

计算全息再现像放缩技术

韩哲^{1,2}, 亓岩^{1*}, 王延伟¹, 颜博霞¹

¹中国科学院光电研究院投影光学实验室, 北京 100094;

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 在物体原始计算全息图基础上, 基于 Gerchberg-Saxton 迭代算法, 给出了一种全息图的再现像放缩算法。该算法利用物像关系原理, 通过设定恰当的参数, 在指定再现位置处实现再现像任意比例的放缩, 能有效避免放大比例过大导致的照明不均匀等问题。在 MATLAB 平台进行数值模拟, 搭建基于硅基液晶纯相位空间光调制器的全息再现光路对算法进行验证, 在特定衍射位置处得到一张二值化图片在缩放比例分别取 0.5、2 和 3 时的再现像。对一张灰度图像放大再现, 分析该算法对再现像成像效果的影响。实验结果证明, 算法实现了预期的再现像放大缩小, 并且有效地提升了再现像的成像质量。

关键词 全息术; 再现像; 图像放缩; 迭代算法; 计算全息

中图分类号 O438.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0509001

Zoom Technology of Reconstructed Images of Computer Generated Holograms

Han Zhe^{1,2}, Qi Yan¹, Wang Yanwei¹, Yan Boxia¹

¹Laboratory of Projection Optics, Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Based on the original computer-generated hologram (CGH) of an object, a zooming algorithm of the reconstructed image of CGH is presented based on the Gerchberg-Saxton iterative algorithm. Based on the principle of object-image relationships and the setting of appropriate parameters, this algorithm achieves reproduction at any given zooming factor in the specified reproduction position, which can effectively avoid the problems such as uneven lighting caused by excessive enlargement zooming. Numerical simulation is operated on MATLAB platform a holographic reconstruction optical path based on liquid crystal on silicon spatial light modulator with pure phase is built to verify the algorithm. Reconstructed images of a binary picture with zoom factors of 0.5, 2 and 3 are obtained respectively at a specified diffraction position. A grayscale picture is enlarged to analyze the imaging effect of this algorithm. The experimental results show that the expected image zooming is obtained and the quality of reconstructed images is effectively improved.

Key words holography; reconstructed image; image zooming; iterative algorithm; computer-generated hologram

OCIS codes 090.1760; 190.1995; 190.2870

1 引 言

继 1947 年英国物理学家 Gabor 发明全息术后, 这一技术便吸引了众多科研工作者的关注。经过几十年的发展, 基于空间光调制器 (SLM) 的计算全息 (CGH) 技术日渐成熟, 逐渐成为全息技术研究

的主流^[1]。如今, CGH 已经应用于科学技术的诸多方面, 其中全息三维显示和全息光刻被认为是具有巨大潜力的技术, 将成为下一代三维显示和光刻机的核心技术。三维显示往往希望得到大尺寸、大视场和真三维的投影效果, 由此获得更好的视觉体验; 而光刻技术则要求得到分辨能力更高、刻蚀速度更

收稿日期: 2017-12-11; 收到修改稿日期: 2018-01-04

基金项目: 国家重点研发计划 (2016YFB0402003)

作者简介: 韩哲 (1993—), 男, 硕士研究生, 主要从事计算全息技术及应用方面的研究。E-mail: hanzhe_siom@163.com

导师简介: 亓岩 (1980—), 女, 博士, 高级工程师, 硕士生导师, 主要从事激光显示技术方面的研究。

E-mail: qiyan@aoe.ac.cn (通信联系人)

快的投影系统,以提高光刻的质量和效率。CGH 三维显示技术真三维的显示特性为下一代三维显示提供了一条极其诱人的技术路线,但其再现像尺寸过小一直是全息三维显示的一个瓶颈。另外,CGH 给光刻技术提供了一种可行的并行处理方案,可以极大地提高光刻的效率。然而,受 SLM 及全息掩模板制作工艺的限制,全息再现像无法获得足够小的尺寸以应用到更高精度的光刻技术中^[2]。由此,CGH 再现像的放缩技术就显得尤为重要。

当前实现 CGH 再现像的放缩主要有两种方式^[3]。一种是通过球面光波再现全息图或者直接在全息图上附加透镜相位因子。这种处理方式使得放缩比例与衍射距离有关,从而会改变再现距离,不能实现在某一特定距离处的任意比例放缩,直接影响到全息技术在显示及光刻中的应用。另外,球面光波照明方法要求对光源做相应的处理,需要附加相应的光学系统,增加了系统的复杂性,同时增加了成本。本文提到的方法只是对相息图做相应的修改,且照明光采用恒定的平行平面光,得到的整体再现光路简单,又再现时不需调节光路,成本低。另一种是通过附加后端光学系统实现。附加的光学系统增加了再现光路的复杂性,且在再现时应精密调节各光学元件,并会引入新的光阑,从而会对全息光刻投影的分辨能力造成影响。中国科学院光电研究院王皓等^[4]提出一种利用傅里叶变换的相似性定理对再现像进行放大的技术。该算法的实质是在迭代过程中放大原物光波的空间频率,在算法的每次迭代过程中都需附加乘除运算,增加了全息图的计算耗时;另外,单纯地放大原物体的空间频率并不会扩大照明光束的照明范围,从而导致在放大放缩比例时再现

像边缘不清晰,限制了放缩比例的选择。

为了实现在设定距离处再现像任意比例的放缩,且不增加再现光学系统的复杂性,本文提出了一种基于应用光学中物像关系原理的算法,通过在全息图上附加透镜相位并恰当设定衍射距离,对再现像二次成像,实现再现像的放缩,可有效避免放大比例过大导致的照明不均匀等问题。

2 全息再现像放缩原理

2.1 Gerchberg-Saxton (G-S)迭代算法

采用 G-S 迭代算法计算全息图,其中采用角谱算法计算菲涅耳衍射积分^[5-6],即

$$U(x, y) = \mathcal{F}^{-1} \langle \mathcal{F}[U_0(x_0, y_0)] \exp\left\{j \frac{2\pi}{\lambda} d \left[1 - \frac{\lambda^2}{2} (\xi^2 + \eta^2)\right]\right\} \rangle, \quad (1)$$

式中 $U_0(x_0, y_0)$ 为衍射起点处的复振幅分布, $U(x, y)$ 为衍射终点处的复振幅分布, λ 为波长, d 为衍射距离, (ξ, η) 为相应的空间频率坐标, \mathcal{F} 、 \mathcal{F}^{-1} 分别为傅里叶变换和傅里叶逆变换。G-S 迭代算法的运算流程如图 1 所示^[7-8]。

从图 1 的流程图可以看出,可以根据实际实验条件设定(1)式中的取样间隔及衍射距离从而计算出对应的纯相位全息图。一般而言,取样间隔由再现光路中 SLM 的像素大小决定,而衍射距离可以根据实际需要任意选定。

2.2 二次成像法实现再现像放大

由 2.1 节的讨论可知,采用 G-S 算法计算全息图时,衍射距离可以根据需要被设定为任意值;根据计算菲涅耳衍射积分的角谱算法的相关理论可以知

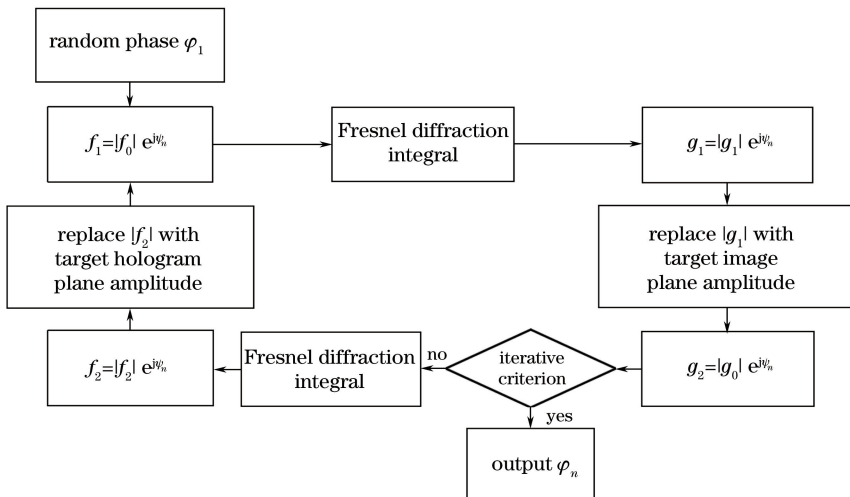


图 1 G-S 算法流程图

Fig. 1 Flowchart of G-S iterate algorithm

道,在用平面平行光照射时,无论衍射距离取什么值,在再现位置处得到的像部是大小相等的。如果在得到的全息图上附加一个透镜相位因子^[9],即

$$P_{\text{lens}} = \exp\left[-j \frac{\pi}{\lambda f'}(x^2 + y^2)\right], \quad (2)$$

式中 λ 、 f' 分别为透镜相位因子对应的波长和焦距,则附加虚拟透镜后得到的效果,即是用一个紧贴全息图的透镜对原有的再现像进行二次成像的效果。设原衍射再现距离为 l ,附加透镜相位因子后衍射再现距离为 l' ,则 l 、 l' 和 f' 应满足的物像关系^[10]为

$$\frac{1}{l'} - \frac{1}{l} = \frac{1}{f'}. \quad (3)$$

此时再现像的放缩比例为

$$\beta = \frac{l'}{l}. \quad (4)$$

以上所述为目前主要的CGH再现像的放缩算法。容易看出,如果想实现再现像某一比例的放缩,则再现距离也会按照同样的比例放大缩小,而在实际的全息投影中并不希望再现距离也随之改变,即希望 l' 是一个固定不变的值,则在 l' 和 β 为已知的情况下,联立(3)式和(4)式即可得到

$$\begin{cases} l = \frac{l'}{\beta} \\ f' = \frac{l'}{1 - \beta} \end{cases}. \quad (5)$$

根据(5)式,在程序中设定合适的 l 和 f' ,即可得到在某一特定距离处任意比例的放缩再现像。

另外,如果对未附加透镜相位因子的全息图取共轭,采用相同的平面平行光照射,则会在原再现像的相反方向且衍射距离相同处成一相同大小的虚像,之后通过附加透镜相位因子对这一虚像进行二次成像,实现在任一再现距离处对再现像任意比例的放缩,获得的再现像为一倒立像。实像二次成像

放大与虚像二次成像放大的差别在于附加透镜相位因子的焦距正负性相反,二者分别对入射光束具有会聚和发散作用,合理选择这两种放缩方法将会对成像效果有所改善。

3 实验结果与分析

搭建了基于硅基液晶(LCOS)纯相位SLM的CGH再现光路,如图2所示。该光路由光源、扩束器、SLM和屏幕等部分组成,光源采用波长为532 nm的激光。激光束通过空间滤波器和准直透镜被扩束成平面平行光之后入射到SLM(Pluto-VIS, Holoeye, 德国)的面板上。全息图通过计算机加载到SLM,入射平面平行光经SLM调制后经过一定衍射距离后,在屏幕上显示出再现像。

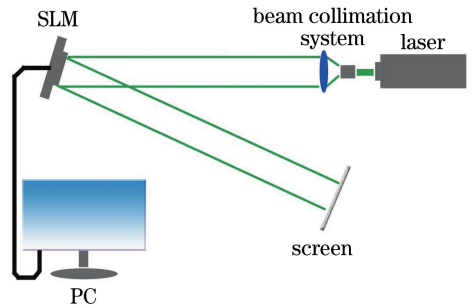


图2 基于SLM的CGH显示系统示意图

Fig. 2 Schematic of CGH display system based on SLM

实验首先采用传统G-S迭代算法在不附加透镜相位因子的条件下计算了一张黑白同心圆环的全息图,图像大小为1000 pixel×1000 pixel,衍射再现距离 l' 设置为500 mm。因为再现像中0级光斑占据了再现光中大部分的能量^[11-12],所以在全息图上附加了周期为2 pixel的闪耀光栅相位,将+1级再现像移动到0级光斑处以充分利用0级光的能量^[13]。得到的全息图、数值再现像及光学再现像如图3所示。

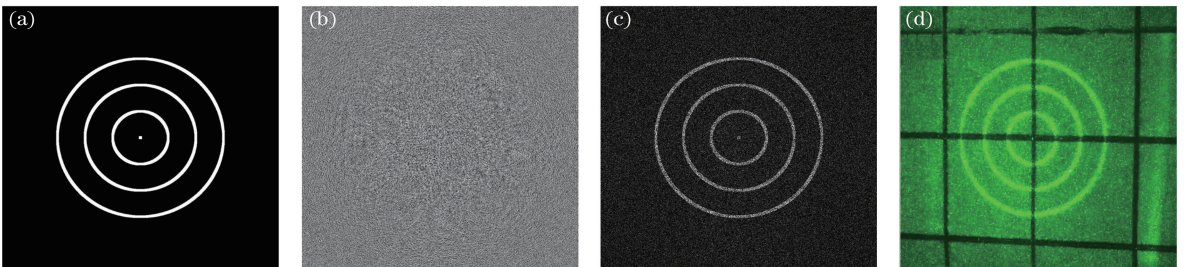


图3 图像记录与再现。(a)原图;(b)全息图;(c)数值再现像;(d)光学再现像

Fig. 3 Image recording and reconstruction. (a) Original image; (b) hologram; (c) numerical reconstruction image; (d) optical reconstructed image

在此基础上,根据 2.2 节的理论分别计算上述图形在原再现位置处放缩比例分别取 0.5、2 和 3 时所对应的全息图。根据(5)式,已知 $l'=500$ mm,当 β 为 0.5、2 和 3 时得到的物距 l (即原衍射再现距离)分别为 1000、250 和 167 mm, f' 分别为 1000、

-500 和 -250 mm。在算法程序中依次按不同放缩比例设定好两个参数,计算得到对应的全息图,并对该全息图进行光学再现,获得的结果如图 4 所示。为便于比较,采用带等间距方格的屏幕,方格边长为 5 mm。

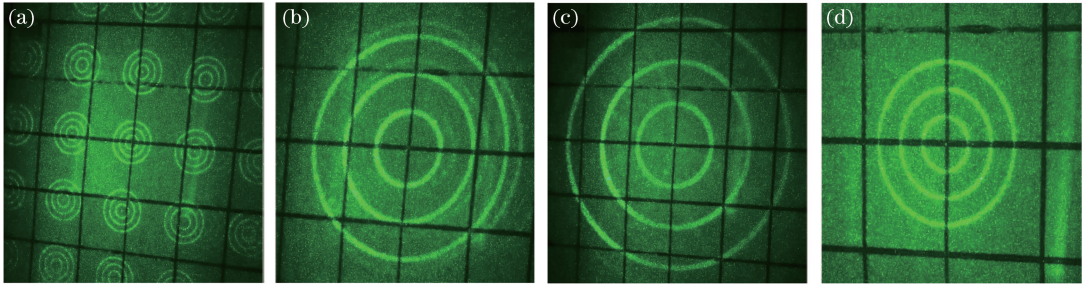


图 4 光学再现像。放缩比例取(a) 0.5、(b) 2 和(c) 3 的再现像;(d)原图

Fig. 4 Optical reconstructed images. Optical reconstructed images with zoom factors of (a) 0.5, (b) 2 and (c) 3; (d) original image

再采用 2.2 节中提到的实像二次成像放大法和虚像二次成像放大法分别计算并再现一张灰度图像的 2 倍和 4 倍放大全息图。采用实像放大法时,取 β 为 2 和 4,则对应的 l 分别为 250 mm 和 125 mm,

f' 分别为 -500 mm 和 -167 mm;采用虚像放大法时,取 β 为 -2 和 -4,则对应的 l 分别为 -250 mm 和 -125 mm, f' 分别为 167 mm 和 100 mm。在算法中设定好两个参数,得到的结果如图 5 所示。

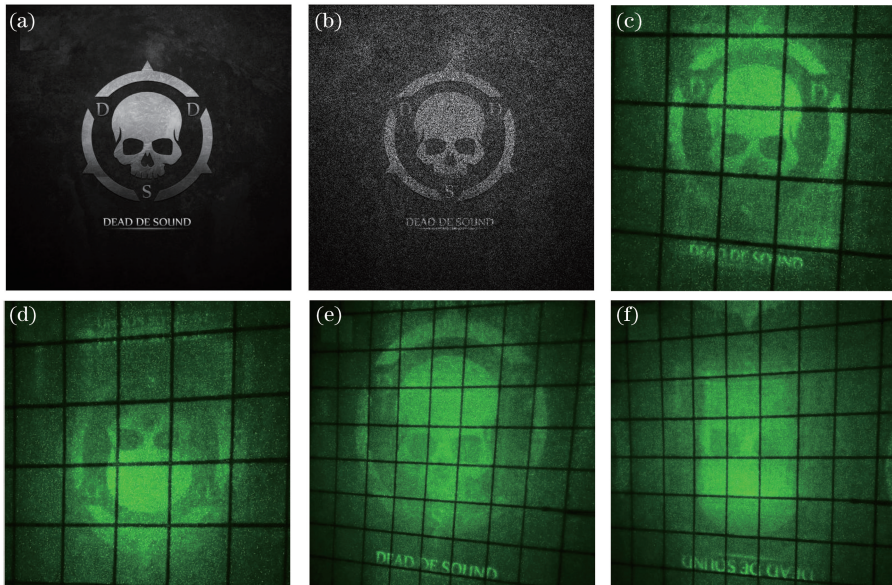


图 5 原图和再现像。(a)原图;(b)数值再现像;(c) 2 倍实像放大再现像;(d) 2 倍虚像放大再现像;(e) 4 倍实像放大再现像;(f) 4 倍虚像放大再现像

Fig. 5 Original image and reconstructed images. (a) Original image; (b) numerical reconstruction image; reconstructed images of (c) real and (d) virtual image with the zoom factor of 2; reconstructed image of (e) real and (f) virtual image with the zoom factor of 4

实像放大法附加的透镜相位因子的焦距为负,其相当于一个发散透镜,对整体再现光束具有发散作用;虚像放大法附加的透镜相位因子的焦距为正,其相当于一个会聚透镜,对整体再现光束具有会聚作用。从

图 5 可以看出,实像放大法照明范围大,成像整体较清晰;虚像放大法因为照明光束过于会聚,再现像边缘处不能被充分照明故成像不清晰,如图 5(f)所示,原图像边缘的圆环部分已经完全不能成像。

另外,若想使再现像缩小,或者成像区域只占屏幕中间很小的一块区域,则希望光能充分会聚于成像区域以提高图像亮度,此时可附加会聚透镜相位因子。合理选择实像放缩法或者虚像放缩法可使照明光束的能量得到充分利用,同时避免再现像放大时边缘处成像不清晰等问题,提升成像的质量。

4 结 论

基于 G-S 迭代算法,给出了一种计算全息再现像的放缩算法,实现在某一特定衍射距离上对再现像任意比例的放缩,算法避免了在再现光路中附加复杂的光学系统,以及由放大比例过大导致的照明不均匀等问题。然而,再现像中由 SLM 的像素结构导致的高阶衍射像会与成像部分重叠,造成成像不清晰。

参 考 文 献

- [1] Gabor D. A new microscopic principle[J]. Nature, 1948, 161(4098): 777-778.
- [2] Liu Y J, Xuan L, Hu L F, *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.
- [3] Wang H. Study of experiment on the key techniques of three-dimensional display based on computer generated holography [D]. Beijing: Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2013: 49-50.
王皓. 计算全息三维显示关键技术的实验研究 [D]. 北京: 中国科学院光电研究院, 2013: 49-50.
- [4] Wang H, Bi Y, Li F, *et al.* Enlargement technology of reconstructed image of computer generated hologram based on spatial light modulator [J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(3): 0309001.
王皓, 毕勇, 李芳, 等. 基于空间光调制器的计算全息再现像放大技术 [J]. 中国激光, 2013, 40(3): 0309001.
- [5] Zhang J Q. Study on the fast algorithm of computer-generate hologram [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2013: 18.
张健强. 计算全息快速算法的研究 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2013: 18.
- [6] Yu W T, Zhang H L, Deng H, *et al.* Augmented reality three-dimensional display system based on holographic optical element [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(10): 1009001.
余文涛, 张汉乐, 邓欢, 等. 基于全息光学元件的增强现实 3D 显示系统 [J]. 中国激光, 2016, 43(10): 1009001.
- [7] Li F. Fundamental algorithm research of laser computer holographic three dimensional display [D]. Beijing: Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2013: 20.
李芳. 激光计算全息三维显示基础算法研究 [D]. 北京: 中国科学院光电研究院, 2013: 20.
- [8] Liang Y S, Yao B L, Ma B H, *et al.* Holographic optical trapping and manipulation based on phase-only liquid-crystal spatial light modulator [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(03): 0309001.
梁言生, 姚保利, 马百恒, 等. 基于纯相位液晶空间光调制器的全息光学捕获与微操纵 [J]. 光学学报, 2016, 36(03): 0309001.
- [9] Goodman J W. Introduction to Fourier optics [M]. Qin K C, Liu P S, Chen J B, *et al.* Transl. 3rd ed. Beijing: Electronic Industry Press, 2011: 70-72.
古德曼. 傅里叶光学导论 [M]. 秦克诚, 刘培森, 陈家璧, 等, 译. 3 版. 北京: 电子工业出版社, 2011: 70-72.
- [10] Shi X S, Wang X E, Liu J S. Physical optics and applied optics [M]. 2nd ed. Xi'an: Xidian University Press, 2008: 340-342.
石顺祥, 王学恩, 刘劲松. 物理光学与应用光学 [M]. 2 版. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2008: 340-342.
- [11] Zhang H, Xie J H, Liu J, *et al.* Optical reconstruction 3D images by use of pure-phase computer generated holograms [J]. Chinese Optics Letters, 2009, 7(12): 1101-1103.
- [12] Arrizón V, Carreón E, Testorf M. Implementation of Fourier array illuminators using pixelated SLM: efficiency limitations [J]. Optics Communications, 1999, 160(4-6): 207-213.
- [13] Zheng H D. Study on the key techniques of three-dimensional display based on optoelectronic holography [D]. Shanghai: Shanghai University, 2009: 90-91.
郑华东. 数字全息三维立体显示关键技术研究 [D]. 上海: 上海大学, 2009: 90-91.