

文章编号 2097-1842(2025)04-0771-13

基于液晶空间光调制器的全息再现像设计

雷俊阁, 孙国斌*, 张 锦, 蒋世磊, 胡 驰
(西安工业大学 光电工程学院, 陕西 西安 710021)

摘要: 本文根据计算全息再现成像原理, 采用 Gerchberg-Saxton (GS) 算法对输入与输出平面光场分布进行正、逆傅立叶变换迭代求解, 得到原始仿真图像在不同特征参数(线宽、圆环直径)和不同计算采样间隔下的相位分布, 并仿真计算得到相应的再现图像。利用液晶空间光调制器搭建全息再现实验光路, 通过加载不同原始仿真图像的相位分布图进行再现实验, 采用相机拍摄得到远场衍射全息再现图像并进行图像处理得到再现图像的实际特征尺寸。实验结果表明: 再现图像特征尺寸与原始仿真图像特征尺寸基本呈线性变化关系, 再现图像尺寸与仿真计算采样间隔呈现非线性变化关系, 且与理论推导的关系曲线一致。为了进一步验证结论的正确性, 设计预期再现图像尺寸, 当圆环直径为 0.943 mm, 中心十字线宽为 0.015 mm 时, 仿真计算得到预期目标原始仿真图像的特征尺寸和采样间隔分别为线宽 3 pixel、圆环直径 594 pixel、采样间隔 25 μm 。通过再现实验测量得到的全息再现图像圆环直径为 0.93 mm, 线宽为 0.017 mm, 误差精度在 0.02 mm 以内。本文研究结果对全息显示、AR/VR 显示等应用场景下提高虚拟显示图像尺寸真实性提供了有益参考。

关键词: 计算全息; 傅里叶变换; Gerchberg-Saxton 算法; 采样间隔; 液晶空间光调制器

中图分类号: O438.1 文献标志码: A doi: 10.37188/CO.2024-0224 CSTR: 32171.14.CO.2024-0224

Design of holographic reproduction images based on liquid crystal spatial light modulator

LEI Jun-ge, SUN Guo-bin*, ZHANG Jin, JIANG Shi-lei, HU Chi

(School of Opto-electronical Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

* Corresponding author, E-mail: 83680337@qq.com

Abstract: Based on the principle of computer-generated holograms reproduction imaging, this paper used the Gerchberg-Saxton (GS) algorithm to iteratively solve the phase distribution of the original simulation images under different characteristic parameters (line width, ring diameter) and different calculated sampling intervals by performing direct and inverse Fourier transforms on the optical field distributions of the input and output planes, and the corresponding reproduced images were obtained by simulation calculation. The optical path of the holographic reproduction experiment was constructed by using the liquid crystal spatial light modulator, and the reproduction experiment was carried out by loading the phase distribution maps of different original simulation images, the holographic reproduction images of far-field diffraction were taken by the camera, and the actual feature size of the reproduced images was obtained by image processing. The experi-

收稿日期: 2024-12-11; 修订日期: 2025-01-22

基金项目: 陕西省科技厅自然科学基金基础研究计划项目 (No. 2024JC-YBMS-269)

Supported by Natural Science Foundation of Shaanxi Science and Technology Department (No. 2024JC-YBMS-269)

mental results show that the feature size of the reproduced images is basically linear with the characteristic size of the original simulation images. Furthermore, the reproduction image size shows a non-linear change relationship with the sampling intervals of the simulation calculation, which is consistent with the derived theoretical calculation relationship curve. In order to further verify the correctness of the conclusion, when the size of the expected reproduced image is designed as the ring diameter of 0.943 mm and the line width of the central cross of 0.015 mm. The characteristic size and sampling interval of the original simulation image of the expected target are obtained by the simulation calculation as the line width of 3 pixel, the ring diameter of 594 pixel and the sampling interval of 25 μm , respectively. The ring diameter and line width of the holographic reproduction image, as measured by the reproduction experiment, are 0.93 mm and 0.017 mm, respectively. The error accuracy is within 0.02 mm. The findings of this study provide an effective reference for application scenarios such as holographic display and AR/VR display to improve the authenticity of virtual display image size.

Key words: computer-generated holography; Fourier transform; Gerchberg-Saxton algorithm; sampling intervals; liquid crystal spatial light modulator

1 引言

随着计算机技术的迅猛发展,全息技术经历了光学全息、数字全息和计算全息三个时代^[1-3],对计算精度的要求越来越高。微纳光学器件加工技术的进步促使计算全息元件的设计加工精度更高,衍射效率也更高,同时,许多计算全息图的求解和优化算法应运而生,进一步提高了全息图的计算速度和精度^[4-9]。在很多领域,计算全息元件已逐步代替光学全息元件,其中相位型全息元件以其可复制加工、重量轻、精度高、化学性能稳定、衍射效率高等优势被广泛应用。

近几年,光学调制器件技术日趋成熟,液晶空间光调制器(Liquid Crystal Spatial Light Modulator, LC-SLM)因具有分辨率高、衍射效率高的优势,广泛应用于全息显示与测量、激光加工、光通讯、生物医学等领域。其原理是通过给每个像素单元施加电压,从而改变液晶分子长轴的偏转角度,控制液晶分子得到想要的双折射率,从而调制入射光波的相位,使计算全息图再现^[10]。国外,美国麻省理工学院的 researcher 利用声光调制器设计了第一代全息三维显示系统^[11];日本研究者采用三台 RGB 激光器实现了彩色全息三维显示^[12];Buske P 提出将 SLM 视作衍射神经网络补偿了 SLM 的“0 级衍射”效应^[13];Minikhanov T Z 等人

提出了采用 LC-SLM 精确动态操控空间相干光场,对二元相位计算全息图和二元聚焦相位衍射光学元件进行了实验^[14]。国内,中国科学院西安光学精密机械研究所的姚保利等人基于 GS(Gerchberg-Saxton)算法提出了计算三维结构全息图的新方法,采用纯相位 SLM 重建了原物体,降低了计算量且保证了重建图像质量^[15];Zhu W X 等人通过将改进的离轴干涉全息的编码方法与光学叠加相结合的方法产生了多个矢量光束^[16];北京邮电大学的肖瑞提出了一种大景深双目视 AR 的显示方法^[17];Xu K 等对 LC-SLM 光场控制算法进行了综述^[18];郑州轻工业大学的马宁涛提出了将多个大尺寸子计算全息图加载到多个 SLMs 上的大视场全息显示方法^[19];王化宾提出了基于 SLM 和改进 GS 算法的全息双面光刻方法^[20];Chen Q 等采用深度学习的方法在 LC 中进行反相调制,实现了更精细、更精确的相位调制分布^[21]。

由计算全息技术仿真设计得到的全息元件在全息显示领域中的应用已经十分成熟,但计算全息元件在人眼视觉特征符合程度和成像尺寸真实性方面仍然有所欠缺,而且虽然目前全息元件在理论上实现了远场衍射成像,实际应用中该技术很难实现。本文针对以上问题,设计了全息图,并根据计算全息原理,采用 GS 算法对原始仿真图像的相位分布进行设计仿真,基于 LC-SLM 对设计仿真的相位型计算全息图进行了再现实验研

究。通过改变原始图像特征尺寸和采样间隔控制再现图像的特征尺寸, 优化原始图像特征尺寸和仿真采样间隔得到了预期目标远场衍射再现图像, 即更加符合人眼视觉特征和全息显示图像尺寸真实性更高的再现图像。

2 理论分析

全息技术包括波前记录和波前再现两个步骤。波前记录, 即物光波与参考光波的干涉过程, 记录物光波的相位和振幅信息, 波前再现即衍射过程, 再现物光波的复振幅信息。本文根据离轴全息记录和再现原理设计仿真计算全息图。如图1所示^[22]。

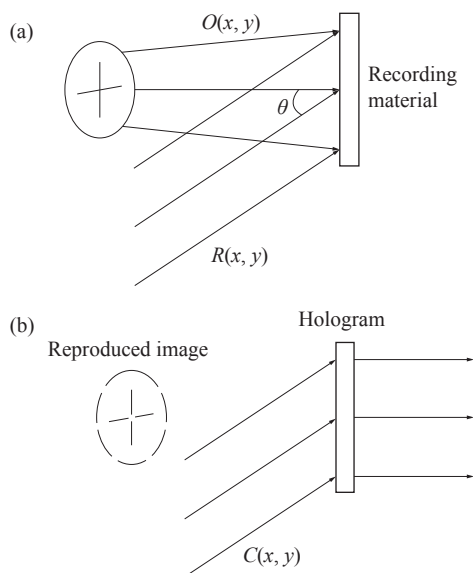


图1 (a) 全息记录与 (b) 全息再现示意图

Fig. 1 Schematic diagram of (a) holographic recording and (b) holographic reproduction

记录时, 物光波 $O(x,y)$ 与参考光波 $R(x,y)$ 在记录材料处发生干涉并产生干涉条纹, 即全息图。将物光波与参考光波分别表示为:

$$O(x,y) = A(x,y)\exp[i\varphi(x,y)] \quad (1)$$

$$R(x,y) = R\exp[i2\pi\alpha y] \quad (2)$$

其中, $A(x,y)$ 和 $\varphi(x,y)$ 分别为物光波的振幅和相位, R 为参考光波的振幅, $\alpha = \sin\theta/\lambda$, 为参考光波的空间频率, 参考光波的最小倾角为 $\theta_{\min} = \arcsin(3B\lambda)$, B 为物体的频谱带宽。此时, 材料上的光场分布为物光波与参考光波的叠加:

$$u(x,y) = O(x,y) + R(x,y) \quad (3)$$

其强度分布为:

$$\begin{aligned} I(x,y) &= |u(x,y)|^2 = |R(x,y)|^2 + |O(x,y)|^2 + \\ &R^*(x,y) \cdot O(x,y) + R(x,y) \cdot O^*(x,y) = \\ &R^2 + A^2(x,y) + R\exp[-i2\pi\alpha y]O(x,y) + \\ &R\exp[i2\pi\alpha y]O^*(x,y) \quad (4) \end{aligned}$$

则全息图透过率:

$$\begin{aligned} t(x,y) &= t_0 + \beta' I(x,y) = \\ &t_b + \beta' \{A^2(x,y) + 2RA(x,y)\cos[2\pi\alpha y - \varphi(x,y)]\} \quad (5) \end{aligned}$$

其中, $t_b = t_0 + \beta'R^2$, 为均匀偏置透过率, β' 为曝光时间和 $t-E$ 曲线直线部分斜率之积。

再现时, 以一束与参考光波完全相同的再现光波 $C(x,y)$ 照射全息图, 再现光波经过全息图后由人眼在右侧接收再现图像。离轴全息再现原理如图2所示。

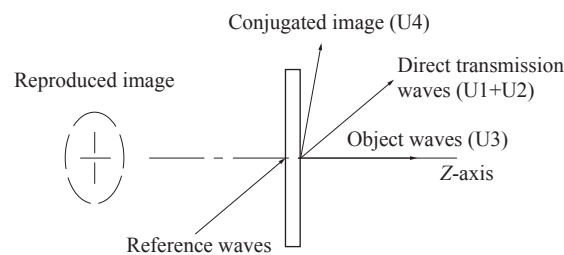


图2 离轴全息再现原理图

Fig. 2 Principle diagram of off-axis holographic reproduction

假设再现光波与参考光波完全相同, 则经过衍射元件后的衍射光波为:

$$\begin{aligned} U(x,y) &= R(x,y)t(x,y) = \\ &R\{t_b + \beta' [O \cdot O^* + R^* \cdot O + R \cdot O^*]\} = \\ &t_b R + \beta' R A^2(x,y) + \beta' R^2 \exp[-i2\pi\alpha y]O(x,y) + \\ &\beta' R^2 \exp[i2\pi\alpha y]O^*(x,y) = U_1 + U_2 + U_3 + U_4 \quad (6) \end{aligned}$$

式中, U_1 和 U_2 项为直透光, U_3 项表示一级衍射再现像的物光波, 即人眼在后方观察到的虚像, U_4 项表示 U_3 项的共轭, 此时共轭像与再现图像完全分离。

计算全息是利用计算机技术模拟光学全息原理, 通过算法设计仿真计算全息图, 利用软件将设计的计算全息图加载到调制器件上, 参考光波经调制后即可再现原始图像。相位型计算全息图保留和编码目标物体的相位信息, 再现图像无

共轭像干扰,具有较高的衍射效率,理论上可达 100%^[23]。相位型计算全息图以 0~255 的灰度范围记录物体的相位,将相位量化编码后经过光刻、纳米压印等技术使其表面产生微纳米级别的浮雕结构,刻蚀厚度根据量化台阶的高度和透过率改变^[24]。相位型全息图以高衍射效率、高精度、高抗干扰能力和高寿命广泛应用于车载抬头显、虚拟现实交互等领域。

3 仿真计算

相位型计算全息图的设计仿真即对全息图平面内光场分布的相位信息进行计算,可由 GS 算法实现。图 3 为 GS 算法原理图,图中: P1 为输入平面,是相位型计算全息图平面; P2 为输出平面,是目标图像所在平面。GS 算法的原理是在输入与输出平面之间作正、逆傅立叶 (Fourier) 变换,对频域和空域信息分别设置约束条件,经过多次循环迭代后得到最优解。迭代完成后输入平面内的相位信息为全息图的相位分布。GS 算法具有收敛速度快、精度高等特点,广泛应用于衍射光学元件的仿真计算。

仿真再现图像的质量由均方根误差 (root-mean-square error, RMSE) 分析和评价,其表达式为:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N [G(i) - G_0(i)]^2}{N}}, \quad (7)$$

式中, $G(i)$ 为再现图像的振幅, $G_0(i)$ 为目标图像的振幅, N 为图像的像素数。RMSE 值越接近 0, 仿真再现图像越接近目标图像,再现图像质量越好。

仿真时,已知入射光波的复振幅分布 $g_0(x,y)$ 和 P2 平面内目标图像的振幅 $|B_0(\xi,\zeta)|$, 求解 P1 平面内全息图的相位 $\varphi(x,y)$ 。算法流程如图 4 所示,根据流程框图计算相位型计算全息图并输出仿真再现图像。设入射光波的振幅分布为 $A_0(x,y)$, 从 P2 平面出发,目标图像的振幅与给定随机相位因子矩阵 $\exp[i\varphi(\xi,\zeta)]$ 相乘并作逆傅立叶变换得到 P1 平面内光场的复振幅分布 $g(x,y)$ 。对 $g(x,y)$ 施加约束条件并多次迭代使再现图像振幅与目标图像振幅保持一致。迭代完成后物波函数的相位即相位型计算全息图,对频谱函数 $G(\xi,\zeta)$ 取振幅并归一化得到仿真再现图像。

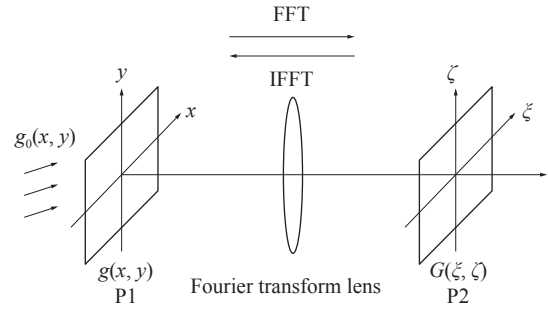


图 3 GS 算法原理图

Fig. 3 Principle diagram of GS algorithm

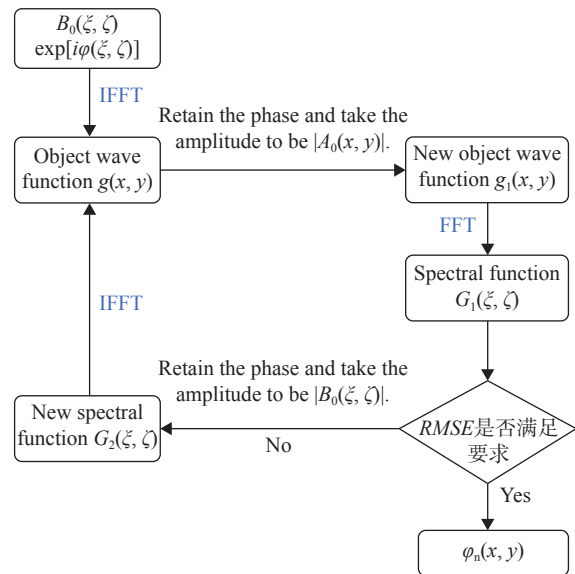


图 4 GS 算法流程框图

Fig. 4 Flowchart of GS algorithm

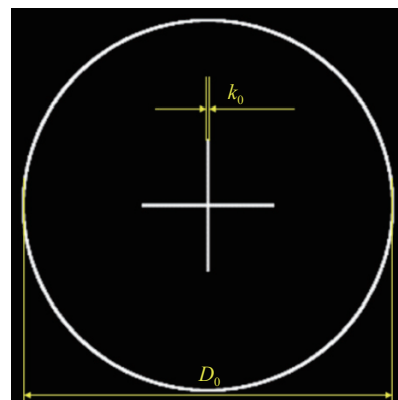


图 5 原始仿真图像

Fig. 5 Original simulation image

图 5 为原始仿真图像,对图 5 作如下定义:

(1) 原始仿真图像中“圆环”和“十字”在整个原始图像中所占像素线宽为 k_0 (pixel), CCD 接收的再现图像中线宽尺寸为 k (mm)。

(2) 原始仿真图像中“圆环”外径在整个图像中所占像素定义为原始仿真图像的圆环直径 D_0 。

(pixel), CCD 接收的再现图像“圆环”外径定义为再现图像的圆环直径 D (mm)。

(3) LC-SLM 的最小像元尺寸为 $12.5 \mu\text{m}$, 在计算全息图时, 原始仿真图像的最小仿真计算采样间隔为 d (μm), 设采样系数为 N ($N=1, 2, 4, 8$), 使原始仿真图像的分辨率为 $(768/N) \times (768/N)$, 当 $N=1$ 时, $d=N \times 12.5=12.5 \mu\text{m}$ 。

根据以上定义, 采用控制变量法计算得到不同线宽、圆环直径以及不同采样间隔下原始仿真图像的相位分布和仿真再现图像。

3.1 改变原始仿真图像的线宽

原始图像分辨率为 768×768 , 控制图像的圆环直径为 700 pixel, 采样间隔为 $12.5 \mu\text{m}$, 改变原始图像的线宽。当线宽 k_0 分别为 5 pixel、10 pixel、15 pixel、20 pixel 时的原始仿真图像如图 6 所示。图 7 为根据 GS 算法求解得到的不同线宽下原始图像的相位分布, 图 8 为仿真再现图像。

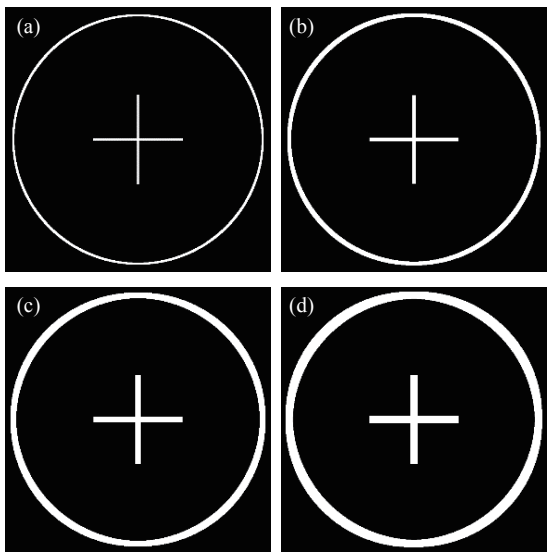


图 6 不同线宽的原始图像。(a) $k_0=5$; (b) $k_0=10$; (c) $k_0=15$; (d) $k_0=20$
 Fig. 6 Original images with different line widths. (a) $k_0=5$; (b) $k_0=10$; (c) $k_0=15$; (d) $k_0=20$

对图 8 所示仿真再现图像做二值化并进行阈值分割得到其线宽的像素数, 如表 1 所示。可见, 当原始图像线宽分别为 5 pixel、10 pixel、15 pixel 和 20 pixel 时, 仿真再现图像线宽分别为 5 pixel、10 pixel、15 pixel 和 20 pixel, 因此, 当采样间隔和圆环直径都不变时, 仿真再现图像线宽随着原始图像线宽 1:1 变化。

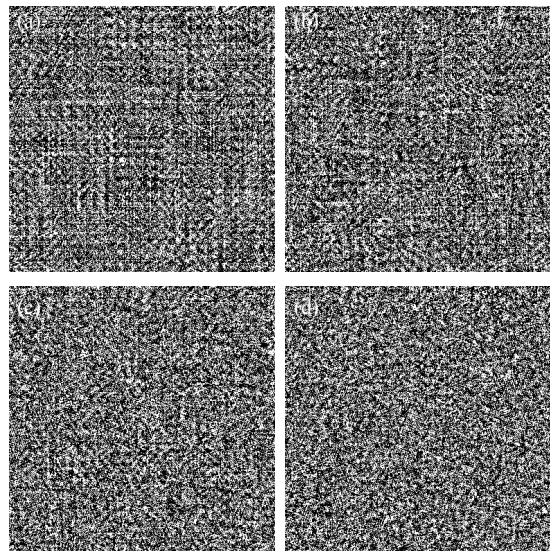


图 7 不同线宽下原始图像的相位分布。(a) $k_0=5$; (b) $k_0=10$; (c) $k_0=15$; (d) $k_0=20$
 Fig. 7 Phase distributions of original image with different line widths. (a) $k_0=5$; (b) $k_0=10$; (c) $k_0=15$; (d) $k_0=20$

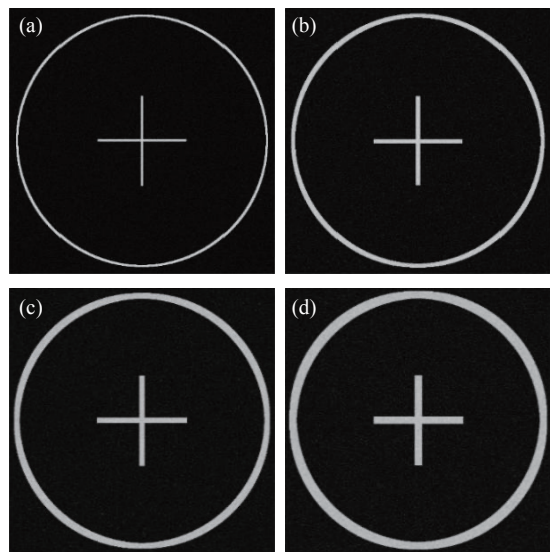


图 8 不同线宽的仿真再现图像。(a) $k_0=5$; (b) $k_0=10$; (c) $k_0=15$; (d) $k_0=20$
 Fig. 8 Simulation reproduction images with different line widths. (a) $k_0=5$; (b) $k_0=10$; (c) $k_0=15$; (d) $k_0=20$

表 1 不同原始图像线宽对应的仿真再现图像线宽值
Tab. 1 Line widths of simulated reproduction images corresponding to line widths of different original images

Line width of the original images k_0 (pixel)	Line width of the simulated reproduction images (pixel)	Fitting slope
5	5	1
10	10	
15	15	
20	20	

3.2 改变原始仿真图像的圆环直径

原始图像分辨率为 768×768 , 控制图像的线宽为 5 pixel, 采样间隔为 $12.5 \mu\text{m}$, 改变原始图像的圆环直径。图 9 展示了圆环直径 D_0 分别为 400 pixel、500 pixel、600 pixel、700 pixel 时的原始仿真图像。图 10 为原始图像在不同圆环直径下的相位分布, 图 11 为不同圆环直径的仿真再现图像。

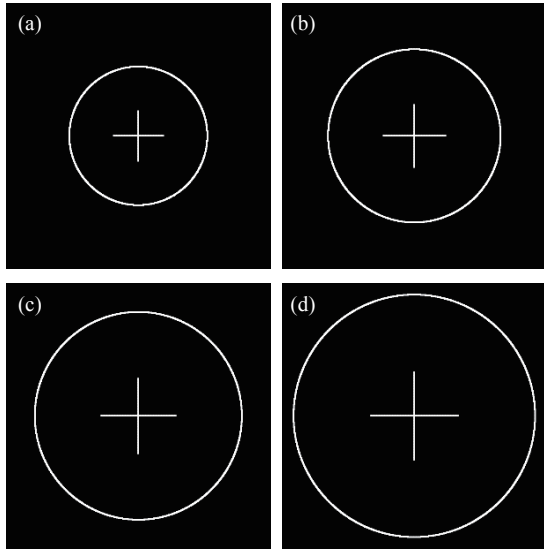


图 9 不同圆环直径的原始图像。(a) $D_0=400$ pixel; (b) $D_0=500$ pixel; (c) $D_0=600$ pixel; (d) $D_0=700$ pixel

Fig. 9 Original images with different ring diameters. (a) $D_0=400$ pixel; (b) $D_0=500$ pixel; (c) $D_0=600$ pixel; (d) $D_0=700$ pixel

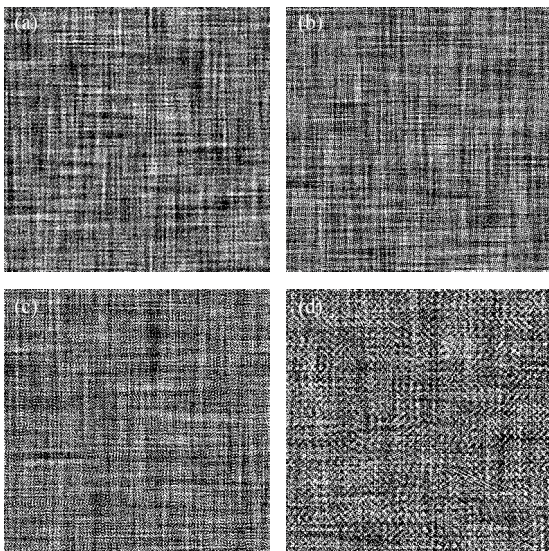


图 10 不同圆环直径下原始图像的相位分布。(a) $D_0=400$ pixel; (b) $D_0=500$ pixel; (c) $D_0=600$ pixel; (d) $D_0=700$ pixel

Fig. 10 Phase distributions of original image with different ring diameters. (a) $D_0=400$ pixel; (b) $D_0=500$ pixel; (c) $D_0=600$ pixel; (d) $D_0=700$ pixel

对图 11 所示仿真再现图像做二值化并进行阈值分割, 得到其圆环直径的像素数, 如表 2 所示。可见, 当原始图像圆环直径分别为 400 pixel、500 pixel、600 pixel 和 700 pixel 时, 仿真再现图像圆环直径分别为 400 pixel、500 pixel、600 pixel 和 700 pixel。因此, 当采样间隔和线宽都不变时, 仿真再现图像的圆环直径随着原始图像的圆环直径 1:1 变化。

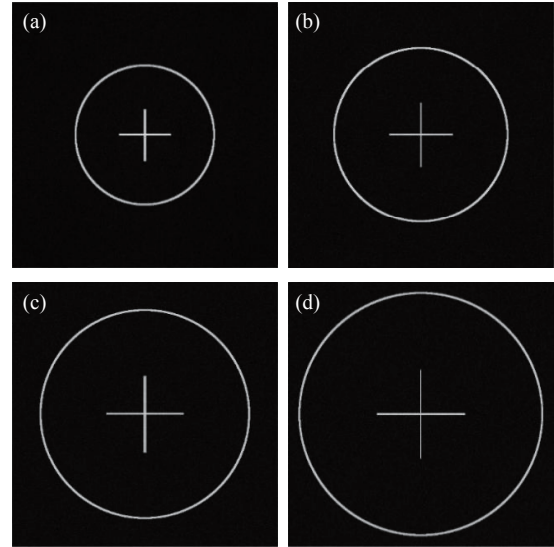


图 11 不同圆环直径的仿真再现图像。(a) $D_0=400$ pixel; (b) $D_0=500$ pixel; (c) $D_0=600$ pixel; (d) $D_0=700$ pixel

Fig. 11 Simulated reproduction images with different ring diameters. (a) $D_0=400$ pixel; (b) $D_0=500$ pixel; (c) $D_0=600$ pixel; (d) $D_0=700$ pixel

表 2 不同原始图像圆环直径对应的仿真再现图像圆环直径

Tab. 2 Simulated reproduction image ring diameters corresponding to different original image ring diameters

Ring diameter of the original images D_0 (pixel)	Ring diameter in simulated reproduction images (pixel)	Fitting slope
400	400	
500	500	
600	600	1
700	700	

3.3 改变原始仿真图像的仿真计算采样间隔

原始图像分辨率为 768×768 , 固定图像的线宽为 5 pixel、圆环直径为 700 pixel, 改变原始图像的采样间隔。采样系数 N 分别取 1、2、4、8, 则对应采样间隔 d 分别为 $12.5 \mu\text{m}$ 、 $25 \mu\text{m}$ 、 $50 \mu\text{m}$ 、 $100 \mu\text{m}$ 。图 12 为不同采样间隔下原始图像的相位分布, 图 13 为不同采样间隔的仿真再现图像。

对图 13 所示仿真再现图像做二值化并进行

阈值分割得到其圆环直径的像素数, 如表 3 所示。可见, 在原始图像圆环直径为 700 pixel 的情况下, 当采样间隔分别为 12.5 μm 、25 μm 、50 μm 和 100 μm 时, 仿真再现图像的圆环直径分别为 700 pixel、350 pixel、175 pixel 和 87 pixel。因此, 当线宽和圆环直径都不变时, 仿真再现图像圆环直径随着采样间隔而变化, 仿真再现图像的圆环直径为原始图像圆环直径的 $1/N$ 倍。

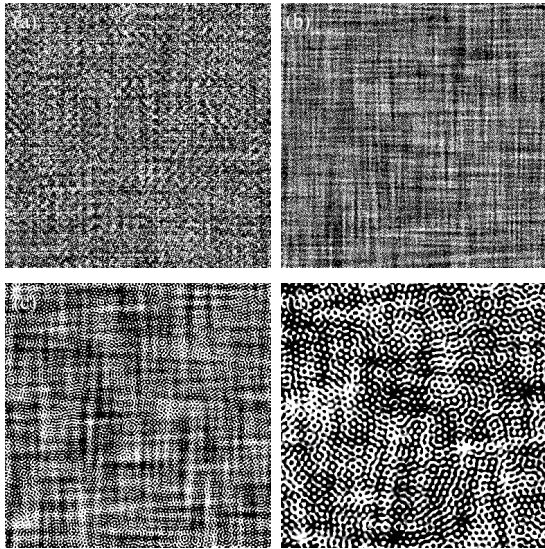


图 12 不同采样间隔下原始图像的相位分布。(a) $N=1$; (b) $N=2$; (c) $N=4$; (d) $N=8$

Fig. 12 Phase distributions of original image with different sampling intervals. (a) $N=1$; (b) $N=2$; (c) $N=4$; (d) $N=8$

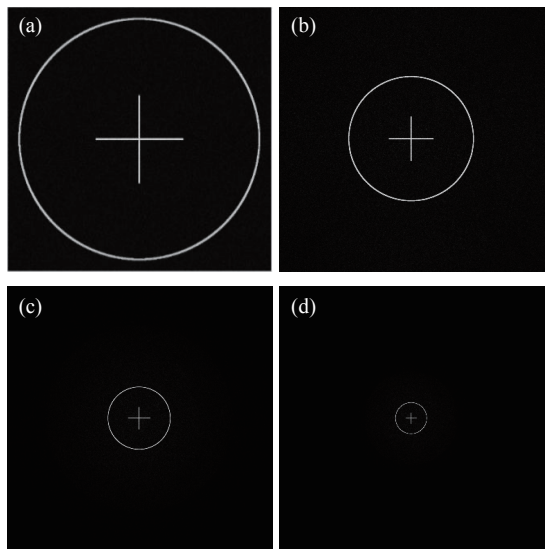


图 13 不同采样间隔的仿真再现图像。(a) $N=1$; (b) $N=2$; (c) $N=4$; (d) $N=8$

Fig. 13 Simulated reproduction images with different sampling intervals. (a) $N=1$; (b) $N=2$; (c) $N=4$; (d) $N=8$

表 3 不同采样间隔对应的仿真再现图像圆环直径值
Tab. 3 Simulated reproduction image ring diameters corresponding to different sampling intervals

Ring diameter of original images	Sampling coefficient N	Sampling interval d (μm)	Ring diameter of simulated reproduction images (pixel)	Fitting slope
700	1	12.5	700	1
	2	25	350	1/2
	4	50	175	1/4
	8	100	87	1/8

4 再现实验

利用透射式相位型 LC-SLM 实现离轴全息再现, 采用西安摘星光电科技有限公司的 LC-SLM(型号为 STO-SLM-T1K)设计的相位型计算全息图进行验证。为得到预期目标图像, 再现图像的衍射距离须满足夫琅禾费衍射条件, 采用成像镜头可将再现图像聚焦至 CCD 相机靶面, 在满足夫琅禾费衍射条件下缩短了全息再现系统的长度。全息再现系统光路原理如图 14 所示, 由激光平行光管、偏振片、LC-SLM、成像镜头和 CCD 相机组成。激光平行光管发出的波长为 650 nm 的平行光束作为再现光波(再现光波与计算仿真时的参考光波完全相同), 再现光波经过偏振片后以一定角度入射到 LC-SLM, 被加载到 LC-SLM 上的相位型计算全息图调制相位信息得到再现图像, 由成像镜头聚焦并在 CCD 相机靶面接收一级衍射图像。

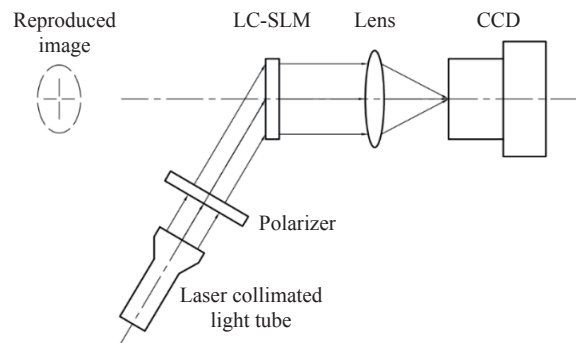


图 14 全息再现系统示意图

Fig. 14 Schematic diagram of holographic reproduction system

全息再现实验系统如图 15 所示。激光平行光管出射的波长为 650 nm、直径为 20 mm 的圆形准直光斑可代替激光器和扩束准直系统。偏振片使入射到 LC-SLM 上的再现光波为线偏振光。

透射式 LC-SLM 通过串口与电脑 1 连接, 将计算仿真的原始图像的相位分布加载到光场调控实验软件上即可实现对入射光波的相位调制。CCD 相机接收由成像镜头聚焦后的再现图像并由电脑 2 显示。图 16 所示为液晶显示屏的微结构, 其表面结构排列为网格状的正交光栅, 每个像素尺寸为 $12.5 \mu\text{m} \times 12.5 \mu\text{m}$ 。LC-SLM 的像素单元具有一定的填充因子, 导致图 16 中空白区域无法调控光波信息, 这些空白区域被称为“死区”。表 4 为 LC-SLM 的工作参数。表 5 为 CCD 相机及成像镜头的工作参数。

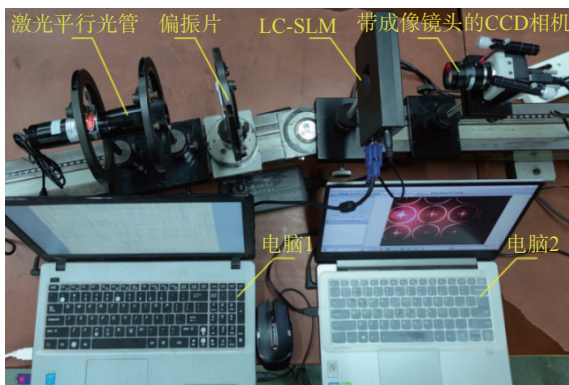


图 15 基于 LC-SLM 的全息再现实验系统

Fig. 15 Holographic reproduction experimental system based on LC-SLM

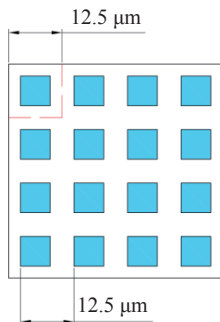


图 16 透射式相位型 LC-SLM 液晶显示屏的微结构

Fig. 16 Microstructure of transmissive phase-type LC-SLM liquid crystal display

本文基于 LC-SLM 完成了全息再现实验。由于 LC-SLM 具有特殊的表面结构, 在其“死区”产生的“黑栅效应”导致中央零级衍射光强度高, 其他级次衍射光强度较弱, 且越接近零级光强度越高^[25]。为避免零级衍射光对一级衍射图像的影响, 在 CCD 相机前加入光阑, 过滤其他级次衍射光, 只保留一级衍射图像。如图 17 所示为加光阑前后的一级衍射再现图像, 可见, 加光阑后可将杂散光过滤, 提高了再现图像的拍摄效果。

表 4 LC-SLM 的工作参数

Tab. 4 Operating parameters of LC-SLM

Parameter	Parameter value
Effective area size	12.8 mm×9.6 mm
Number of pixels	1024×768
Pixel size	12.5 μm ×12.5 μm
Pixel pitch	12.5 μm
Fill factor	80%
Gray scale range	0 ~ 255

表 5 CCD 相机及成像镜头的工作参数

Tab. 5 Operating parameters of CCD cameras and imaging lens

Parameter	Parameter value	
Camera operating parameters	Number of pixels	2048×1536
	Pixel size	2.8 μm ×2.8 μm
Lens operating parameters	Focal length	50 mm
	Aperture range	F/1.8 ~ F/10

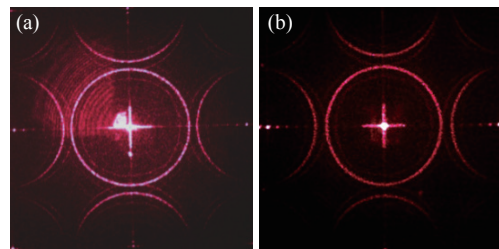


图 17 (a) 滤波前和 (b) 滤波后的再现图像

Fig. 17 Reproduction images (a) before and (b) after filtering

4.1 原始仿真图像在不同线宽下的再现图像

原始图像分辨率为 768×768 , 圆环直径为 700 pixel, 采样间隔为 $12.5 \mu\text{m}$, 线宽 k_0 分别为 5 pixel、10 pixel、15 pixel、20 pixel。如图 18(彩图见期刊电子版) 所示为 CCD 相机镜头成像后不同线宽的全息再现图像。将接收的全息再现图像转换成灰度图像并二值化, 经边缘提取计算得到再现图像的线宽像素, 线宽像素乘以 CCD 相机的最小像元尺寸即为再现图像的实际线宽。表 6 为实验测试的不同原始图像线宽对应的再现图像线宽值。

对表 6 数据拟合得到如图 19 所示线性拟合关系, 拟合斜率为 0.003 mm/pixel 。图中原始图像线宽与实际再现图像线宽之间为近似线性相关, 且呈正相关。因此, 通过图 19 所示线性函数关

系, 由预期目标图像的线宽数据可反向计算得到原始仿真图像的线宽。

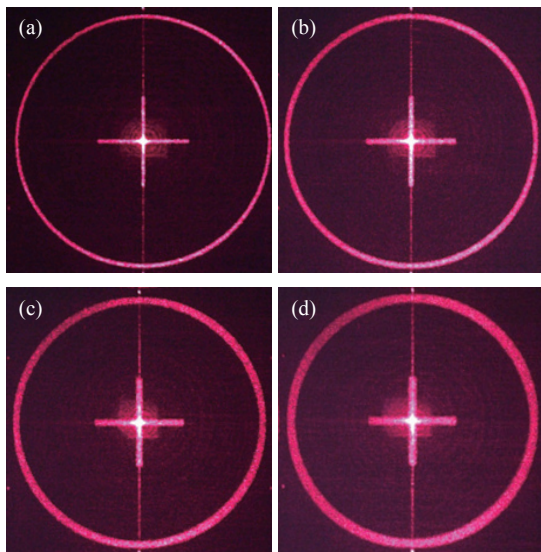


图 18 不同线宽的全息再现图像。(a) $k_0=5$; (b) $k_0=10$; (c) $k_0=15$; (d) $k_0=20$

Fig. 18 Holographic reproduction images with different line widths. (a) $k_0=5$; (b) $k_0=10$; (c) $k_0=15$; (d) $k_0=20$

表 6 实验测试的不同原始图像线宽对应的再现图像线宽值

Tab. 6 Reproduction image line widths corresponding to different original image line widths tested experimentally

Line width of the original images k_0 (pixel)	Line width of the reproduction images in pixels (pixel)	Line width of the reproduction images k (mm)	Fitting slope (mm/pixel)
5	10	0.0280	0.0030
10	16	0.0450	
15	22	0.0620	
20	26	0.0730	

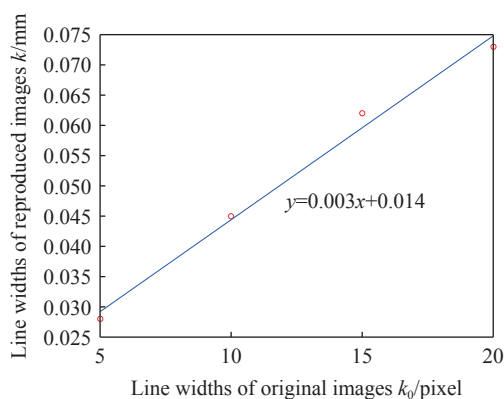


图 19 再现图像线宽随原始图像线宽的变化曲线

Fig. 19 The line widths of the reproduction images varying with the line widths of the original images

4.2 原始仿真图像在不同圆环直径下的再现图像

原始图像分辨率为 768×768 , 线宽为 5 pixel, 采样间隔为 $12.5 \mu\text{m}$, 圆环直径 D_0 分别为 400 pixel、500 pixel、600 pixel、700 pixel。图 20 为 CCD 相机镜头成像后接收到的全息再现图像。再现图像圆环直径像素的计算方法同线宽像素。表 7 为实验测试的不同原始图像圆环直径对应的再现图像圆环直径值。

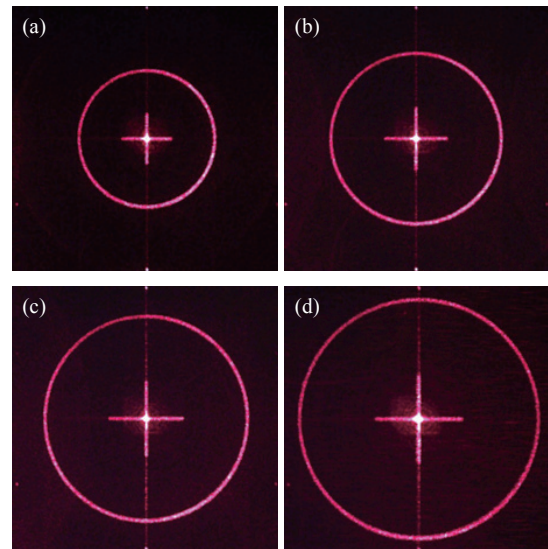


图 20 不同圆环直径下的全息再现图像。(a) $D_0=400$ pixel; (b) $D_0=500$ pixel; (c) $D_0=600$ pixel; (d) $D_0=700$ pixel

Fig. 20 Holographic reproduction images with different ring diameters. (a) $D_0=400$ pixel; (b) $D_0=500$ pixel; (c) $D_0=600$ pixel; (d) $D_0=700$ pixel

表 7 实验测试的不同原始图像圆环直径对应的再现图像圆环直径值

Tab. 7 Ring diameters of the reproduction images corresponding to the ring diameters of the different original images tested experimentally

Ring diameter of the original images D_0 (pixel)	Pixel occupied by ring diameters in reproduction images (pixel)	Ring diameter of reproduction images D (mm)	Fitting slope (mm/pixel)
400	448	1.2544	0.0030
500	558	1.5624	
600	667	1.8676	
700	766	2.1448	

对表 7 数据拟合得到结果如图 21 所示。图中原始图像圆环直径与再现图像圆环直径为线性相关, 两者之间成正比, 再现图像与原始图像圆环直径的比例系数为 0.003 mm/pixel 。根据图 21 所示线性函数关系, 由预期目标图像的圆环直径数据可计算得到原始仿真图像的圆环直径。

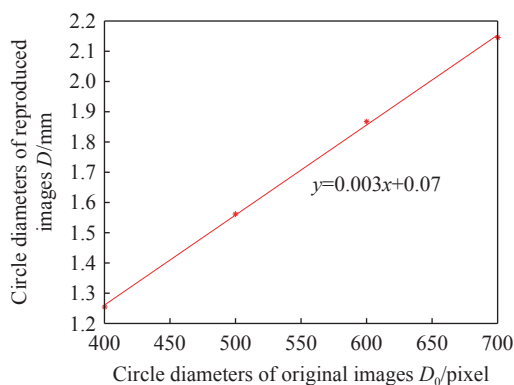


图 21 再现图像圆环直径随原始图像圆环直径的变化曲线
Fig. 21 The ring diameters of reproduction images vary with ring diameters of original images

4.3 原始仿真图像在不同计算采样间隔下的再现图像

原始图像分辨率为 768×768 , 线宽为 5 pixel, 圆环直径 $D_0=700$ pixel, 采样系数 N 分别为 1、2、4、8, 采样间隔 d 分别为 $12.5 \mu\text{m}$ 、 $25 \mu\text{m}$ 、 $50 \mu\text{m}$ 、 $100 \mu\text{m}$ 。图 22 为 CCD 相机镜头成像后接收的再现图像。表 8 为实验测试的不同采样间隔对应的再现图像圆环直径值。

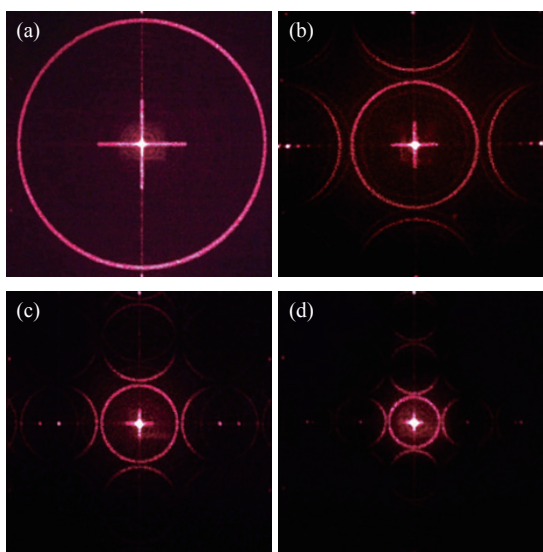


图 22 不同采样间隔下的全息再现图像。(a) $N=1$; (b) $N=2$; (c) $N=4$; (d) $N=8$

Fig. 22 Holographic reproduction images with different sampling intervals. (a) $N=1$; (b) $N=2$; (c) $N=4$; (d) $N=8$

表 8 反映了不同采样间隔与实际再现图像尺寸间的关系。下面从理论上推导采样间隔与再现图像尺寸的关系。根据光栅方程:

$$d \sin \theta = m \lambda \quad (8)$$

式中, d 为光栅常数即采样间隔, θ 为衍射角, λ 为入

射波长, m 为衍射级次, 取 $m=1$ 。则对衍射角 θ 有:

$$\sin \theta = \frac{\lambda}{d} \quad (9)$$

CCD 相机成像镜头焦距 f' 、衍射角 θ 以及再现图像尺寸 D 之间有如下三角关系。

$$f' \tan \theta = D \quad (10)$$

表 8 实验测试的不同采样间隔对应的再现图像圆环直径值

Tab. 8 The ring diameters values of the reproduction images corresponding to the different sampling intervals tested experimentally

Sampling coefficient N	Sampling interval d (μm)	Pixel occupied by ring diameters of reproduction images (pixel)	Ring diameter of reproduction images D (mm)
1	12.5	702	2.1448
2	25	396	1.1088
4	50	241	0.6748
8	100	162	0.4536

联立式 (9) 和式 (10), 结合三角函数关系式, 可得到理论上采样间隔与再现图像尺寸间的函数关系:

$$D = \frac{\lambda f'}{\sqrt{d^2 - \lambda^2}} \quad (11)$$

如图 23 (彩图见期刊电子版) 所示为不同采样间隔下再现图像尺寸的理论曲线和测量值的拟合曲线, 图中采样间隔与再现图像尺寸呈非线性关系。图中测量值拟合曲线与理论值函数曲线的变化趋势一致, 证明了数据的可靠性。通过图中所示函数关系, 利用预期目标图像的圆环直径数据可计算得到原始仿真图像的采样间隔。

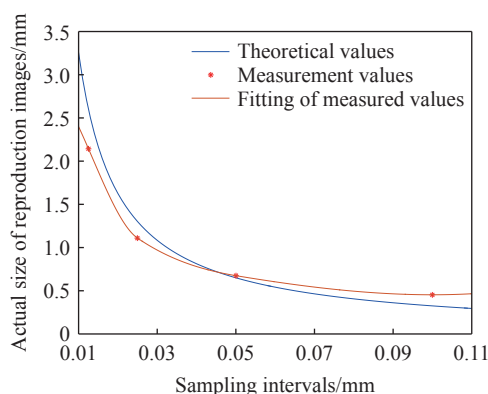


图 23 再现图像尺寸随采样间隔的变化曲线

Fig. 23 The actual size of reproduction images varying with sampling intervals

实验分析结果表明原始仿真图像的特征尺寸 (线宽、圆环直径) 与计算采样间隔会影响再现图

像的特征尺寸,再现图像的特征尺寸与原始图像的特征尺寸呈线性正相关,与原始图像计算采样间隔呈非线性负相关。由原始图像与实际再现图像之间的函数关系来确定原始图像的特征尺寸和采样间隔,从而得到预期目标再现图像。

5 结果优化及验证

由再现图像和实验测得数据可知,线宽、圆环直径和采样间隔影响全息再现图像的特征尺寸,通过设计原始仿真图像的特征尺寸和采样间隔可以得到预期目标再现图像。本文所设计的全息再现图像将在AR、VR、平视显示系统等全息场景中应用,需在符合人眼分辨角($1'$)的条件下实现远场衍射。因此,需对原始图像的特征尺寸及采样间隔进行计算和约束,使人眼在一定距离和孔径下能清晰分辨再现图像。

本文全息再现实验系统采用CCD相机接收再现图像,CCD相机镜头焦距 $f'=50\text{ mm}$ 的圆环预期再现目标图像尺寸是直径为 0.943 mm ,中心十字线宽 0.015 mm 。根据再现实验测试得到的再现图像特征尺寸与原始仿真图像特征尺寸和仿真计算采样间隔的数值关系可以计算得到预期目标仿真图像的线宽为 $k_0=3\text{ pixel}$ 、圆环直径为 $D_0=594\text{ pixel}$ 、采样间隔为 $d=25\text{ }\mu\text{m}$,仿真计算得到的预期目标图像如图24(彩图见期刊电子版)所示。

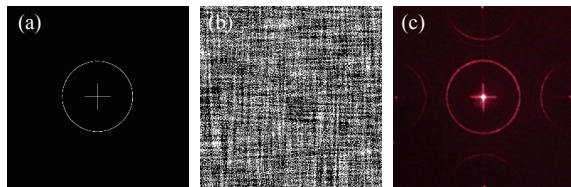


图24 仿真设计的(a)原始仿真图像、(b)相位分布图及(c)再现图像

Fig. 24 (a) Original image, (b) phase distribution map of the simulation design and (c) the reproduction image

参考文献:

- [1] GABOR D. A new microscopic principle[J]. *Nature*, 1948, 161(4098): 777-778.
- [2] GOODMAN J W, LAWRENCE R W. Digital image formation from electronically detected holograms[J]. *Applied Physics Letters*, 1967, 11(3): 77-79.
- [3] LOHMANN A W, PARIS D P. Binary fraunhofer holograms, generated by computer[J]. *Applied Optic*, 1967, 6(10): 1739-1748.
- [4] GERCHBERG R W, SAXTON W O. A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures[J]. *Optik*, 1972, 35(2): 237-246.

经图像处理得到其圆环直径为 0.930 mm 、线宽为 0.017 mm ,与预期目标图像特征尺寸接近,误差精度在 0.02 mm 以内,证明了实验数据的精确性。

6 结论

本文根据相位型计算全息原理,利用GS算法对输出平面与输入平面光场分布作正、逆傅立叶变换,对相位型计算全息图的相位分布进行求解,再通过提高迭代次数得到了相位分布最优解。通过改变原始仿真图像的特征尺寸(线宽和圆环直径)和采样间隔,计算得到了不同特征尺寸和采样间隔下原始图像的相位分布和仿真再现图像。利用LC-SLM搭建了全息再现实验系统,采用CCD相机拍摄得到了远场衍射全息再现图像。为避免LC-SLM黑栅效应带来的中央零级衍射光强,其他级次衍射光弱的现象,在LC-SLM和CCD之间加光阑过滤了零级衍射光,只保留一级衍射图像,提高了再现图像质量。通过改变原始仿真图像的特征尺寸和采样间隔并进行再现实验测试和分析计算。结果表明再现图像特征尺寸与原始仿真图像特征尺寸基本呈线性变化关系,再现图像尺寸与仿真计算采样间隔呈非线性变化关系,且与推导的理论计算关系曲线一致。当设计预期再现图像圆环直径为 0.943 mm ,中心十字线宽 0.015 mm 时,仿真计算得到预期目标原始仿真图像的线宽为 3 pixel 、圆环直径 594 pixel 、采样间隔 $25\text{ }\mu\text{m}$,通过再现实验测量得到的全息再现图像圆环直径为 0.93 mm ,线宽为 0.017 mm ,误差精度在 0.02 mm 以内。再现图像更加符合人眼视觉特征、图像尺寸真实性更高,且实现了全息再现图像的远场衍射成像。研究结果对全息显示、AR/VR显示等应用场景提高虚拟显示图像尺寸真实性提供有益参考。

- [5] 王晓诗. 基于迭代的高质量纯相位全息图生成算法[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2023.
WANG X SH. *The algorithm based on iteration for generation of phase-only hologram with high quality*[D]. Kunming: Kunming University of Science & Technology, 2023. (in Chinese).
- [6] 高乾程. 基于相位优化的计算全息显示研究[D]. 芜湖: 安徽工程大学, 2023.
GAO Q CH. *Research on computer-generated holographic display based on phase optimization*[D]. Wuhu: Anhui Polytechnic University, 2023. (in Chinese).
- [7] 刘珂瑄, 吴佳琛, 何泽浩, 等. 基于深度学习的计算全息显示进展[J]. *液晶与显示*, 2023, 38(6): 819-828.
LIU K X, WU J CH, HE Z H, *et al.*. Progress of learning-based computer-generated holography[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2023, 38(6): 819-828. (in Chinese).
- [8] 唐旭. 关于计算全息显示中散斑降噪方法研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2023.
TANG X. *Research on speckle noise reduction method in computational holographic display*[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2023. (in Chinese).
- [9] 邬明仁. 基于扩散模型的计算全息方法研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2024.
WU M R. *Research on computer-generated holography method based on diffusion model*[D]. Nanchang: Nanchang University, 2024. (in Chinese).
- [10] 高云舒. 基于液晶空间光调制器的可编程波长选择开关的技术研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2020.
GAO Y SH. *Research on programmable wavelength selective switch based on liquid crystal spatial light modulator*[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020. (in Chinese).
- [11] KOLLIN J S, BENTON S A, JEPSEN M L. Real-time display of 3-D computed holograms by scanning the image of an acousto-optic modulator[J]. *Proceedings of SPIE*, 1989, 1136: 178-185.
- [12] SANDO Y, BARADA D, YATAGAI T. Full-color holographic 3D display with horizontal full viewing zone by spatiotemporal-division multiplexing[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(26): 7622-7626.
- [13] BUSKE P, HOFMANN O, BONNHOF A, *et al.*. High fidelity laser beam shaping using liquid crystal on silicon spatial light modulators as diffractive neural networks[J]. *Optics express*, 2024, 32(5): 7064-7078.
- [14] MINIKHANOV T Z, ZLOKAZOV E Y, STARIKOV R S, *et al.*. Phase modulation time dynamics of the liquid-crystal spatial light modulator[J]. *Measurement Techniques*, 2024, 66(12): 935-939.
- [15] MA B H, YAO B L, LI Z, *et al.*. Generation of three-dimensional optical structures by dynamic holograms displayed on a twisted nematic liquid crystal display[J]. *Applied Physics B*, 2013, 110(4): 531-537.
- [16] ZHU W X, GAO F L, FU Q Q, *et al.*. Multi-mode vector light field generation using modified off-axis interferometric holography and liquid crystal spatial light modulators[J]. *Photonics*, 2023, 11(1): 33.
- [17] 肖瑞. 基于全息光学元件的增强现实三维显示[D]. 北京: 北京邮电大学, 2023.
XIAO R. *Augmented reality 3D display based on holographic optical element*[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2023. (in Chinese).
- [18] XU K, LI X R. Light field modulation algorithms for spatial light modulators: a review[J]. *Current Nanoscience*, 2024, 21(2): 182-200.
- [19] 马宁涛. 计算全息再现像质量提升技术的研究[D]. 郑州: 郑州轻工业大学, 2023.
MA N T. *Research on quality improvement technology of computer-generated holographic image*[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University of Light Industry, 2023. (in Chinese).
- [20] 王化宾, 何渝, 赵立新. 基于改进 Gerchberg-Saxton 算法的全息双面光刻方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2023, 60(16): 1609001.
WANG H B, HE Y, ZHAO L X. Holographic double-sided photolithography based on improved gerchberg-saxton algorithm[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(16): 1609001. (in Chinese).
- [21] CHEN Q, TANG M Y, SUN CH L, *et al.*. 83-3: inverse design of liquid crystal phase modulators for 2D/3D switchable display based on deep learning[J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2024, 55(1): 1159-1162.
- [22] 武耀霞. 相位型全息分划板的复制技术研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2019.
WU Y X. *Research on replication technology of phase holographic reticle*[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2019. (in Chinese).
- [23] 林培秋. 基于纯相位型液晶空间光调制器的相息图三维显示的研究[D]. 金华: 浙江师范大学, 2010.
LIN P Q. *Study on three-dimensional display from kinoform based phase-only liquid crystal spatial light modulator*[D].

Jinhua: Zhejiang Normal University, 2010. (in Chinese).

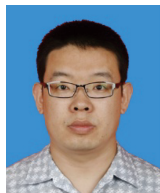
[24] 颜树华. 衍射微光学设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.

YAN SH H. *Design of Diffractive Micro-optics* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011. (in Chinese).

[25] 吴嘉元, 韩军, 王谦豪, 等. 利用达曼光栅灰度图去除零级光干扰[J]. 激光与光电子学进展, 2024, 61(4): 185-192.

WU J Y, HAN J, WANG Q H, *et al.*. Removal of zero-order beam interference using Dammann grating grayscale map[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2024, 61(4): 185-192. (in Chinese).

作者简介:



孙国斌(1982—), 男, 山西长治人, 副教授, 2005年、2008年于西安工业大学分别获学士、硕士学位, 主要从事光学与光电检测技术, 全息及衍射微光学等方面的研究。E-mail: 83680337@qq.com