H231–H237.
- 10 M K Kim. Full color natural light holographic camera[J]. *Opt Express*, 2013, 21(8): 9636–9642.
- 11 Wan Yuhong, Man Tianlong, Tao Shiquan. Imaging characteristics and research progress of incoherent holography[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(2): 0209004.
王玉红, 满天龙, 陶世荃. 非相干全息术成像特性及研究进展[J]. *中国激光*, 2014, 41(2): 0209004.
- 12 Yuhong Wan, Tianlong Man, Dayong Wang. Incoherent off-axis Fourier triangular color holography[J]. *Opt Express*, 2014, 22(7): 8565–8673.
- 13 J Rosen, G Brooker. Digital spatially incoherent Fresnel holography[J]. *Opt Lett*, 2007, 32(8): 912–914.
- 14 P Bouchal, Josef Kapitan, Radim Chmelik. Point spread function and two-point resolution in Fresnel incoherent correlation holography [J]. *Opt Express*, 2011, 19(16): 15603–15620.
- 15 P Bouchal, Z Bouchal. Wide-field common-path incoherent correlation microscopy with a perfect overlapping of interfering beams [J]. *Journal of the European Optical Society–Rapid*, 2013, 8: 13011.
- 16 Liu Yingchen, Fan Jinping, Zeng Fanchuang, *et al.*. Recording, reconstruction and realization of white-light Fresnel incoherent digital holography [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(10): 1009002.
刘英臣, 范金坪, 曾凡创, 等. 白光菲涅耳非相干数字全息图的记录、再现及实现[J]. *中国激光*, 2013, 40(10): 1009002.
- 17 J Rosen, G Brooker. Fluorescence incoherent color holography[J]. *Opt Express*, 2005, 15(5): 2244–2250.
- 18 G Brooker, N Siegel, V Wang, *et al.*. Optimal resolution in Fresnel incoherent correlation holographic fluorescence microscopy[J]. *Opt Express*, 2011, 19(6): 5047–5062.
- 19 Joseph Rosen, Gary Brooker. Non-scanning motionless fluorescence three-dimensional holographic microscopy[J]. *Nature Photon*, 2008, 2(3): 190–195.
- 20 Wan Qin, Xiaoqi Yang, Yingying Li, *et al.*. Two-step phase-shifting fluorescence incoherent holographic microscopy[J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2014, 19(6): 060503.
- 21 B Katz, J Rosen. Could SAFE concept be applied for designing a new synthetic aperture telescope[J]. *Opt Express*, 2011, 19(6): 4924–4936.
- 22 Yuval Kashter, Joseph Rosen. Enhanced-resolution using modified configuration of Fresnel incoherent holographic recorder with synthetic aperture[J]. *Opt Express*, 2014, 20(17): 20551–20565.
- 23 B Katz, J Rosen, R Kelner, *et al.*. Enhanced resolution and throughput of Fresnel incoherent correlation holography (FINCH) using dual diffractive lenses on a spatial light modulator (SLM)[J]. *Opt Express*, 2012, 20(8): 9109–9121.
- 24 I Yamaguchi, T Zhang. Phase-shifting digital holography[J]. *Opt Lett*, 1997, 22(16): 1268–1269.
- 25 Li Junchang, Song Qinghe, Picart Pascal, *et al.*. Discussion of wavefront reconstruction algorithm 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.

栏目编辑: 何卓铭