

基于空间光调制器的计算全息再现像放大技术

王 皓^{1,2} 毕 勇¹ 李 芳^{1,2} 齐 岩¹

(¹中国科学院光电研究院, 北京 100094)
(²中国科学院大学, 北京 100049)

摘要 基于纯相位空间光调制器的计算全息显示系统的大尺寸再现,可从理论算法和实验光路两方面实现。在分析了计算全息成像原理的基础上,提出了利用傅里叶变换的相似性定理扩大再现像尺寸的方法,从理论上实现了再现物体频域到空域的可调节再现像尺寸的计算全息再现,并搭建了基于空间光调制器的实验平台,验证了再现像尺寸在原基础上扩大 2.7 倍后亦可清晰再现。在此基础上,利用相移原理,一定程度上实现了中央零级光斑的抑制。实验结果表明,该理论可有效实现计算全息再现像的放大,并在相移原理的辅助下得到不受中央零级影响的清晰再现像。

关键词 全息;计算全息;再现像放大;相似性定理;空间光调制器

中图分类号 O438.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0309001

Enlargement Technology of Reconstructed Image of Computer Generated Hologram Based on Spatial Light Modulator

Wang Hao^{1,2} Bi Yong¹ Li Fang^{1,2} Qi Yan¹

(¹Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China)
(²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract The enlargement of reconstructed image of computer generated hologram (CGH) display system based on phase-only special light modulator (SLM) can be realized by theoretical algorithm and experiment. Based on analysis of the theory of CGH, the method to enlarge the size of reconstructed picture by similarity principle of Fourier transform is proposed, and the adjustable reconstructed image size of CGH from frequency domain to space domain is achieved. It's confirmed that the reconstructed image which is two to three times bigger than before can be displayed clearly by the experimental platform based on SLM. The suppression of zero-order bright spot is realized in some degree base on phase shift theory. The experimental results show that this theory can realize to enlarge the reconstructed image effectively, and get clear reconstructed image without the effect of zero-order bright spot under the help of phase shift theory.

Key words holography; computer generated hologram; enlargement of reconstructed image; similarity principle; spatial light modulator

OCIS codes 090.1760; 090.2870; 090.1970; 070.6120

1 引 言

随着显示技术的发展及人们对大尺寸、大视场和真三维显示要求的提高,空间光调制器(SLM)和计算全息(CGH)显示技术得到国内外学者的高度

关注。

CGH 显示技术与传统光学全息相比有以下优点:1) 不需要实际存在的透明物体,通过程序的建模虚拟即可实现;2) 省略了光记录时对光路严格复

收稿日期: 2012-09-17; **收到修改稿日期**: 2012-11-13

基金项目: 国家 863 计划(2009AA032701, 2009AA032708)资助课题。

作者简介: 王 皓(1987—),女,硕士研究生,主要从事计算全息三维显示方面的研究。E-mail: wanghao@aoe.ac.cn

导师简介: 毕 勇(1973—),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事全色激光显示技术、大功率全固态激光器系统技术与应用和非线性光学频率变换技术等方面的研究。E-mail: biyong@aoe.ac.cn(通信联系人)

杂的硬件要求,通过计算机对物信息和参考光波的模拟即可获得目标物体的相位信息;3) 不需要记录干板等记录介质,利用可编程的 SLM 即可实现实时的相位加载与调制。其中不需要实际的记录光路也是优于数字全息的特点之一。鉴于液晶空间光调制器(LC-SLM)中的硅基液晶(LCOS)具有高集成度、高分辨率、高开口率、小像素尺寸和快速响应的特点^[1],被用于纯相位调制的相位承载^[2]。但是由于当前技术限制,LCOS 的开口率不能达到 100%,使再现像面存在严重影响再现质量的中央零级亮斑^[3,4],同时目前的像素尺寸和像素数也严重影响了再现像的尺寸^[5]。针对再现像的扩大问题,很多学者提出利用多 SLM 拼接技术^[6,7]、水平扫描^[8]等方法。但是复杂的拼接技术与高昂的费用及对垂直方向信息的忽略并非可以实现全部信息的记载,制约了该方向的发展。有人提出利用光学元件间距离的调整改变再现像大小,但该方法止步于理论并没有得到实验论证。

本文在现有方法的基础上^[9],分析了 CGH 再现原理,提出了利用傅里叶变换的相似性定理实现再现像尺寸的扩大,同时利用相移的方法在一定程度上实现了零级亮斑的抑制,并建立了一套 CGH 显示系统用于实验验证。

2 傅里叶变换的相似性定理

与传统的光学全息类似,CGH 实际上就是根据物光波和参考光波的干涉原理的数学函数式,利用计算机算出干涉条纹的分布图。

假定研究的是平面物体,取直角坐标 $Oxyz$,将平面物体放置在透镜的前焦面上,即 x_0y_0 平面,全息记录面处于透镜的后焦面 xy 平面上,透镜焦距为 f 。这时全息记录面上的物光复振幅分布正好是放置在透镜的前焦面上平面物体 $o(x_0, y_0)$ 的傅里叶变换^[10]。即全息记录面上的物光复振幅分布为

$$O(x, y) = \frac{\exp(j2kf)}{j\lambda f} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} o(x_0, y_0) \times \exp\left[-j2\pi\left(\frac{x}{\lambda f}x_0 + \frac{y}{\lambda f}y_0\right)\right] dx_0 dy_0, \quad (1)$$

k 为波数,表示单位长度上的相位变化。若参考光与 z 轴的夹角为 θ_R ,它在全息记录面上的复振幅分布可表示为

$$R(x, y) = R_0 \exp(jk \sin \theta_R x). \quad (2)$$

于是记录平面上光场的强度分布为

$$I(x, y) = R_0^2 + O(x, y)O^*(x, y) + R_0 \exp(jk \sin \theta_R x)O(x, y) + R_0 \exp(jk \sin \theta_R x)O^*(x, y). \quad (3)$$

当以振幅为 A 的平面波垂直照射全息图,并通过一个焦距为 f' 的透镜形成实像时,若将全息图放置于透镜的前焦面 (x, y) ,观察屏放置于透镜的后焦面 (x_i, y_i) 上。此时前焦面 (x, y) 上衍射光的光场复振幅分布为

$$\tilde{u}(x, y) = AI(x, y) = \tilde{u}_1(x, y) + \tilde{u}_2(x, y) + \tilde{u}_3(x, y) + \tilde{u}_4(x, y). \quad (4)$$

透镜后焦面 (x_i, y_i) 上衍射光的光场复振幅分布 $\tilde{u}(x_i, y_i)$ 可表示为^[7]

$$\begin{aligned} \tilde{u}(x_i, y_i) &= \frac{\exp(j2kf')}{j\lambda f'} \mathcal{F}[u(x_i, y_i)] = \\ &= \frac{\exp(j2kf')}{j\lambda f'} [\tilde{u}_1(x_i, y_i) + \tilde{u}_2(x_i, y_i) + \\ &+ \tilde{u}_3(x_i, y_i) + \tilde{u}_4(x_i, y_i)] = \\ &= U_1 + U_2 + U_3 + U_4. \end{aligned} \quad (5)$$

由(1)~(5)式可知,(5)式中第一项衍射光经透镜聚焦在透镜的后焦面上,形成一个中心亮点。第二项衍射光是物光傅里叶变换的自相关函数,是中心在轴上的晕轮光。第三、四项是中心在 $x_i = \mp f' \sin \theta_R$ 处的物体的原始像和共轭像。利用纯相位全息图记录的方法,在实验平台满足条件的情况下可避免共轭像的出现(见第 3 节中的实验再现像)。

从傅里叶变换原理出发,借助傅里叶变换的相似性定理,即若 $\mathcal{F}[g(x, y)] = G(u, v)$,则

$$\mathcal{F}[g(ax, by)] = \frac{1}{|ab|} G\left(\frac{u}{a}, \frac{v}{b}\right). \quad (6)$$

空域坐标 (x, y) 的“伸展”将导致频域坐标 (u, v) 的压缩,加上整个频谱幅度的一个总体变化。当令频域坐标在 (u, v) 两个方向上做相同倍数的压缩时,对应得到的空域即再现平面得到响应程度的展宽,可以得到再现像尺寸的扩大,且放大倍数在空间光调制器和光源允许的条件下可实现任意倍数的放大。

3 实验结果与分析

3.1 实验光路

CGH 显示的原理图如图 1 所示。激光器发出的光经空间滤波器、起偏器和扩束器,以一定角度入射到 SLM 上,计算机将 CGH 输入到 SLM 中对入射光进行调制与显示,这样就可实时将 CGH 置入再现光路中。由于 SLM 对入射光的调制作用,使出射光带有了 SLM 所显示的全息图信息。这束出

射光经傅里叶透镜后,在焦平面上再现出原物像。若通过计算机改变输入 SLM 的全息图,就能在监视屏幕上观察到实时变化的再现像,实现动态的全息显示。

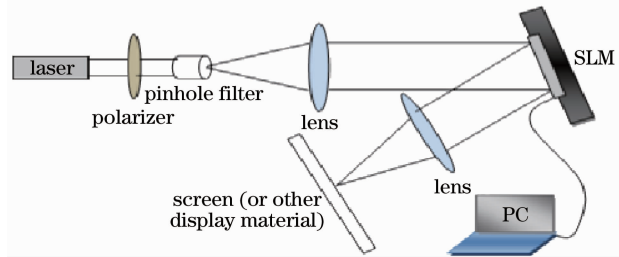


图 1 CGH 原理图

Fig. 1 Schematic of CGH

根据图 1 搭建了一套基于 SLM 的 CGH 显示系统用于验证所提出的方法,如图 2 所示。采用波长为 532 nm 的半导体绿光激光器作为光源,选用 HOLOEYE 公司的 Pluto-VIS 型号的 SLM (1920 pixel×1080 pixel,像素尺寸为 8.0 μm,面板有效尺寸为 15.36 mm×8.64 mm),其在入射角小于 6°下具有理想相位调制特性,通过空间滤波器和准直透镜,小角度入射至 SLM 上反射后经过傅里叶透镜后(通过实验表明:透镜距 SLM 越近,再现像质

量越好),在其焦平面上实现 CGH 成像的再现。

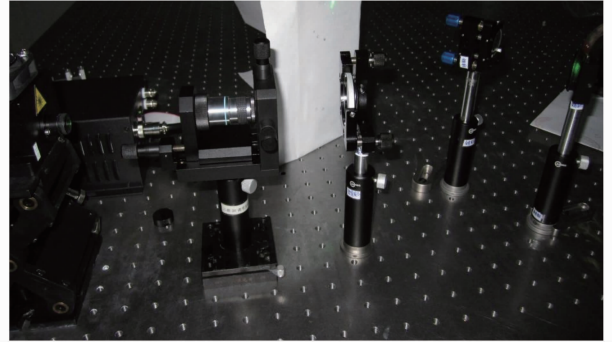


图 2 基于 SLM 的 CGH 显示系统

Fig. 2 CGH display system based on SLM

3.2 再现图像

基于上述实验平台,利用 Matlab 软件生成目标图像的相位图,并加载到空间光调制器上进行再现。图 3(a)为原图(220 pixel×260 pixel),图 3(b)为通过 Matlab 计算生成的相位图,图 3(c)为通过 Matlab 模拟生成的再现图样,图 3(d)为实际光学平台得到的再现像。需要说明的是:因实验中利用普通数码相机进行记录,所得图样远不如实际人眼观察的像清晰。

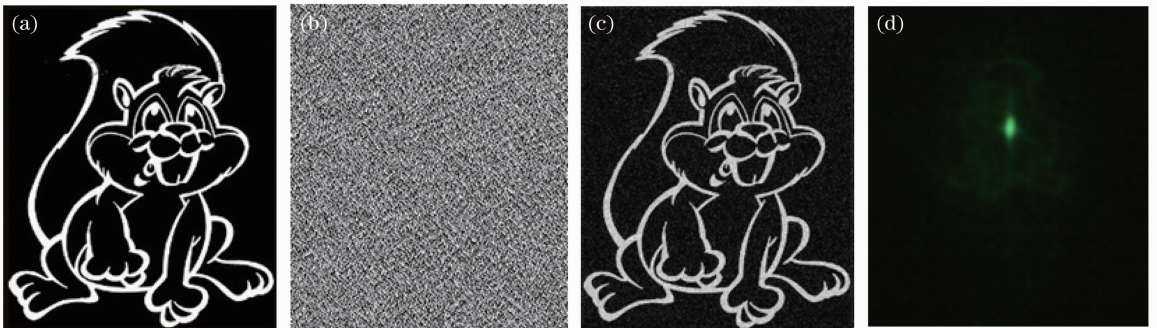


图 3 图像记录与再现。(a)记录原图;(b)相位图;(c) Matlab 模拟图;(d)实验再现图样

Fig. 3 Record and reconstruct image. (a) Original image; (b) phase image; (c) Matlab simulated image; (d) experimental image

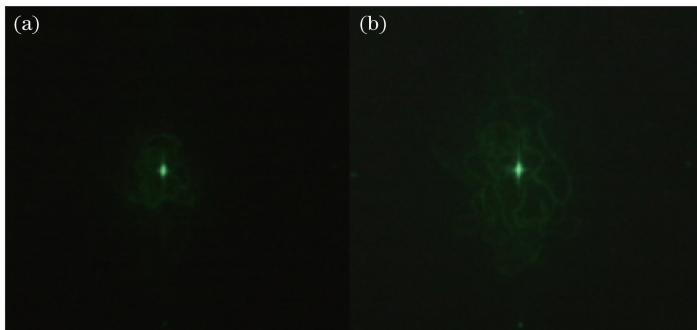


图 4 再现像对比。(a)原再现图样;(b)利用相似定理后再现图

Fig. 4 Comparison of reconstructed image. (a) Original reconstructed image; (b) reconstructed image with similarity principle

利用相似性定理重新计算的相位图的再现图样,如图4所示。由图4中的衍射次级大亮点和中央零级亮斑作为标定参考,可清晰证明利用傅里叶变换的相似性定理后,再现像尺寸得到明显扩大,上图的扩大倍数约为原图的2.7倍。

3.3 实验分析

以中央零级亮斑和次级亮点作为参照标定,由图4利用相似性定理前后的再现像的比较可知,相似性定理的运用使再现像尺寸得到明显的扩大,本

实验中的放大倍数为2.7倍左右,图样尺寸的扩大程度理论上由展缩因子决定。由图4还可明显感受到中央零级亮斑对再现像的影响^[11]。利用相移原理^[12,13],对相位图加载相位,可实现对应再现像的移动,结果如图5所示。由图5可知,不同的方向加载相移量不同,会引起不同程度的图像移动,引入相移后的再现像在一定程度上可避免中央零级的干扰实现清晰成像。

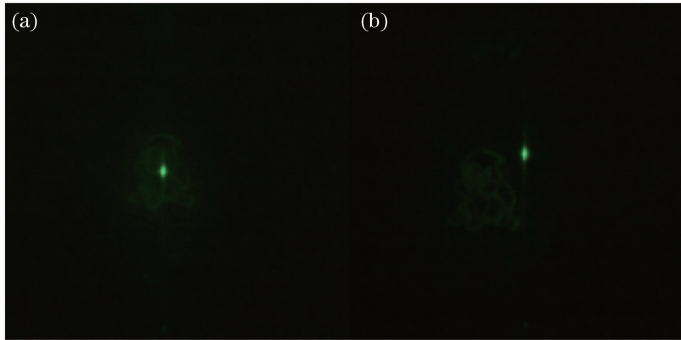


图5 相移前后对比。(a)原再现图样;(b)利用相移定理后再现图

Fig. 5 Comparison of reconstructed image with and without phase-shift. (a) Original reconstructed image; (b) reconstructed image with phase-shift

4 结 论

针对基于衍射理论的CGH显示系统,分析了傅里叶变换全息成像的原理,并从该理论出发,探索了傅里叶变换的相似性定理对再现像的影响。理论上实现了计算全息的再现物体频域到空域的再现像可调节放大,并搭建了基于Pluto-VIS型号的SLM实验平台验证了再现像尺寸在原基础上实现2.7倍放大的清晰再现。并利用相移原理,在一定程度上避免了中央零级亮斑对再现像的干扰,提高再现像质量。

参 考 文 献

- 1 Haitao Dai, Keshu Xu, Yanjun Liu *et al.*. Characteristics of LCoS phase-only spatial light modulator and its applications[J]. *Opt. Commun.*, 2004, **238**(4-6): 269~276
- 2 Zheng Huadong, Dai Linmao, Wang Tao *et al.*. Optoelectronic reconstruction of three-dimensional scenes based on multiple fractional-Fourier-transform holograms [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(2): 020901
郑华东, 代林茂, 王涛等. 三维物场多重分数傅里叶变换全息图光电再现实验研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, **48**(2): 020901
- 3 V. Arrizon, E. Carreon, M. Testorf. Implementation of Fourier array illuminators using pixelated SLM: efficiency limitations[J]. *Opt. Commun.*, 1999, **160**(4-6): 207~213
- 4 Hao Zhang, Jinghui Xie, Juan Liu *et al.*. Optical reconstruction 3D images by use of pure-phase computer-generated holograms [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, **7**(12): 1101~1103

- 5 Liu Yongjun, Xuan Li, Hu Lifa *et al.*. Investigation on the liquid crystal spatial light modulator with high precision and pure phase [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(12): 1682~1686
刘永军, 宣丽, 胡立发等. 高精度纯相位液晶空间光调制器的研究[J]. *光学学报*, 2005, **25**(12): 1682~1686
- 6 K. Maeno, N. Fukaya, O. Nishikawa. Electro-holographic display using 15 mega pixels LCD[C]. *SPIE*, 1996, **2652**: 15~23
- 7 J. Hahn, H. Kim, G. Park *et al.*. Wide viewing angle dynamic holographic stereogram with a curved array of special light modulators[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(16): 12372~12386
- 8 Y. Takaki, N. Okada. Reduction of image blurring of horizontally scanning holographic display [J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(11): 11327~11334
- 9 Jia Jia, Wang Yongtian, Liu Juan *et al.*. Progress of dynamic 3D display of the computer-generated hologram [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, **49**(5): 050002
贾甲, 王涌天, 刘娟等. 计算全息三维实时显示的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, **49**(5): 050002
- 10 Li Junchang, Xiong Bingheng. Information Optical Tutorial[M]. Beijing: Science Press, 2011. 157~159
李俊昌, 熊秉衡. 信息光学教程[M]. 北京: 科学出版社, 2011. 157~159
- 11 H. Zhang, J. Xie, J. Liu *et al.*. Elimination of zero-order beam induced by pixelated spatial light modulator for holographic projection[J]. *Appl. Opt.*, 2009, **48**(30): 5834~5841
- 12 Jindong Tian, Dong Li, Haiou Qi *et al.*. Phase compensation for eliminating black-matrix effect of phase only spatial light modulator[C]. *SPIE*, 2010, **7848**: 78481E
- 13 Shen Chuan, Zhang Cheng, Liu Kaifeng *et al.*. Research on issues about reconstructed holographic image based on a pixelated spatial light modulator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(3): 0309001
沈川, 张成, 刘凯峰等. 基于像素结构空间光调制器的全息再现像问题研究[J]. *光学学报*, 2012, **32**(3): 0309001

栏目编辑:何卓铭