

文章编号:1004-4213(2010)10-1820-5

基于空间光调制器的多层图像的构建与可视化*

梁艳明,张培晴,关焯锋,李丽,周建英[†]

(中山大学 光电材料与技术国家重点实验室,广州 510275)

摘 要:为解决实时直观地观察多层再现图像的问题,提出利用发光材料实现其可视化.针对由沿光轴方向的二维图层组成的空间图像,利用高效、快速的三维 Gerchberg-Saxton 算法,得到位相型计算全息图,并通过计算机进行了数字模拟再现.阐述了三维 Gerchberg-Saxton 算法的流程,并搭建了基于液晶空间光调制器的位相全息图光学再现与可视化光路.利用液晶空间光调制器的灰度-位相曲线把计算全息图转换为灰度图,加载在液晶空间光调制器上,再现出高质量的三维光场,同时利用量子点材料的荧光特性实现了图像的可视化.实验结果表明,光学再现与计算机模拟结果较吻合.该技术在医学、军事、三维显示、微加工以及显微技术等领域有重要应用价值.

关键词:全息;三维光场;三维 Gerchberg-Saxton 算法;图像可视化

中图分类号:O438.1

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20103910.1820

0 引言

三维显示技术分三类:第一类借助双凸透镜、偏光镜或者微透镜阵列结合狭缝光栅等手段^[1]营造视差效果,视场小且易引起视觉疲劳.由于焦距固定眼睛难以像观看真实物体时那样改变焦距,无法正确估算深度和空间位置.第二类称为体三维显示技术^[1-2],包括扫描体显示和静态体显示,前者是把激光照射到固定在旋转机械部件上的半透明屏幕上,利用快速旋转产生的视觉暂留,显示立体图像;后者通过晶体内双光子聚合产生的荧光形成静态体像素,或借助层叠液晶屏幕组成立体图像.体三维显示技术不能生成真实的 3D 光场,只能在视觉上形成半透明的 3D 透视图.第三类是全息术,一般用于生成静态 3D 光学场景,图像的真实三维性和视点几乎不受限制.随着空间光调制器(Spatial Light Modulator, SLM)的日趋成熟,基于 SLM 的全息成像技术日益成为人们研究的热点^[3-11].

基于 SLM 的 3D 图像合成技术是结合计算全息术和空间光调制器,实时再现 3D 光场的技术.近年来,空间光场的全息合成的研究取得了很大进展,发展了多种快速算法,常用的包括 Gerchberg-Saxton(GS)算法^[3-4,12]、直接二元搜索法(Direct Binary Search, DBS)^[5]、基于 2D 投影像的频谱合成法^[13-14]和菲涅尔波带法^[15]等.同时各种光场调控器

件也日趋成熟,包括液晶空间光调制器(LC-SLM)、数字微镜器件(Digital Micro mirror Device, DMD)、光刻法或电子束刻蚀制作的衍射光学器件(Diffractive Optical Elements, DOE)等.然而在 3D 图像的可视化方面仍停留在用 CCD 接收 2D 图像或曝光感光介质形成 3D 结构上,前者可通过监视软件观看,但仅能观察 2D 图像从而缺乏立体感,后者要经过繁琐的处理过程,不能实时观看,造成实时再现但不能实时了解再现效果的困境.如果把再现像显示在发光材料上,就可以实现图像的实时可视化.

本文针对由一系列沿光轴方向的二维图层构成的空间多层图像,利用 3D GS 算法,得到位相型计算全息图,将计算全息图转换为灰度图,加载在液晶调制器上,再现出高质量的三维光场.与采用 CCD 接收图像的方式相比,利用量子点材料的荧光特性实现图像可视化,更直观、方便,也为下一步利用具有一定厚度的发光材料实现 3D 图像的立体显示奠定基础.实验结果表明再现像清晰连贯,信噪比和对比度较高.

1 模型与算法

传统 2D GS 算法为单个输入平面和单个输出平面上各自引入振幅约束条件,利用傅里叶变换在两个平面间进行迭代,最终令输入平面为纯位相分布,输出平面的振幅与给定目标近似而位相由迭代过程产生.2D GS 算法收敛速度快,但仅可用于求解单个输出平面的情况下,输入平面的复振幅分布.3D GS 算法继承了 2D GS 算法的高效性,并把作用

* 国家自然科学基金(10934011、10774193)资助

[†] Tel.:020-84110277 Email:stszjy@mail.sysu.edu.cn

收稿日期:2010-02-11

修回日期:2010-04-22

范围推广到多个输出平面的情况. 由于被点光源照明的傅里叶全息图再现于点光源的共轭像面, 以不同位置的点光源同时照明一幅全息图, 就可以同时得到沿光轴分布、对应于不同点光源的再现光场. 所以, 可以利用构造等效点光源的方法把发散球面波因子编码到全息图中, 获得多个输出平面的图像再现.

3D GS 算法的流程: 1) 把一个 3D 物体划分成 N 个垂直于光轴的图层; 2) 把第 i ($i=1, 2, \dots, N$) 个图层的振幅取值为零的像素替换为较小的取值, 作为第 i 层目标图像的振幅. 把第 i 层目标图像的振幅作为第 i 层再现像的初始振幅, $0 \sim 2\pi$ 内的随机数作为初始位相; 3) 分别计算对应于这 N 个图层的发散球面波因子; 4) 各再现像面分别做逆傅里叶变换, 除以对应的发散球面波因子后相加, 得到全息图 H ; 5) 保留全息图 H 的位相, 而令其振幅为常量 1, 得到位相型全息图 PH ; 6) 令 PH 乘以第 i 个平面的发散球面波因子并做傅里叶变换, 得到第 i 层的再现像. 若迭代次数大于给定值, 算法结束, 返回 PH ; 否则保留再现像的位相, 振幅替换为目标图像的振幅, 重复 4)~6).

2 实验与分析

实验中使用 Holoeye 公司制造的反射型振幅-位相硅基液晶 (Liquid Crystal on Silicon, LCoS) LC-R 2500, 分辨率 1024×768 , 像素尺寸为 $19 \times 19 \mu\text{m}^2$, 填充率 93%. LCoS 以 DVI 接口连接计算机, 利用显卡传送过来的 8 位数据进行电寻址, 可加载灰度介于 $0 \sim 255$ 的灰度图. 鉴于 LC-R 2500 为 45° 扭曲向列相液晶, 具有振幅和位相调制特性, 反射光偏振态随入射光偏振态和所加电压改变, 需要与起偏器、检偏器配合使用. 激光波长为 532 nm, 设置 LCoS 工作于偏位相调制状态 (Phase Mostly Condition, PMC): 具有 2π 位相调制度, 出射光强在小范围内波动.

首先测定 LCoS 的灰度-位相和灰度-光强关系. 从激光器出射的激光为竖直偏振方向, 定义竖直方向为 0° , 起偏器取 145° , 检偏器取 132° , 入射光束与 LCoS 法线夹角约 2° . 图 1(a) 是灰度-位相曲线, 可以看到位相随灰度单调增大, 调制深度达到 2.08π . 图 1(b) 是归一化光强与灰度的对应关系, 光强波动不超过 30%, 满足偏位相调制的条件.

根据灰度-位相曲线, 把位相型计算全息图转换为灰度全息图, 光学再现与可视化的光路如图 2. 选择量子点作为接收图像的发光材料.

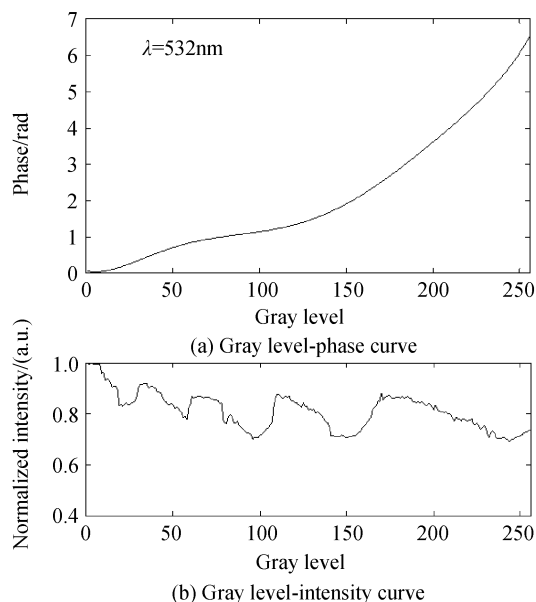


图 1 LCoS 的灰度-位相和灰度-光强曲线

Fig. 1 The gray level-phase and gray level-intensity curves of LCoS

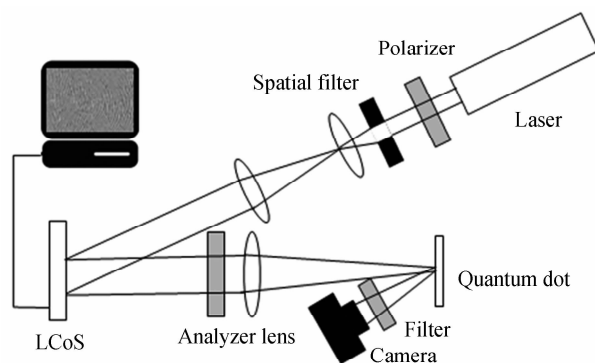


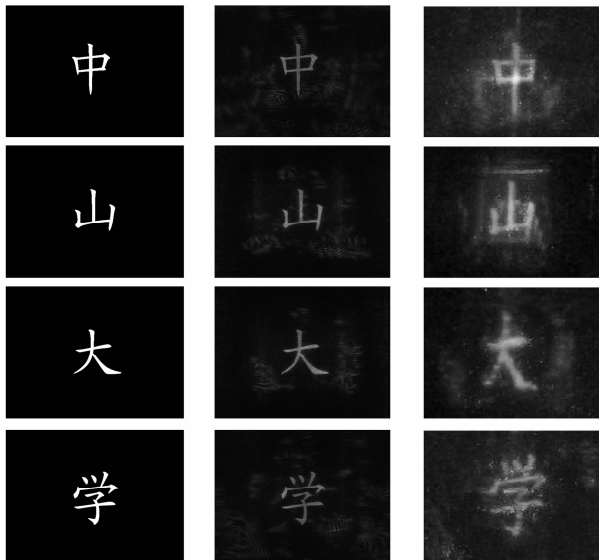
图 2 光学再现与可视化光路

Fig. 2 Experimental setup for optical reconstruction and visualization

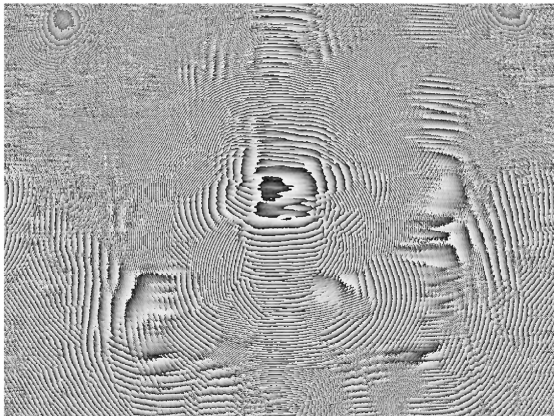
量子点 (Quantum Dot, QD), 即半导体纳米晶体, 是由数目极少的原子或分子组成的原子团簇, 主要是 II~VI 族或 III~V 族元素. 当 QD 的颗粒尺寸小于其玻尔直径时, 导带和价带呈分立能级. 光照射到半导体上, 价带上的电子吸收光子后跃迁到导带, 导带上的电子跃迁回价带时, 空穴-电子对复合产生荧光, 具有很强的荧光发射能力和光化学稳定性. 本实验所用的 QD 是武汉珈源量子点技术开发有限公司生产的油性 CdSe/ZnS 量子点, 荧光峰位于 633 nm, 荧光量子产率 $\geq 60\%$. 将量子点溶液填充到玻璃槽内, 构造一个有效尺寸为 $20 \times 8 \times 1 \text{ mm}^3$ 的发光屏, 放置在 3D 图形再现的位置上, 用滤波片滤去激发光, 可以直接观察再现图像.

成像透镜的焦距是 20 cm, 目标图像是沿光轴方向分布的“中”、“山”、“大”、“学”四个字, 像距分别是 20、23、26 和 29 cm. 分别在这四个位置放置发光

屏接收再现像,并用照相机拍摄,拍摄角度与光轴夹角约 30° ,为降低其他衍射级的干扰,以下只显示零级衍射像.图 3(a)是目标图像、数字再现像与光学再现像的对比图.目标图像是黑白图像;数字再现像是灰度图,除准确再现了图像主体外还附加了部分噪音,对比度低于原图;光学再现像大小约 $5 \times 5 \text{mm}^2$,笔画连贯,清晰可辨.图 3(b)是由计算全息图转换而成的灰度全息图.



(a) Target, numerical reconstruction and optical reconstruction



(b) Computer-generated hologram

图 3 实验结果

Fig. 3 The experimental results

数字再现和光学再现的对比度与信噪比如表 1. 对比度根据均方根对比度的定义^[16]计算.无论是数字再现还是光学再现,各平面的对比度和信噪比都具有较好的均匀性.但光学再现的对比度是数字再现的 2 倍.以目标图像作为信号定义数字再现的信噪比,体现了计算机模拟结果与目标图像的吻合程度,四幅图的信噪比均大于 1.5;以数字再现图像作为信号定义光学再现的信噪比,体现了光学再现

表 1 数字再现和光学再现质量

Table 1 The quality of numerical reconstruction and optical reconstruction

	Numerical reconstruction				Optical reconstruction			
	中	山	大	学	中	山	大	学
Contrast	0.05	0.06	0.06	0.06	0.11	0.16	0.13	0.13
SNR	1.57	1.73	1.72	1.54	4.22	4.25	4.83	4.27

与计算机模拟结果的吻合程度,四幅图的信噪比均大于 4.2,可见光学再现与计算机模拟结果较吻合.

影响信噪比的主要因素是零级衍射斑.由于调制器的填充率只有 93%,部分未被调制的入射光直接聚焦形成零级衍射斑,它出现在成像透镜的后焦面上,即第一层的“中”字中心的圆斑.继续传播的过程中光束散开,在主体图像四周形成矩形光斑.避免零级衍射斑干扰再现光场的方法是在计算全息图上叠加二维数字闪耀光栅^[17],使光能集中到某个一级像上,同时在焦面上遮挡零级衍射斑.

零级再现像的衍射效率只有 35.4%,有三方面原因:一是 LCoS 的衍射效率低于 100%,液晶分子的吸收和散射损耗了部分能量;二是检偏器阻挡了部分反射光;三是调制器的栅格结构可以看作一个二维光栅,再现出多级衍射像,光能分散到各级衍射像上,不能充分利用.

3 结论

本文分析了 3D GS 算法的原理,利用它设计了位相型傅里叶变换全息图.测量了 LCoS 的灰度-位相曲线和灰度-光强曲线,把位相型全息图转换为灰度图.搭建了实验系统,令 LCoS 工作于偏位相调制模式,利用量子点材料实现了 3D 再现图像的可视化.再现像清晰连贯,与数字再现结果相当吻合.下一步,本课题组计划改进算法和光学系统,提高衍射效率、对比度和信噪比.考虑到 LCoS 的最大帧频达 75 Hz,如果预先算好 3D 图像的一系列沿光轴方向的 2D 切面的计算全息图并依次加载在 LCoS 上,相当于一个扫描的过程,利用人眼的视觉暂留,可以在空间中还原出 3D 光场,利用具有一定厚度的双光子材料实现 3D 图像的全尺度可视化.本文介绍的方法在 3D 显示、全息光镊、三维光子器件制备、军事和医学等领域具有很高的应用价值.

致谢 衷心感谢谢向生博士和吴琦硕士在实验上的帮助和有益讨论.

参考文献

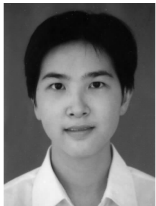
- [1] ZHENG Hua-dong, YU Ying-jie, CHENG Wei-ming. A review on three-dimensional display techniques[J]. *Optical Technique*, 2008, **34**(3): 426-434.
郑华东,于瀛洁,程维明.三维立体显示技术研究新进展[J].光学技术,2008,**34**(3):426-434.
- [2] LANGHANS K, BAHR D, BEZECNY D, *et al.* FELIX 3D display: an interactive tool for volumetric imaging[C]. *SPIE*, 2002, **4660**: 176-190.
- [3] HAIST T, SCHKLEBER M, TIZIANI H J. Computer-generated holograms from 3D-objects written on twisted-nematic liquid crystal displays[J]. *Opt Commun*, 1997, **140**(1-6): 299-308.
- [4] SINCLAIR G, LEACH J, JORDAN P, *et al.* Interactive application in holographic optical tweezers of a multi-plane Gerchberg-Saxton algorithm for three-dimensional light shaping[J]. *Opt Express*, 2004, **12**(8): 1665-1670.
- [5] YAMAJI M, KAWASHIMA H, SUZUKI J, *et al.* Three dimensional micromachining inside a transparent material by single pulse femtosecond laser through a hologram[J]. *Appl Phys Lett*, 2008, **93**(4): 1-3.
- [6] ITO T, SHIMOBABA T, GODO H, *et al.* Holographic reconstruction with a 10 μ m pixel-pitch reflective liquid-crystal display by use of a light-emitting diode reference light[J]. *Opt Lett*, 2002, **27**(16): 1406-1408.
- [7] LI J T, LIU Y K, XIE X S, *et al.* Fabrication of photonic crystals with functional defects by one-step holographic lithography[J]. *Opt Express*, 2008, **16**(17): 12899-12904.
- [8] XIE X S, LI M, GUO J, *et al.* Phase manipulated multi-beam holographic lithography for tunable optical lattices[J]. *Opt Express*, 2007, **15**(11): 7032-7037.
- [9] ZHANG P Q, GUAN Y F, XIE X S, *et al.* Phase controlled beam combining with nonlinear frequency conversion[J]. *Opt Express*, 2010, **18**(3): 2995-2999.
- [10] LU Jin-hong, XIE Xiang-sheng, ZHANG Pei-qing, *et al.* Submicron-sized optical fabrication with DMD based lithography[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(4): 600-604.
陆锦洪,谢向生,张培晴,等.基于数字微镜器件亚微米制备技术研究[J].光子学报,2010,**39**(4):600-604.
- [11] MAKOWSKI M, SYPEK M, KOLODZIEJCZYK A, *et al.* Iterative design of multiplane holograms: experiments and applications[J]. *Opt Eng*, 2007, **46**(4): 1-6.
- [12] MAKOWSKI M, SYPEK M, KOLODZIEJCZYK A, *et al.* Three-plane phase-only computer hologram generated with iterative Fresnel algorithm[J]. *Opt Eng*, 2005, **44**(12): 1-7.
- [13] CHAO Ya-feng, WANG Ding. A new algorithm for computer generated hologram of 3-D objects[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2007, **5**(6): 77-80.
巢亚锋,王丁.一种新的三维计算全息图的计算方法[J].光学与光电技术,2007,**5**(6):77-80.
- [14] HOU Rui-ning, WANG Ding. The study of fresnel computer-generated hologram of 3-D object [J]. *Infrared Technology*, 2008, **30**(7): 403-405.
侯瑞宁,王丁.三维物体菲涅耳计算全息图的研究[J].红外技术,2008,**30**(7):403-405.
- [15] ZHANG Xiao-jie, LIU Xu, CHEN Xiao-xi. Study of CGH for 3D image using fresnel zone [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2004, **31**(12): 58-67.
张晓洁,刘旭,陈晓西.利用菲涅尔波带法计算三维全息[J].光电工程,2004,**31**(12):58-67.
- [16] PELI E. Contrast in complex images[J]. *JOSA A*, 1990, **7**(10): 2032-2040.
- [17] YU Ying-jie, WANG Tao, ZHENG Hua-dong. Optimization of optoelectronic reconstruction of phase hologram by use of digital blazed grating[J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, **58**(5): 3154-3160.
于瀛洁,王涛,郑华东.基于数字闪耀光栅的位相全息图光电再现优化[J].物理学报,2009,**58**(5):3154-3160.

Reconstruction and Visualization of Multi-plane Images Based on Spatial Light Modulator

LIANG Yan-ming, ZHANG Pei-qing, GUAN Ye-feng, LI Li, ZHOU Jian-ying
(State Key Laboratory of Optoelectronic Materials and Technologies, Sun Yat-sen University,
Guangzhou 510275, China)

Abstract: In order to achieve a real-time and visual observation of multi-plane images, a method using light-emitting materials is proposed. A 3D object can be divided into a series of 2D slices along the optical axis. With an efficient and fast 3D Gerchberg-Saxton algorithm, a computer-generated phase hologram is obtained and a numerical reconstruction is carried out on the computer. The process of 3D Gerchberg-Saxton algorithm is expounded, and the experiment for reconstruction and visualization of multi-plane images based on LC-SLM is conducted. With the grey level-phase curve of the LC-SLM, the computer-generated phase hologram is converted to gray-scale hologram, which is loaded to the LC-SLM to reconstruct the 3D light fields. The fluorescence characteristic of quantum dot materials is used to achieve the visualization of the light fields. Experimental results show that the optical reconstruction is in good agreement with numerical simulation. This technique is applicable in medicine, military, 3D display, micromachining and micro-technology.

Key words: Holography; 3D light field; 3D Gerchberg-Saxton algorithm; Visualization



LIANG Yan-ming was born in 1985. She is currently working for her M. S. degree at State Key Laboratory of Optoelectronic Materials and Technologies, Sun Yat-sen University. Her research interests focus on information optics.



ZHOU Jian-ying was born in 1957. He received the Ph. D. degree from Imperial College. Now he is a professor and his current research interests focus on 3D imaging and information optics.