

# 基于有效视角图像切片嵌合的白光再现 全息体视图打印方法

韩超<sup>1</sup>, 蒋晓瑜<sup>1\*</sup>, 樊帆<sup>1,2</sup>, 王晨卿<sup>1</sup>, 张腾<sup>1</sup>, 闫兴鹏<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国人民解放军陆军装甲兵学院信息通信系, 北京 100072;

<sup>2</sup>中国人民解放军陆军研究院建设与发展研究所, 北京 100012

**摘要** 全息体视图技术是全息显示技术的研究热点, 简要介绍了一种有效视角图像切片嵌合 (EPISM) 的单步全息体视图打印方法, 通过单步打印可以获得凸出于全息干板的再现像, 实现传统两步法的打印效果。为了实现白光再现, 提高 EPISM 方法的实用性, 分析了参考光光强对再现像亮度的影响, 以及场景深度对再现像质量的影响。给出了白光再现的条件, 并实现了 EPISM 方法全息体视图的白光再现。

**关键词** 全息; 全息体视图; 白光再现; 光强比

中图分类号 O438.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.120901

## Printing Method of Holographic Stereogram Reconstructed with White Light Based on Effective Perspective Image Segmentation and Mosaicking

Han Chao<sup>1</sup>, Jiang Xiaoyu<sup>1\*</sup>, Fan Fan<sup>1,2</sup>, Wang Chenqing<sup>1</sup>, Zhang Teng<sup>1</sup>, Yan Xingpeng<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Information Communication, Academy of Army Armored Forces, Chinese People's Liberation Army, Beijing 100072, China;

<sup>2</sup>Institute of Construction and Development, Army Academy, Chinese People's Liberation Army, Beijing 100012, China

**Abstract** Holographic stereogram printing technology is a research hot spot of holographic display technology. This paper briefly introduces a single-step holographic stereogram printing method based on effective perspective image segmentation and mosaicking (EPISM). The single-step printing can obtain reconstructed image protruding from the holographic plate and achieve the printing effect of traditional two-step method. In order to realize white light reconstruction and improve the practicability of the EPISM method, the influence of the reference light intensity on brightness of the reconstructed image and the influence of scene depth on the quality of the reconstructed image are analyzed. The conditions of white light reconstruction are proposed, and the white light reconstruction of holographic stereogram by EPISM method is realized.

**Key words** holography; holographic stereogram; white light reconstruction; light intensity ratio

**OCIS codes** 090.2870; 090.2890; 090.1995

## 1 引言

全息体视图技术是利用人眼分辨率有限的特点, 将双目视差原理与全息技术相结合, 通过离散的

二维图像逼近连续的三维物体, 使人眼观察到连续的视差信息, 进而产生立体感。

全息体视图技术是 1967 年 Pole<sup>[1]</sup>提出的, 通过一组透镜阵列记录物体不同视角的图像, 并将图像

收稿日期: 2019-08-05; 修回日期: 2019-09-11; 录用日期: 2019-10-28

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB1104500)、国家自然科学基金(61775240)、全国优秀博士学位论文作者专项资助(201432)

\* E-mail: jiangxiaoyu@gmail.com

记录到全息介质上,得到一幅体视图。1969年,Debitetto<sup>[2]</sup>解决了 Pole 体视图中分辨率的问题,打印出水平视差全息体视图。1970年,King等<sup>[3]</sup>在此基础上提出了两步转移全息体视图打印技术,获得再现像凸出于全息记录介质显示的再现效果。20世纪90年代,利用全息体视图技术实现三维立体显示的研究和应用越来越广。1991年,美国麻省理工学院的 Halle等<sup>[4-10]</sup>提出了无限远相机法的一步全息体视图打印方法。1992年,日本东京工业大学的 Yamaguchi等<sup>[11]</sup>提出了基于计算机图形处理的 Lippmann 一步全息体视图打印方法,得到 Lippmann 全息体视图。2003年,欧洲 Geola 公司的 Brotherton-Ratcliffe<sup>[12]</sup>提出了激光直写数字全息体视图打印方法。2008年,Hahn等<sup>[13]</sup>通过拼接空间光调制器构造了大视角的动态全息体视图显示系统。2010年,Takaki等<sup>[14]</sup>提出了通过物体的多角度视差图像直接生成全息体视图的方法。Hong等<sup>[15]</sup>利用全息单元交叠的方法提高了再现像的成像质量,并设计了打印系统。

传统的两步转移体视图打印过程复杂,需要二次曝光才能得到凸出于全息干板显示的再现像;无限远相机法和 Lippmann 方法得到的全息体视图再现像分辨率较低,尤其是小尺寸的全息图。本课题组<sup>[16-23]</sup>提出了一种有效视角图像切片嵌合 (EPISM) 的单步全息体视图打印方法,实现了单步打印获取凸出于全息干板显示的再现像。EPISM 方法是在两步转移体视图打印的基础上,根据光线追迹原理和光路的可逆性,将有效视角图像片段进行拼接组合,最终合成视差图像,处理过程简单、计算量小,且再现像的分辨率较高。在此基础上,通过分析 EPISM 方法的全息体视图建模和光学传递

函数,将全息体视图系统中的波前误差表示为离焦像差,选择正方形硬边光阑,构建了 EPISM 方法的全息体视图出瞳函数模型,从频域角度建立了全息体视图的光学传递函数,分析了出瞳尺寸和像差对光学传递函数的影响;结合了空间域的视觉跳变,对全息单元进行了优化。

当前使用 EPISM 方法打印的全息体视图只能在实验室环境使用激光再现,无法实现白光再现,实用性有限。参考宋修法等<sup>[24]</sup>研究的物光与参考光的强度比对数字全息再现像的影响,本文推导了全息体视图打印系统中参考光与物光强度的光强比对再现像亮度的影响和场景深度对再现像质量的影响,给出了白光再现的条件,并实现了 EPISM 方法全息体视图的白光再现。

## 2 EPISM 方法全息体视图白光再现的条件

### 2.1 EPISM 全息体视图打印方法的基本原理

EPISM 方法是在传统两步转移全息体视图打印基础上提出的一种记录全息体视图的方法。利用光线追迹原理和光路的可逆性,模拟人眼视线的锥形观察效果,通过对有效视角图像的切片嵌合,提取合成有效视角图像,并将该图像的信息记录在全息记录介质的某正方形区域内,形成全息单元,全息单元逐一曝光后就完成了全息体视图的打印。

两步转移体视图打印是将不同视角的视差图像逐个记录在  $H_1$  干板上,合成一幅全息体视图,再将  $H_1$  干板上的全息体视图转移翻印到  $H_2$  干板,如图 1 所示,得到凸出于全息干板显示的再现像,需要进行两次打印,过程复杂。

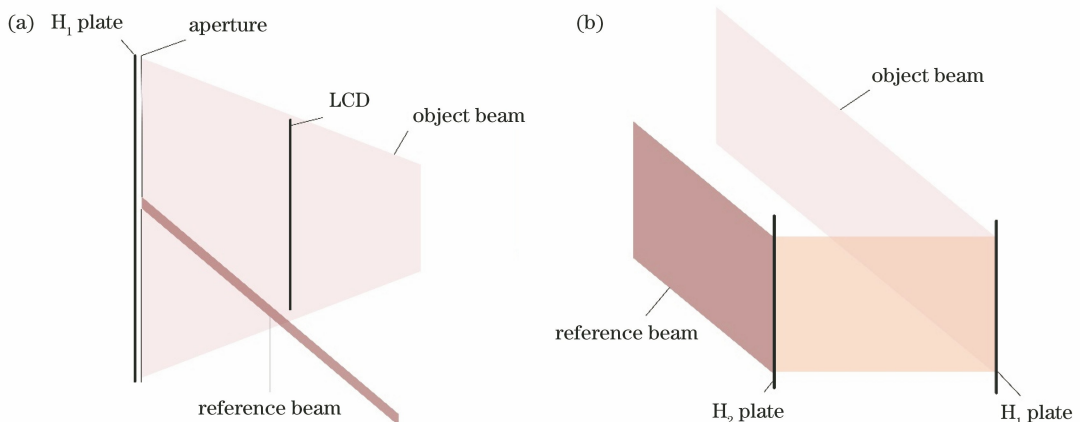


图 1 两步转移曝光法原理。(a)主全息图的制作;(b)全息图的转移

Fig. 1 Principle of two-step transfer and exposure method. (a) Production of master hologram; (b) transfer of hologram

EPISM 方法可认为是两步转移体视图打印的等效过程。其中,  $H_1$  干板是虚拟存在的, 上面的全息单元(Hogel)是通过三维建模软件采样得到的。将  $H_1$  干板上的 Hogel 通过计算合成视差图像并加载到 LCD 屏幕上, 再依次曝光打印到  $H_2$  干板, 得到最终的全息体视图。合成视差图像的原理如图 2 所示, 取  $H_2$  干板上的一个 Hogel, 以其中心点  $O$  为观察点, 观察  $H_1$  干板时会形成一个视锥, 视锥底面由所观察到的  $H_1$  干板上的多个 Hogel 组成。首先对  $H_1$  干板上的一个全息单元 Hogel0 进行观察, Hogel0 的再现像就是记录在该 Hogel 上的视角图

像, 再现像的位置就是 LCD 屏幕的位置, 因此视锥与 LCD 相交部分就是该 Hogel 对于观察点的有效视角切片,  $H_1$  干板与 LCD 的距离为  $L_1$ ,  $H_2$  干板与 LCD 的距离为  $L_2$ , 观察点  $O$  在  $H_1$  干板上截取的长度为  $L$ 。Hogel0 对应 LCD 上的  $AB$  段, 与  $O$  点连线和 LCD 屏幕相交的部分只有  $CD$  段。同理, 对视锥底面上其他的虚拟 Hogel 进行观察, 将每个 Hogel 在 LCD 上的有效部分拼接起来, 就能得到以  $O$  点为中心的 Hogel 合成视差图像。同理, 可计算  $H_2$  干板上其他 Hogel 的合成视差图像, 依次曝光记录在  $H_2$  干板上, 最终生成全息体视图。

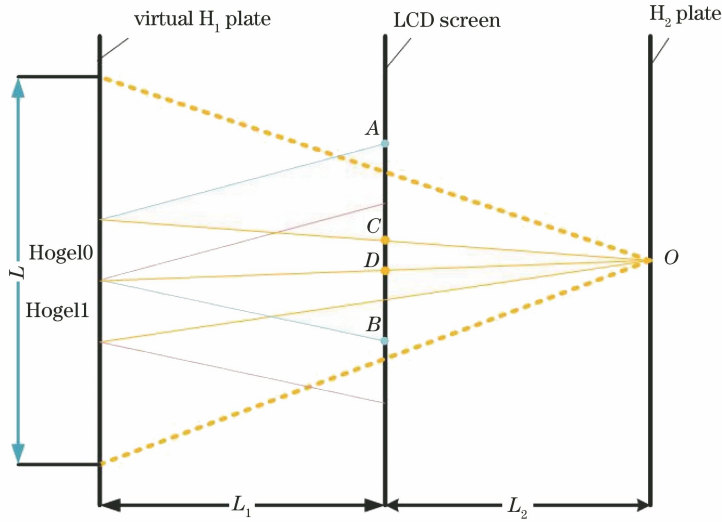


图 2 EPISM 方法全息体视图原理

Fig. 2 Holographic stereogram principle of EPISM method

## 2.2 EPISM 方法全息体视图白光再现条件

### 2.2.1 平面参考光振幅对再现像的影响

物光波前(振幅和相位信息)的全息记录是通过物光与参考光在全息干板上干涉实现的, 设物光在全息平面的复振幅分布已知, 实验中使用的是均匀的平面参考光(包括振幅和角度两个参数)。在参考光角度固定的情况下, 分析了平面参考光的振幅对再现像的亮度的影响, 全息图的波前记录原理如图 3 所示。

记录介质即全息干板位于  $xy$  平面上, 物光波前在全息干板上的复振幅分布  $O(x, y)$  为

$$O(x, y) = a_o(x, y) \exp[-j\varphi_o(x, y)], \quad (1)$$

式中,  $a_o(x, y)$  和  $\varphi_o(x, y)$  分别为物光波在全息干板上的振幅和相位分布。平面参考波在全息干板上的复振幅分布  $R(x, y)$  为

$$R(x, y) = a_r(x, y) \exp[-j\varphi_r(x, y)], \quad (2)$$

式中,  $a_r(x, y)$  和  $\varphi_r(x, y)$  分别为平面参考波在全息干板上的振幅和相位分布, 根据光学全息理论, 全息干板上光波的复振幅分布  $U(x, y)$  是物光波前  $O(x, y)$  和平面参考光波前  $R(x, y)$  的叠加, 可表示为

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

全息干板上的光强分布  $I(x, y)$  可表示为

$$I(x, y) = |U(x, y)|^2 = |O(x, y)|^2 + |R(x, y)|^2 + O(x, y)R^*(x, y) + O^*(x, y)R(x, y) = [a_o(x, y)]^2 + [a_r(x, y)]^2 + 2a_o(x, y)a_r(x, y)\cos[\varphi_o(x, y) - \varphi_r(x, y)], \quad (4)$$

式中,  $R^*(x, y)$ 、 $O^*(x, y)$  分别为参考光波前和物光波前的共轭。

由(4)式可知, 物光波和参考光波在全息干板上发生干涉后的光强分布  $I(x, y)$  分为 3 部分, 分别是物光强度分布  $I_o(x, y) = |a_o(x, y)|^2$ 、平面参考光强度分布  $I_r(x, y) = |a_r(x, y)|^2$  和承载着物光波前信息的干涉项  $I_c(x, y) = 2a_o(x, y)a_r(x, y)\cos[\varphi_o(x, y) - \varphi_r(x, y)]$ 。

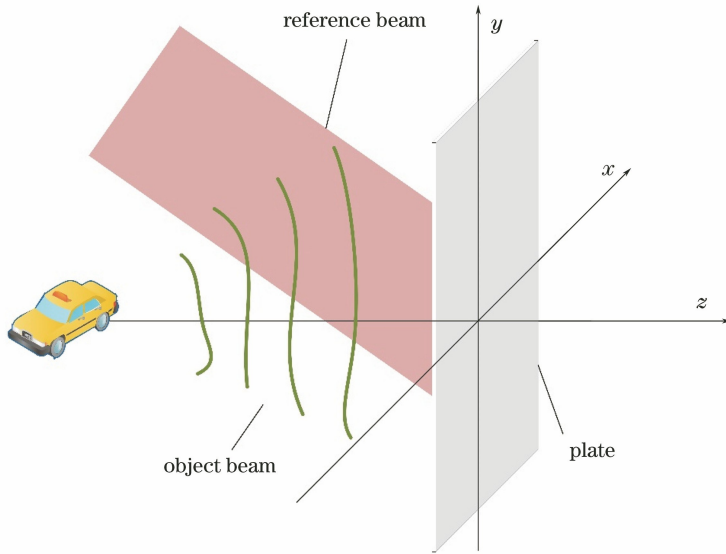


图3 全息图的波前记录

Fig. 3 Wavefront recording of hologram

若光强分布  $I_c(x, y)$  和  $I_o(x, y)$  的总光强分别为  $I_c$  和  $I$ , 则

$$I_c = \iint 2a_o(x, y)a_r(x, y)\cos[\varphi_o(x, y) - \varphi_r(x, y)] dx dy,$$

$$I = \iint \{ [a_o(x, y)]^2 + [a_r(x, y)]^2 + 2a_o(x, y)a_r(x, y)\cos[\varphi_o(x, y) - \varphi_r(x, y)] \} dx dy. \quad (5)$$

因参考光为均匀平面波, 即振幅  $a_r(x, y)$  为常数, 用  $a_r$  表示. 物光和参考光在全息干板上的总光强分别为  $I_o = \iint [a_o(x, y)]^2 dx dy$  和  $I_r = \iint a_r^2 dx dy$ , 全息干板的面积  $S = \iint dx dy$ , 则可将(5)式简化为

$$I_c = 2a_r \iint a_o(x, y) |\cos[\varphi_o(x, y) - \varphi_r(x, y)]| dx dy,$$

$$I = I_o + a_r^2 S + I_c. \quad (6)$$

将(6)式中  $a_o(x, y)$ 、 $\varphi_o(x, y)$  和  $\varphi_r(x, y)$  看作已知量, 令  $I'_c = 2 \iint a_o(x, y) |\cos[\varphi_o(x, y) - \varphi_r(x, y)]| dx dy$ , 则(6)式中  $I_c = a_r I'_c$ .

全息干板上的  $I_c$  占  $I$  的比值越大, 能量利用率也越大, 干涉条纹的明暗差异会越明显, 即衍射效率会变大. 能量利用率  $R = I_c/I$  可表示为

$$R = \frac{I'_c a_r}{S a_r^2 + I'_c a_r + I_o}. \quad (7)$$

将(7)式中的  $S$ 、 $I'_c$  和  $I_o$  看作已知量, 将  $R$  对  $a_r$  求导

$$R' = \frac{I'_c I_o - S I'_c a_r^2}{(S a_r^2 + I'_c a_r + I_o)^2}. \quad (8)$$

可以发现, 当  $a_r < \sqrt{I_o/S}$  时,  $R' > 0$ ,  $R'$  会随着  $a_r$  的增大而增大; 当  $a_r > \sqrt{I_o/S}$  时,  $R' < 0$ ,  $R'$  会随着  $a_r$  的增大而减小; 当  $a_r = \sqrt{I_o/S}$  时,  $R' = 0$ ,  $a_r^2 S = I_o$ , 即  $I_r = I_o$  时,  $R$  有极大值.

分析可得: 当全息干板上平面参考光光强  $I_r$  与物光光强  $I_o$  相等时, 物光和参考光生成的干涉条纹图能量利用率最大, 即再现像的亮度最大. 再现时, 使用与参考光相干的再现光照射全息图, 再现光在全息图上发生衍射, 生成再现像. 实验室中可以使用激光打印和再现全息图, 但如果使用白光再现, 其中包含的相干光相对较少, 再现像的亮度也较低. 为了使再现像的亮度足够大, 即提高全息图的干涉条纹能量利用率, 应使参考光和物光的光强比接近 1.

### 2.2.2 场景深度对成像的影响

与激光再现相比, 使用白光再现全息图时, 不同波长的再现光会使再现像的物点展宽为一个线段, 导致再现像变模糊, 严重时甚至会超过人眼分辨能力. 如图 4 所示, 全息干板上有一点  $P$ , 再现光  $C$  为白光, 再现像与全息干板的距离为  $L_r$ , 再现光源波长范围为  $\lambda_1 \sim \lambda_2$ , 对应的点  $P$  再现后在平行于全息干板方向上的展宽为  $P_1 \sim P_2$ , 再现像物点的展宽与

$L_i$  成正比,而  $L_i$  是由场景深度即图 2 中 LCD 与  $H_2$  干板的距离  $L_2$  决定的。当  $L_2=0$  时,再现像位于全息图平面上,且没有展宽,无模糊现象; $L_2$  越大,造成的模糊就越大。为了减少再现像的模糊程度,应尽可能地减小场景深度。

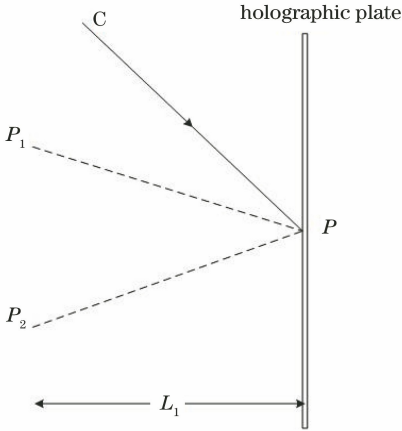


图 4 白光对再现像点的展宽

Fig. 4 Broadening of the reconstructed image point by white light

如图 5(a) 所示,在 EPISM 方法中,减小 LCD 屏幕到  $H_2$  干板的距离,视角角不变, $O$  点观察到的虚拟  $H_1$  干板上的全息单元数量会减少,导致合成

的视角图像分辨率下降,最终导致全息视图再现像的质量不佳。此外,生成合成视角图像时将  $H_2$  干板上的 Hogel 看作一点,而实际的 Hogel 不是无限小的, $H_2$  干板再现的三维场景仅在再现像平面上准确显示,在其他平面上显示都会有误差,再现像平面与  $H_2$  干板的距离和 LCD 与  $H_2$  干板的距离  $L_2$  相等。如图 5(b) 所示,全息干板上有一点  $P$ ,与再现像平面的距离为  $D$ ,即再现像的深度为  $D$ , $P$  点在再现像平面上关于 Hogel1 的视差点为  $P_1$ ,关于 Hogel $n$  的视差点为  $P_n$ 。理论分析时将 Hogel 近似看作一个点,但实际中 Hogel 具有一定的尺寸,所以再现像上的  $P$  点会出现一个模糊量  $d$ , $d$  与  $L_2$ 、 $D$  和 Hogel 的尺寸  $h$  相关,可表示为

$$d = \frac{h \times D}{L_2} \quad (9)$$

可以看出, $d$  在  $h$  和  $D$  不变的情况下与  $L_2$  成反比,过小的场景深度会造成再现像的模糊,影响再现像的质量。当  $d$  小于一定值时再现像的质量是可以接受的,根据(9)式,由  $D$  和  $h$  可确定  $L_2$ 。若能接受的再现质量的模糊量  $d=0.1$  cm,使用边长为 0.5 cm 的正方形 Hogel,再现像的深度为 2 cm,计算得到场景深度  $L_2$  最小为 5 cm。

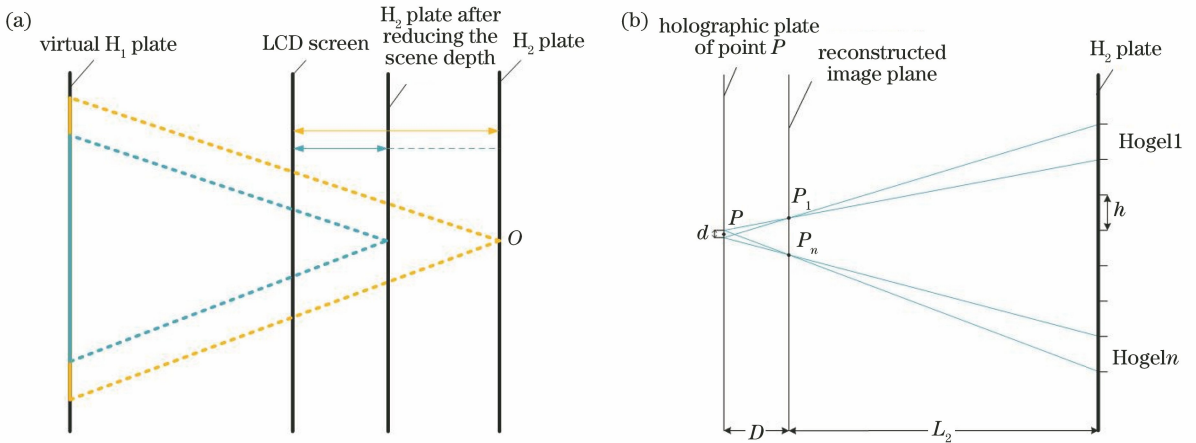


图 5 场景深度对  $d$  的影响。(a) 场景深度对合成视角图片分辨率的影响;(b) 场景深度对再现像质量的影响

Fig. 5 Effect of scene depth on  $d$ . (a) Effect of scene depth on the resolution of the synthetic perspective picture; (b) effect of scene depth on the quality of the reconstructed image

此外,全息记录与记录的夹角、感光材料的性能等因素也有关系。物光与参考光之间的夹角的大小会影响全息干板上干涉条纹的间隔。夹角越大,干涉条纹的间隔越小,即空间频率越高,全息图的分辨率就越高。但实际使用的全息干板能达到的最小干涉条纹间隔是有限的,即全息干板的分辨率是有限的,超出全息干板的分辨率就无法完整记录物光信息,因此还需要选择合适的记录夹角和全息干板。

### 3 实验验证

实验设计的全息打印系统如图 6 所示,光源为 CNI MSL-FN-639 的单纵模线偏振固体激光器,功率为 400 mW,波长为 639 nm,通过电子快门控制全息干板的曝光时间。激光先通过一个半波片和一个偏振分光棱镜,半波片用来调节两束光的能量比,偏振分光棱镜将激光分为物光和参考光。在物光光



路上再放置一个半波片使参考光的偏振态和物光保持一致。物光经扩束后照射 LCD 屏幕 (Panasonic 公司的 VVX09F035M20), LCD 的分辨率为  $1920 \text{ pixel} \times 1200 \text{ pixel}$ , 屏幕尺寸为  $19 \text{ cm} \times 11 \text{ cm}$ , 有效像素为  $1000 \text{ pixel} \times 1000 \text{ pixel}$ , 对应的屏幕尺寸约为  $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ 。使用 EPISM 方法将得到的有效视角图像依次加载到 LCD 屏幕上, 经扩束后的激光照亮后, 再经过毛玻璃散射得到物光场。

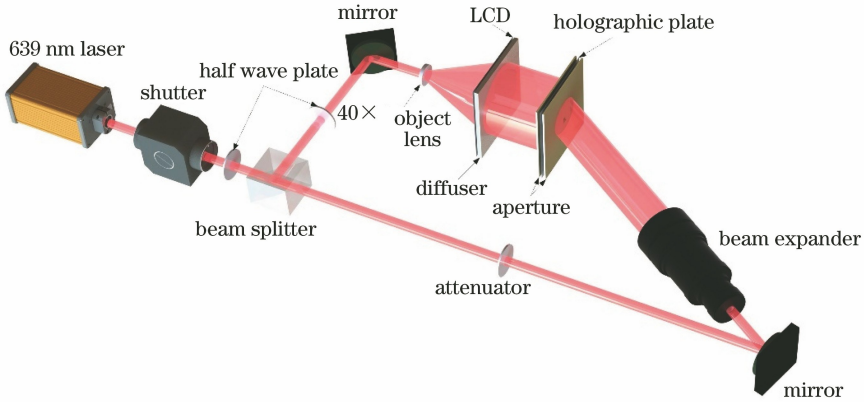


图 6 全息视图打印系统结构图

Fig. 6 Optical setup of holographic stereogram printer system

设置全息视图的尺寸为  $8 \text{ cm} \times 8 \text{ cm}$ , 全息单元的尺寸为  $0.5 \text{ cm} \times 0.5 \text{ cm}$ , 全息视图上有  $16 \times 16$  个全息单元, 虚拟  $H_1$  干板上全息单元的尺寸为  $0.25 \text{ cm} \times 0.25 \text{ cm}$ , 使用 3ds Max 软件对茶壶模型进行采样时, 虚拟相机的视场角设为  $30^\circ$ , 虚拟相机与茶壶中间面的距离为  $18.6 \text{ cm}$ , 三维场景再现时茶壶的中间面与全息干板的距离为  $9.4 \text{ cm}$ , 根据 EPISM 方法原理, 计算得到虚拟  $H_1$  干板上全息单

元通过  $40 \times$  的物镜扩束后得到均匀的平面波, 以偏离全息干板法线方向约  $40^\circ$  的方向入射。全息干板两侧紧贴放置两个与全息单元尺寸相同的光阑, 保证每个全息单元单独被曝光。物光光束与参考光光束分别在全息干板两侧入射, 在全息干板上记录干涉条纹。用一台 X-Y 线性位移平台 (卓立汉光公司的 KSA300) 控制全息干板的移动, LCD 屏幕、电子快门和位移平台都由同一台计算机实现同步控制。

元的数量为  $91 \times 91$  个。一些特定视点的合成有效视角图像如图 7 所示, 其中  $(x, y)$  表示该视角图像对应的全息单元坐标。由于合成有效视角图像源于各原始视角图像的拼接组合, 而原始视角图像的曝光方向是从 LCD 屏幕到虚拟  $H_1$  干板, 该方向与合成有效视角图像的曝光方向 (由 LCD 屏幕到  $H_2$  干板) 相反, 因此, 合成有效视角图像应先经过翻转处理, 再加载至 LCD 屏幕。



图 7 不同视点合成有效视角图像

Fig. 7 Synthetic effective perspective images of different view points

为了验证参考光的光强对再现像的影响, 分别将参考光与物光的光强比设置为  $1:1, 5:1, 10:1$  进行打印, 全息视图再现光路如图 8(a) 所示。用图 8(b) 所示白光 LED 照射全息干板, 用单反相机 (佳能 5D Mark III) 拍摄全息干板上的再现像, 镜头焦

距为  $100 \text{ mm}$ 。图 9 为再现像的观察效果, 再现像均凸出于全息干板。

在相同的光圈、曝光时间和感光度下, 对比不同光强比下再现像的亮度, 如图 9 所示。可以明显看出, 参考光和物光的光强比为  $1:1$  时再现像的亮度

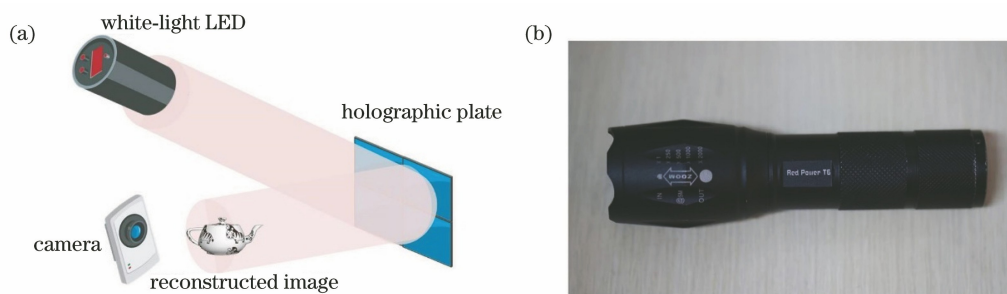


图 8 白光再现。(a)再现光路;(b)再现光路使用的白光 LED

Fig. 8 Reconstruction with white light. (a) Optical setup of reconstruction;  
(b) white-light LED used in optical setup of reconstruction

最高,与理论分析相吻合。因此,为了保证白光的再现像有足够的亮度,进行全息打印时,参考光和物光的光强比应接近 1:1。实验使用的银盐干板的感光灵敏度为  $1250 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ ,物光光束的能量密度为  $10 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ ,参考光与物光的光强相等,每个全息单元的曝光时间为 62.5s,加上消除快门开闭和位移

平台震动影响而设置的静台时间,打印整幅全息视图需要十几个小时。为了消除长时间打印时光源稳定性、各种因素震动和散斑等因素对全息视图打印系统的影响,实验在光学洁净室并选择适当时间(如夜晚)进行,尽可能减少外界干扰对实验结果的影响。

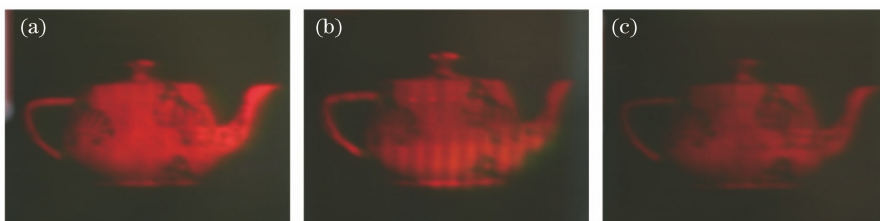


图 9 再现像。(a)参考光与物光的光强比为 1:1;(b)参考光与物光的光强比为 5:1;(c)参考光与物光的光强比为 10:1

Fig. 9 Reconstructed images. (a) Intensity ratio of reference light and object light is 1:1; (b) intensity ratio of reference light and object light is 5:1; (c) intensity ratio of reference light and object light is 10:1

受白光 LED 性能的限制,再现像的细节还未达到激光再现的效果,如图 10(a)所示。白光再现全息体视图时,再现光源的宽度和光谱宽度的增加都会导致再现像出现模糊现象;再现光源的亮度及光强的均匀程度也会影响再现像的质量。白

光光源存在一定的光谱宽度,理想的白光光源的宽度应该足够小,接近点光源,光强大且分布均匀。而实验使用的白光 LED 亮度为 1100 lm,如有更加理想的光源,再现像的亮度和细节效果会更好。

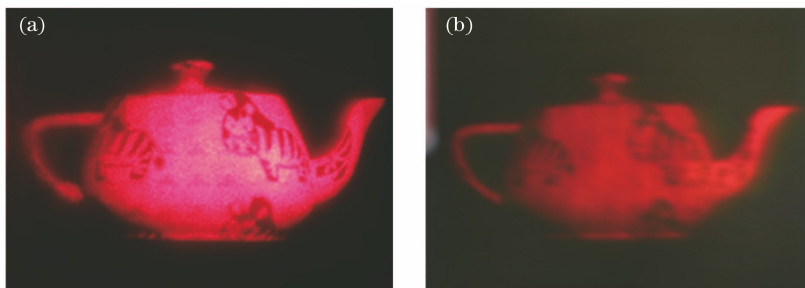


图 10 激光再现像与白光再现像对比。(a)激光再现像;(b)白光再现像

Fig. 10 Contrast of reconstructed image with laser and white light. (a) Reconstructed image with laser;  
(b) reconstructed image with white light

为了验证场景深度对再现像质量的影响,将全息干板与 LCD 屏幕的距离设置为 7 cm,此时  $H_1$  干板上的全息单元数量为  $85 \times 85$ ,使参考光与物光光

强相等。使用白光 LED 照明的再现像效果如图 11 所示,与之前场景深度为 9.4 cm 的再现像相比,此时再现像的细节出现明显缺失,分辨率低。使用(9)

式计算出两种景深全息体视图再现像的模糊量  $d$ ，全息体视图的 Hogel 尺寸都为  $0.5\text{ cm} \times 0.5\text{ cm}$ 。场景深度为  $9.4\text{ cm}$  时的茶壶半径为  $2\text{ cm}$ ，模糊量为  $0.11\text{ cm}$ ；场景深度为  $7\text{ cm}$  时的茶壶半径为  $2.5\text{ cm}$ ，

模糊量是  $0.17\text{ cm}$ ，此时再现像的模糊量已严重影响了再现像的质量。所以在确定全息单元尺寸和再现像深度时，需要设置合适的 EPISM 全息体视图的场景深度以保证再现像的质量。

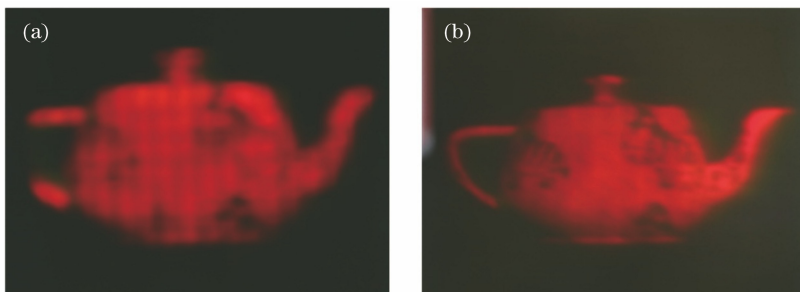


图 11 不同场景深度再现像对比。(a)较小场景深度;(b)合适场景深度

Fig. 11 Contrast of reconstructed image with different scene depths.

(a) Smaller scene depth; (b) suitable scene depth

## 4 结 论

针对 EPISM 方法打印全息体视图，推导了平面参考光振幅对物光再现像的影响，针对 EPISM 方法打印的全息体视图无法白光再现的问题，通过调整参考光与物光的光强比，提高了物光和参考光生成的干涉条纹能量利用率，从而实现白光再现。分析了 EPISM 方法中场景深度与再现像分辨率的关系，指出场景深度变小是导致分辨率下降的原因，同时实现了 EPISM 方法全息体视图的白光再现，以及场景深度的确定方法，对提升 EPISM 方法的实用化具有积极意义。

### 参 考 文 献

- [1] Pole R V. 3-D imagery and holograms of objects illuminated in white light [J]. Applied Physics Letters, 1967, 10(1): 20-22.
- [2] Debitetto D J. Holographic panoramic stereograms synthesized from white light recordings[J]. Applied Optics, 1969, 8(8): 1740-1741.
- [3] King M C, Noll A M, Berry D. A new approach to computer-generated holography[J]. Applied Optics, 1970, 9(2): 471-475.
- [4] Halle M W, Benton S A, Klug M A, et al. Ultragram: a generalized holographic stereogram[J]. Proceedings of SPIE, 1991, 1461: 142-155.
- [5] Halle M W. The generalized holographic stereogram [D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 1991.
- [6] Michael A, Halle M W, Paul M. Full-color Ultragrams[J]. Proceedings of SPIE, 1992, 1667: 110-119.
- [7] Michael A, Halle M W, Lucente M E, et al. Compact prototype one-step Ultragram printer [J]. Proceedings of SPIE, 1993, 1914: 15-24.
- [8] Michael A, Arno K, Wendy J, et al. Optics for full-parallax holographic stereograms[J]. Proceedings of SPIE, 1997, 3011: 78-88.
- [9] Halle M W. Holographic stereograms as discrete imaging systems [J]. Proceedings of SPIE, 1994: 2176, 73-84.
- [10] Halle M W, Adam B. Fast computer graphics rendering for full parallax spatial displays [J]. Proceedings of SPIE, 1997, 3011: 105-112.
- [11] Yamaguchi M, Ohyama N, Honda T. Holographic three-dimensional printer: new method[J]. Applied Optics, 1992, 31(2): 217-222.
- [12] Brotherton-Ratcliffe D. Ultra-realistic imaging-advanced techniques in analogue and digital colour holography [M]. Boca Raton: CRC Press, 2013.
- [13] Hahn J, Kim H, Lim Y, et al. Wide viewing angle dynamic holographic stereogram with a curved array of spatial light modulators [J]. Optics Express, 2008, 16(16): 12372-12386.
- [14] Takaki Y, Nago N. Multi-projection of lenticular displays to construct a 256-view super multi-view display [J]. Optics Express, 2010, 18(9): 8824-8835.
- [15] Hong K, Park S G, Yeom J, et al. Resolution enhancement of holographic printer using a hogel overlapping method [J]. Optics Express, 2013, 21(12): 14047-14055.
- [16] Su J, Yuan Q, Huang Y Q, et al. Method of single-



- step full parallax synthetic holographic stereogram printing based on effective perspective images' segmentation and mosaicking [J]. *Optics Express*, 2017, 25(19): 23523-23544.
- [17] Su J, Yan X P, Huang Y Q, et al. Resolution matching in laser direct printing of a computer-generated hologram [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2017, 34(5): B1-B8.
- [18] Su J, Yan X P, Huang Y Q, et al. Progress in the synthetic holographic stereogram printing technique [J]. *Applied Sciences*, 2018, 8(6): 851.
- [19] Su J, Yan X P, Huang Y Q, et al. Improvement of printing efficiency in holographic stereogram printing with the combination of a field lens and holographic diffuser[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(25): 7159-7166.
- [20] Su J, Yan X P, Jiang X Y, et al. Characteristic and optimization of the effective perspective images' segmentation and mosaicking (EPISM) based holographic stereogram: an optical transfer function approach[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8: 4488.
- [21] Fan F, Jiang X Y, Wang P Y, et al. Numerical reconstruction of holographic stereograms with effective perspective image segmentation and mosaicking method [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(12): 1209002.
- 樊帆, 蒋晓瑜, 王培阳, 等. 有效视角图像切片嵌合法全息体视图的数值重构 [J]. *中国激光*, 2018, 45(12): 1209002.
- [22] Chen Y B, Yan X P, Su J, et al. One-step holographic stereogram printing method based on effective perspective images' segmentation and mosaicking method [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(2): 0209002.
- 陈祎贝, 闫兴鹏, 苏健, 等. 有效视差图像分割与重组的单步全息体视图打印方法 [J]. *中国激光*, 2019, 46(2): 0209002.
- [23] Jiang X Y, Cheng C Q, Yan X P, et al. Research on pupil size of full-parallax holographic stereogram imaging system [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(3): 030901.
- 蒋晓瑜, 程长青, 闫兴鹏, 等. 关于全视差全息体视图成像系统光瞳尺寸的研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(3): 030901.
- [24] Song X F, Yu M J, Wang H Y, et al. Effect of reference intensity ratio to object on reconstructed image quality in digital holography [J]. *Laser Technology*, 2014, 38(6): 859-862.
- 宋修法, 于梦杰, 王华英, 等. 物光与参考光强度比对数字全息再现像质的影响 [J]. *激光技术*, 2014, 38(6): 859-862.