

# 有效视角图像切片嵌合法全息体视图的数值重构

樊帆<sup>1,2</sup>, 蒋晓瑜<sup>1</sup>, 王培阳<sup>3</sup>, 陈祎贝<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;

<sup>3</sup>中国洛阳电子装备实验中心, 河南 洛阳 459000

**摘要** 全息体视图打印技术是当下广泛应用的一种全息技术。近年来本课题组提出了一种新的对视角图像进行预处理并进行全息体视图打印的方法,称为有效视角图像切片嵌合 (EPISM) 法,该方法可以通过一步记录实现传统两步法的全息打印效果,具有很高的研究价值。为了在光学实验之前对 EPISM 法全息体视图的打印结果进行预测,提出一种 EPISM 法全息体视图的数值重构算法,采用该算法对 EPISM 法处理过的合成视角图像进行数值重构,可以在光学打印之前预先得到不同观察角度和观察位置所看到的再现图像。将数值重构图像与原始采样图像以及光学实验再现像进行比较,结果表明:该算法可以较好地对比 EPISM 法全息体视图打印的光学实验结果进行模拟。

**关键词** 全息; 全息体视图; 数值重构

中图分类号 O438.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.1209002

## Numerical Reconstruction of Holographic Stereograms with Effective Perspective Image Segmentation and Mosaicking Method

Fan Fan<sup>1,2</sup>, Jiang Xiaoyu<sup>1</sup>, Wang Peiyang<sup>3</sup>, Chen Yibei<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 Research Institute, Chinese People's Liberation Army, Beijing 100012, China;

<sup>3</sup>Luoyang Electronic Equipment Test Center, Luoyang, Henan 459000, China

**Abstract** Holographic stereogram printing technology is a widely used holographic technology. In recent years, our project team has proposed a new method to preprocess the perspective images and print the holographic stereograms, called as the effective perspective image segmentation and mosaicking (EPISM) method, in which the holographic printing effect can be achieved via one-step recording beyond the traditional two-step recording, and thus it possesses high research value. In order to predict the printing results of holographic stereograms based on the EPISM method before optical experiments, a numerical algorithm for the reconstruction of holographic stereograms after EPISM is proposed. This algorithm performs a numerical reconstruction of synthetic perspective images processed by the EPISM method and the reproduced images seen at different viewing angles and viewing positions prior to optical printing can be pre-obtained. Through the comparison among the original sampling images, the numerically reconstructed images and the experimentally reproduced images, it is found that the proposed algorithm can be used to simulate the optical experimental results of holographic stereogram printing with the EPISM method.

**Key words** holography; holographic stereogram; numerical reconstruction

**OCIS codes** 090.2870; 090.2890; 090.1995

收稿日期: 2018-07-04; 修回日期: 2018-08-12; 录用日期: 2018-08-21

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 (201432)

\* E-mail: yanxp02@gmail.com

# 1 引言

全息体视图打印技术是目前广泛应用的全息技术。该技术将双目视差原理与全息打印技术相结合,先对场景采集的一组二维视角图像进行预处理,而后利用全息打印技术将处理之后的图像记录在全息记录介质中生成全息体视图。对全息体视图进行再现就可观察到记录的三维场景。

全息体视图打印技术经历了近半个世纪的发展,目前已经相当成熟。1969年,Debitetto<sup>[1]</sup>提出水平视差全息体视图全息打印技术,随后 King等<sup>[2]</sup>针对于 Debitetto 型水平视差全息体视图提出两步法水平视差全息体视图打印技术,该技术首先制作一个透射式水平视差全息体视图,并将其作为母版,而后将母版上的再现像转印到转移干板上,通过这种方法得到的全息体视图可以得到白光再现的正实像。

在视角图像处理方面,Yamaguchi等<sup>[3]</sup>提出了一种 Lippmann 全息体视图处理方法,该方法可一步制作出 Lippmann 型全息体视图。而后,麻省理工学院(MIT)的 Halle等<sup>[4-10]</sup>提出称为 Ultragram 的一步法全息体视图打印技术,基于此技术可以实现任意深度、全视差、无畸变的全息体视图打印。Geola公司的 Ratcliffe等<sup>[11-14]</sup>在2003年提出了一步激光直写合成全息体视图打印法。2017年本课题组<sup>[15-20]</sup>提出了一种称为有效视角图像切片嵌合(EPISM)法,并利用该方法对采样的视角图像进行处理,这种方法的基本原理不同于之前的方法,它是基于全息单元图而非全息单元像素来对视角图像进行处理的,并取得了一系列研究成果。

2012年,Park等<sup>[21]</sup>提出了针对 Halle方法预处理后的图像进行数值重构来模拟全息体视图光学再现像的方法,这种方法针对 Ultragram型全息体视图的图像处理思路,给出了相应的数值重构算法,数值重构结果可以很好地模拟光学再现像。2014年,Park等<sup>[21-22]</sup>进一步针对透镜引入径向畸变的情况给出了相应的数值重构算法,并利用峰值信噪比和结构相似性等图像质量指标对畸变造成的影响进行分析。Park等提出的这种数值重构算法可以在光学实验前对光学再现像进行模拟,这使得在实验前就可以利用模拟的再现像对光学实验结果进行预估,为全息体视图打印提供了很好的辅助。

由于 EPISM法是基于全息单元图像而非全息单元像素对视角图像进行处理的,因此需要与之相

匹配的算法来实现对 EPISM法全息体视图的数值重构。

本文基于 EPISM法的基本原理,提出了针对 EPISM法的全息体视图数值重构算法,并利用光学实验得到 EPISM法的光学再现像,将根据数值重构算法得到的数值重构图像与原始采样视角图像以及光学再现图像进行对比,验证了数值重构算法的有效性,同时对算法存在的问题进行了总结。

## 2 EPISM法的基本原理

在全息体视图打印中,通常将物光与参考光在全息干板上的孔径区域发生干涉形成的全息单元称为 hogel,将两步法全息体视图打印的母版称为  $H_1$  干板,转印干板称为  $H_2$  干板。

EPISM法的提出是为了实现通过一步全息打印过程实现两步法的全息打印效果。为了达到该目的,利用在液晶显示器(LCD)上模拟两步法中  $H_2$  干板上的 hogel 记录图像的方法,将两步法的记录过程通过一步直接实现。

如图 1(a)所示,对  $H_2$  干板上 hogel 所记录的再现像进行模拟时,将 hogel 的中心看作是一个观察点  $O$ ,根据光线追踪原理,经该点观察  $H_1$  干板上的 hogel 时,会得到一个以观察点为起点,以所观察 hogel 为底面的光锥,由于  $H_1$  干板上的 hogel 再现像就是记录在该 hogel 上的视角图像,并且再现位置就是记录时 LCD 所处的位置,因此光锥与再现视角图像的相交部分就是该 hogel 对观察点  $O$  的有效视角切片。将在观察点上看到的所有  $H_1$  的 hogel 再现像的有效视角切片嵌合在一起,如图 1(b)所示,得到的就是要记录到观察点所在 hogel 上的合成视角图像。将所有 hogel 的合成视角图像依次记录到干板上就可以得到基于 EPISM法的全视差全息体视图。

## 3 EPISM法的数值重构

### 3.1 EPISM法数值重构的基本原理

光学实验是细致复杂的实验过程,包括实验设计、光路搭建、全息打印、效果观察等多个步骤。因此,在实验前对实验效果进行预模拟会对实验有很大帮助。由于 EPISM法采用全息单元图(即有效视角切片)替代全息单元像素作为视角图像预处理的基本单位,因此在这里需要基于 EPISM法以及光线追踪法的基本原理给出 EPISM法的数值重构方法。

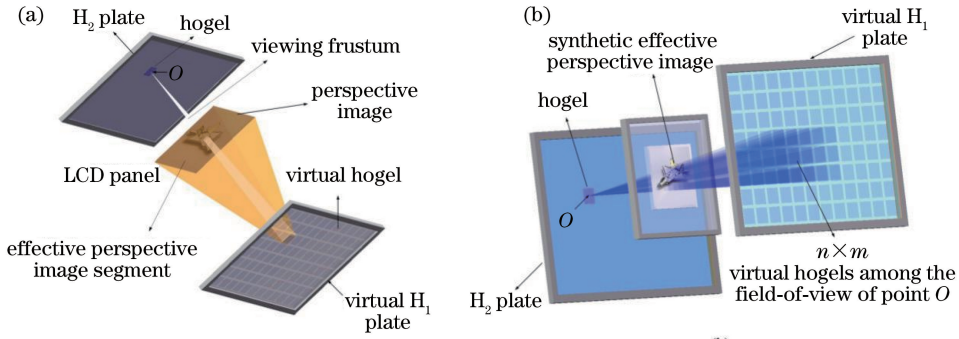


图 1 EPISM 法的总体原理图。(a) 单个全息单元视角图片有效像素部分的提取; (b) 多全息单元有效像素部分的拼接组合  
Fig. 1 Overall principle of EPISM method. (a) Extraction of effective perspective image segments of single virtual hogel; (b) synthetic effective perspective image mosaicked by effective image segments of multiple virtual hogels

由于经过 EPISM 法记录的  $H_2$  干板上每个 hogel 所记录的都是该 hogel 中心所看到的有效视角图像切片嵌合之后得到的合成视角图像, 因此再现时在 LCD 位置还原出的是该 hogel 记录的合成视角图像。如图 2 所示, 将人眼所在的平面看作观察平面, 人眼位于  $E$  位置时, 根据光线追踪原理, 在  $E$  点观察  $H_2$  干板上的一个 hogel 时看到的是以  $E$  点为顶点及以 hogel 为底面的视锥与该 hogel 再现的合成视角图像相交的部分, 将其记为  $E$  点的有效观察图像切片。人眼观察整个  $H_2$  干板时, 看到的是  $E$  点的所有有效观察图像切片嵌合的效果, 也就是  $E$  点的观察图像。

由于  $H_2$  干板再现时还原的是  $H_2$  干板上每个 hogel 对应的合成视角图像, 因此只在干板制作过程中考虑虚拟  $H_1$  干板的情况, 对 EPISM 法进行数值重构时只需要考虑实际加载合成视角图像的 LCD 平面、 $H_2$  平面以及观察平面的位置关系。

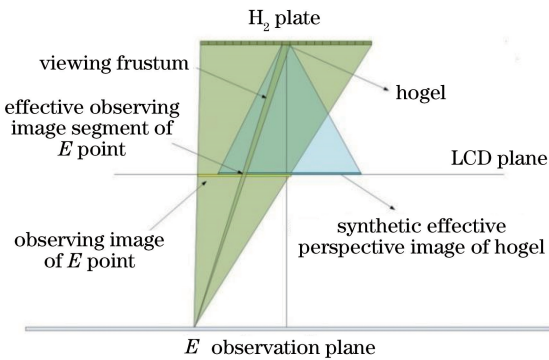


图 2 EPISM 法数值重构原理图  
Fig. 2 Schematic of numerical reconstruction by EPISM method

### 3.2 数值重构的具体算法

如图 3 所示, 首先选择以 LCD 平面中心位置  $C$  为原点建立世界坐标系,  $H_2$  平面到 LCD 平面的距离

为  $L_2$ , 观察平面距离 LCD 平面的距离为  $L_1$ 。将  $H_2$  的 hogel 再现像中心位置记为  $P(x_2, 0)$ , 则 hogel 中心点  $O$  的坐标为  $O(x_2, L_2)$ , 视点  $E(x_1, -L_1)$  与  $O$  点连线交 LCD 平面于  $E_0$  点。经过简单计算可得  $E_0$  点坐标为  $E_0 \left[ x_2 + (x_1 - x_2) \frac{L_2}{L_2 + L_1}, 0 \right]$ ,  $H_2$  上 hogel 的合成视角图像  $AB$  位于 LCD 平面上, 并由  $O$  点坐标与视场角  $\theta$  决定, 其坐标为  $\left( x_2 - L_2 \tan \frac{\theta}{2}, x_2 + L_2 \tan \frac{\theta}{2} \right)$ 。为方便计算, 本课题组以水平方向为例进行计算, 竖直方向的算法与水平方向相同。

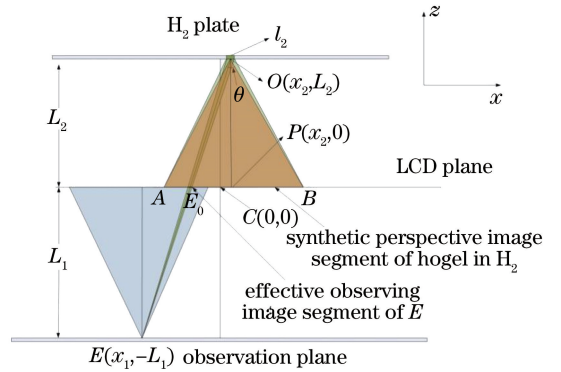


图 3 数值重构算法的各个参数(水平方向)  
Fig. 3 Parameters for numerical reconstruction (horizontal direction)

#### 3.2.1 有效 hogel 的确定

在视点  $E$  确定时, 为了确定  $H_2$  干板上哪些 hogel 可以被人眼观察到, 本课题组采用的做法是寻找视点的有效 hogel, 在这里选取视点与 hogel 形成的视锥与再现像能够完全相交的 hogel 作为视点的有效 hogel, 视锥与再现像相交部分即为有效观察图像切片。要实现这一点, 需要对满足此种条件的 hogel 进行选择。

如图 4 所示,当  $E$  点与 hogel 再现像左端点的连线与  $H_2$  平面的交点正好落于 hogel 左端点时, hogel 对于  $E$  点刚好有有效观察图像切片。当  $E$  点与 hogel 再现像左端点的连线与  $H_2$  平面交点落于 hogel 左侧时, hogel 对于  $E$  点有有效观察图像切片。同理,当  $E$  点与再现像右端点的连线与  $H_2$  平面的交点刚好落于 hogel 的右端点时, hogel 对于  $E$  点刚好有有效观察图像切片;当交点位于 hogel 右侧的时候, hogel 对于  $E$  点有有效观察图像切片。

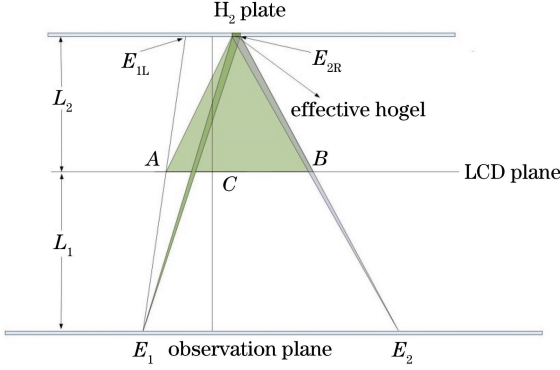


图 4 数值重构时有效 hogel 的确定

Fig. 4 Determination of effective hogel for numerical reconstruction

若要选择有效 hogel, hogel 的中心坐标应为  $O(x_2, L_2)$ 。根据之前给出的参数,视点  $x$  方向的坐标皆设为  $x_1$ , 再现像区间为  $\left(x_2 - L_2 \tan \frac{\theta}{2}, x_2 + L_2 \tan \frac{\theta}{2}\right)$ 。

将位于 hogel 中心左侧的视点记为  $E_1$ , 则  $E_1$  与再现像左端点  $A$  的连线与  $H_2$  平面的交点  $E_{1L}$  在  $x$  方向的坐标为

$$x_{1L} = \left(x_2 - L_2 \tan \frac{\theta}{2} - x_1\right) \frac{L_2 + L_1}{L_1} + x_1. \quad (1)$$

将位于 hogel 中心右侧的视点记为  $E_2$ , 则  $E_2$  与再现像右端点  $B$  的连线与  $H_2$  平面的交点  $E_{2R}$  在  $x$  方向的坐标为

$$x_{2R} = \left(x_2 + L_2 \tan \frac{\theta}{2} - x_1\right) \frac{L_2 + L_1}{L_1} + x_1. \quad (2)$$

针对上述关系, hogel 要与视点有有效观察图像切片, 就需要满足左端点落在  $x_{1L}$  右侧, 右端点落在  $x_{2R}$  左侧, 即  $x_{1L} \leq x_2 - l_2/2, x_{2R} \geq x_2 + l_2/2$ 。基于这种约束, 当 hogel 中心落于区间

$$\left[\left(\frac{l_2}{2} - L_2 \tan \frac{\theta}{2} \frac{L_2 + L_1}{L_1}\right) \frac{L_1}{L_2} + x_1, \right.$$

$\left.\left(L_2 \tan \frac{\theta}{2} \frac{L_2 + L_1}{L_1} - \frac{l_2}{2}\right) \frac{L_1}{L_2} + x_1\right]$  时, hogel 就可以在  $E$  点被完整观察到。

### 3.2.2 有效观察图像切片的确定以及再现像的数值重构

要确定有效观察图像切片在再现图像上的位置, 首先需要确定有效观察图像切片的中心坐标, 将观察点  $E$  与  $H_2$  干板上 hogel 的中心相连, 则连线和 LCD 平面的交点就是有效观察图像切片的中心, 记为  $E_0$ 。如图 3 所示, 其坐标记作  $E_0(x_0, 0)$ , 其中

$$x_0 = (x_2 - x_1) \frac{L_2}{L_2 + L_1} + x_1. \quad (3)$$

$H_2$  的 hogel 在 LCD 平面的有效观察图像切片尺寸为  $l_{LCD} = l_2 L_1 / (L_2 + L_1)$ , 因此有效观察图像切片相对于  $H_2$  上 hogel 的再现像的位置可以表示为

$$\left[ (x_2 - x_1) \frac{L_2}{L_2 + L_1} - \frac{l_2}{2} \frac{L_1}{L_2 + L_1}, (x_2 - x_1) \frac{L_2}{L_2 + L_1} + \frac{l_2}{2} \frac{L_1}{L_2 + L_1} \right]. \quad (4)$$

将所有视点  $E$  的有效观察图像切片进行嵌合就可以得到观察图片。

## 4 实验验证

为了验证所提数值重构算法的正确性, 针对茶壶模型利用 EPISM 法进行光学打印, 并与数值重构结果进行比较。

这里采用的茶壶模型长 6.4 cm, 高 3.2 cm, 深 4 cm, 倾斜  $45^\circ$  放置。选取  $H_2$  干板的 hogel 尺寸为 1 cm,  $H_2$  干板的 hogel 尺寸为 0.25 cm, 全息干板的尺寸为  $8 \text{ cm} \times 8 \text{ cm}$ , 采样相机的视场角为  $30^\circ$ , 相机到茶壶模型的距离为 18.6 cm,  $H_2$  干板到 LCD 的距离为 11.4 cm。根据 EPISM 法可以得到, 相机采样个数应为  $91 \times 91 = 8281$  个。选取可以完整捕捉到整个茶壶的左下、中心、右上三个视角的采样图片作为参考, 如图 5 所示。

采样后, 利用 EPISM 法对得到的视角图像切片进行嵌合, 得到对应  $H_2$  干板的  $8 \times 8 = 64$  个 hogel 的合成图像。如图 6 所示, 选取第 1、第 4、第 8 行及第 2、第 4、第 7 列的合成视角图像作为参考, 可以发现, 切片嵌合后的图像发生了变形(第 4 行图像可以同时观察到茶壶的壶底与壶嘴), 这可以看作是处理之后的图像遮挡关系发生了变化, 因此无法依据合成视角图像判断打印的效果如何。



图 5 茶壶三个视角的采样图片

Fig. 5 Sampling images of teapot from three perspectives

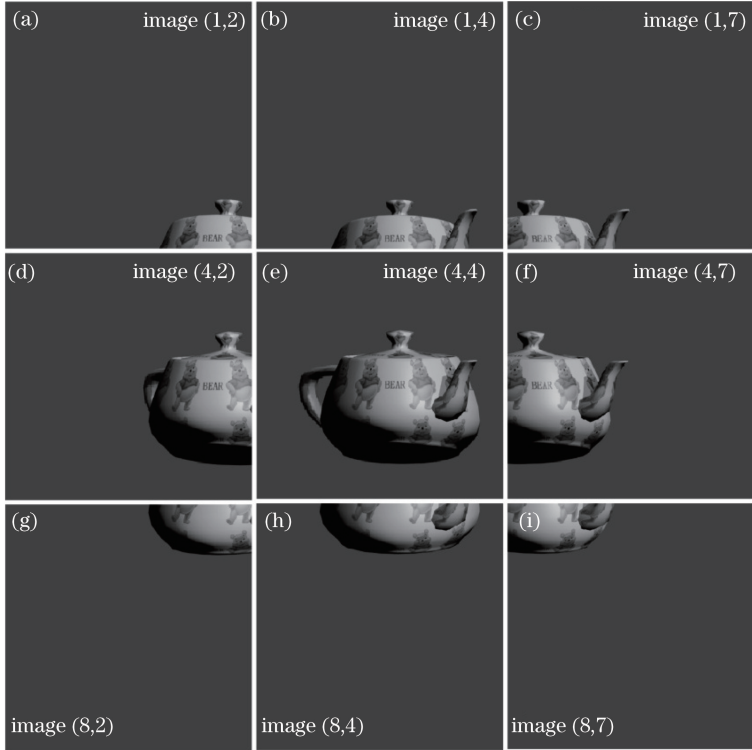


图 6 EPISM 法不同位置的合成视角图像

Fig. 6 Synthetic perspective images from different positions by EPISM method

利用所提算法对 EPISM 法处理过的图像进行数值重构,可以首先对左下、中心、右上 3 个位置进行数值重构,结果如图 7 所示。比较原始图像和数值重构结果可以发现,数值重构结果可以对原始

图像进行较好的模拟,但由于 EPISM 法是在  $H_2$  干板 hogel 的中心观察到的图像记录到 hogel 上,因此在数值重构时无法实现对原始图像的精准还原,会存在一些嵌合上的瑕疵(茶壶上的文字和小熊贴

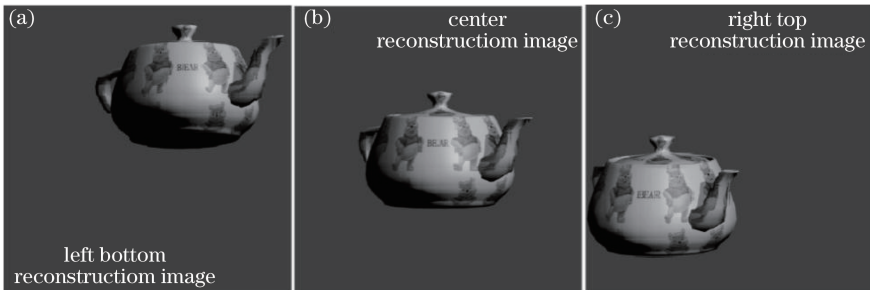


图 7 茶壶在三个视角的数值重构图像

Fig. 7 Numerically reconstructed images of teapot from three perspectives

图在数值重构时会出现细微的嵌合误差)。

另外利用所提算法,针对 EPISM 法处理过的合成图像,对指定观察距离和观察角度的再现像进行模拟。在这里选取距离为 300 cm,以与水平方向呈  $-12^\circ$ 、 $-6^\circ$ 、 $0^\circ$ 、 $6^\circ$ 、 $12^\circ$  的观察角度(如图 8 所示)以及与竖直方向呈  $-12^\circ$ 、 $-6^\circ$ 、 $0^\circ$ 、 $6^\circ$ 、 $12^\circ$  的观察角度(如图 9 所示)分别进行模拟,另外选取  $0^\circ$  视角,在距离分别为 50,100,200,300,500 cm 时进行再现像模拟(如图 10 所示)。可以发现:在不同视角得到的

数值重构图像可以如实反映茶壶随着观察视角不同而发生的变化;随着距离增大,茶壶逐渐减小,符合“近大远小”的观察规律。

通过分析模拟结果发现:选择的视角接近  $0^\circ$  时可以获得较好的重构图像,当视角远离  $0^\circ$  时,重构图像的质量就会降低;当距离较近时,重构图像的效果并不理想,随着距离增加,重构图像的质量逐渐提高。因此,当选择接近  $0^\circ$  视角、距离为 300 cm 进行数值重构时,可以得到较好的模拟再现像。

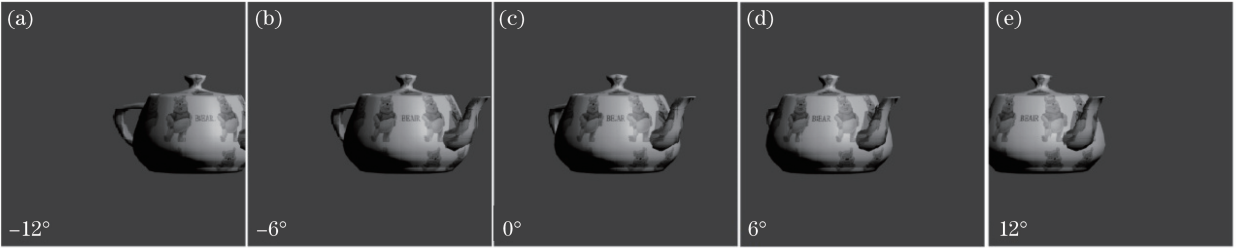


图 8 茶壶在水平方向的数值重构图像

Fig. 8 Numerically reconstructed images of teapot in horizontal direction



图 9 茶壶在竖直方向上的数值重构图像

Fig. 9 Numerical reconstruction images of teapot in vertical direction

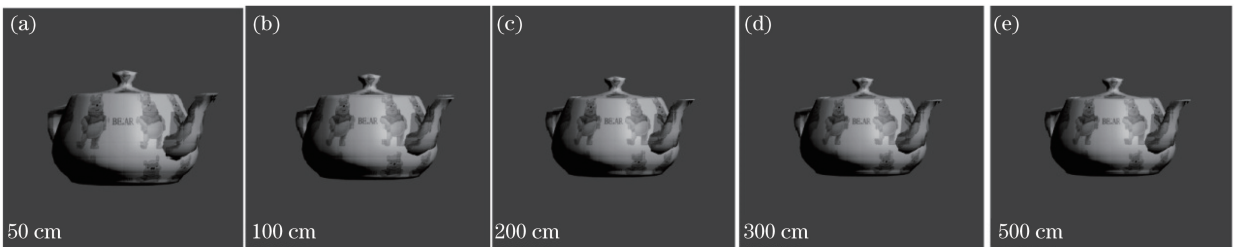


图 10 茶壶在不同距离时的数值重构图像

Fig. 10 Numerically reconstructed images of teapot at different distances

为了进一步验证实验结果,对 EPISM 法处理过的合成图像进行全息打印,将数值重构结果与光学再现像进行比较。在这里使用 VVX09F035M20 型 LCD 屏加载合成图像,该屏的像素为  $1920 \text{ pixel} \times 1200 \text{ pixel}$ , 取其中的  $1000 \text{ pixel} \times 1000 \text{ pixel}$  作为有效像素部分,对应的有效长度近似为  $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ ,合成全息立体图打印系统的光路如图 11 所示。选择 400 MW、639 nm 单纵模和线偏振固态红光激光器(CNIMSL-FN-639)作为激光

源,选取电动快门(Sigma Koki SSH-C2B)用于控制曝光时间。激光束通过平面镜改变方向。激光经过非偏振分束器(NPBS)后被分成物光和参考光,放置衰减器的目的是调整激光的强度。将合成的有效透视图像加载到 LCD 面板上,在此 LCD 上的背光模块和两个偏振器被移除。采用空间滤波器对物光进行扩展,得到的扩展光透过 LCD 并获得其上加载的图像信息,而后,加载了图像信息的物光透过弥散屏到达全息干板。弥散屏被放置在 LCD 面板的正

前方,用于对物光进行漫反射,使光束发散,以覆盖 hogel 的孔径。参考光束通过 40 倍物镜以及针孔为  $15\ \mu\text{m}$  的空间滤波器滤掉高频光。用焦距为 150 mm 的透镜作为准直透镜来准直聚焦激光,并获得均匀的平行光。LCD 面板和全息干板的距离为 11.4 cm。物光和参考光在全息平板的不同侧照射在干板上发生干涉,干涉条纹被记录在全息干板上。

干板两侧放置中间有透光孔径的平板,以确保只有全息干板的正方形区域(即 hogel)曝光。使用可沿水平方向与垂直方向移动的 KSA300 X-Y 位移平台搭载干板对全息干板上的各个 hogel 依次进行曝光。该电动 X-Y 平台由可编程的 MC600 控制器驱动。在本系统中,位移平台的步长为 1 cm。液晶面板、电动快门和电动 X-Y 平台由计算机同步控制。

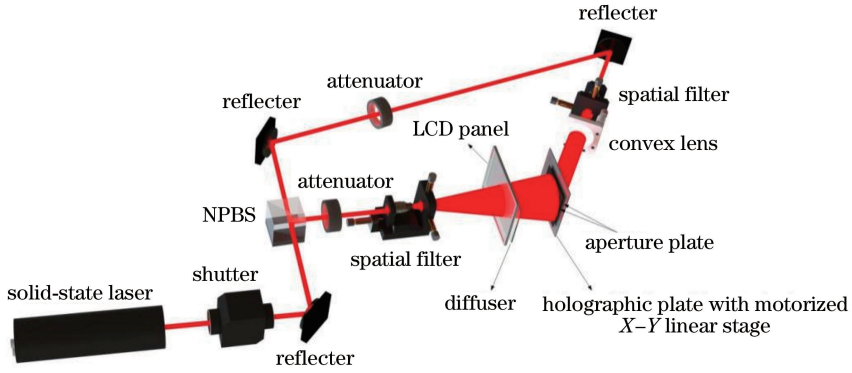


图 11 EPISM 法打印系统光路

Fig. 11 Optical paths of printing system by EPISM method

如图 12 所示,利用 EPISM 法全视差全息体视图进行打印,对打印结果分别在水平方向( $-6^\circ$ 、 $0^\circ$ 、 $6^\circ$ )进行拍摄,并与模拟结果进行对比。理想的数值重构算法模拟的再现像应该是对模型形状以及模型上贴图细节实现精准还原,而得到的再现像的模拟结果在模型形状上(壶嘴、壶把、顶盖等部位的形状以及倾斜角度)基本实现了对再现像的精准模拟,但

在贴图细节上,再现像的模拟结果存在着一定的嵌合误差(字母“BEAR”和小熊贴图在一些位置并没有实现精准嵌合),不能精准模拟光学再现像的贴图细节。

总体而言,EPISM 法数值重构的结果可以较好地光学再现像进行模拟,从而可以在实验前对实验结果进行预估。

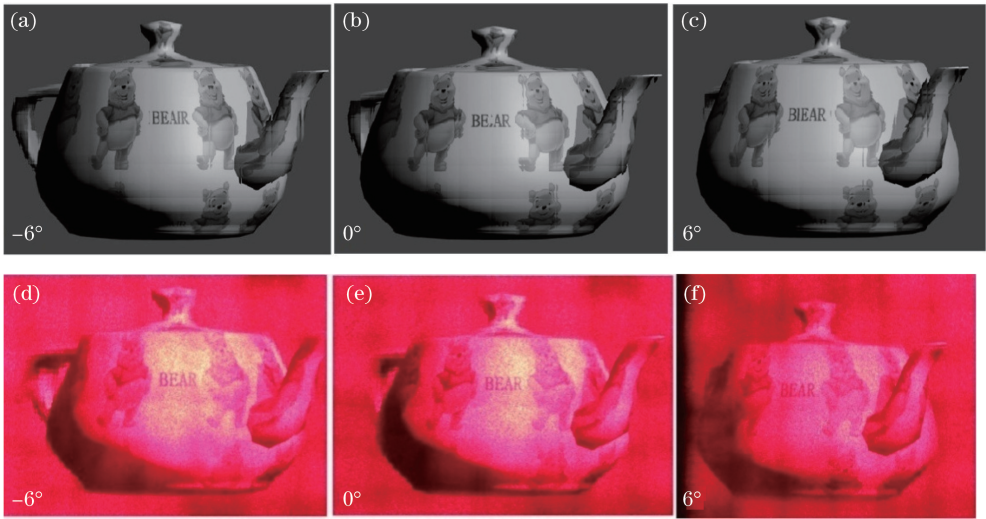


图 12 数值重构图像与光学再现像的比较

Fig. 12 Comparison between numerically reconstructed images and optically reproduced images

## 5 结 论

本课题组给出了一种重构算法,用以对经

EPISM 法预处理后得到的全息体视图进行数值重构。通过该重构算法可以模拟 EPISM 法打印的全息体视图在不同位置、不同角度的全息再现像。通

过将数值重构图像与原始采样图像、光学实验得到的再现像进行比较后发现,数值重构图像可以对全息体视图的再现结果进行较好的模拟。采用这种方法可以在实验前对实验的结果进行预估,为光学实验提供参考。由于 EPISM 法使用了近似替代方法,因此对全息体视图再现像进行模拟时会在细节方面存在些许偏差,无法做到精准的还原,下一步将尝试解决这一问题,实现对 EPISM 法的光学再现结果进行精准的数值重构。

## 参 考 文 献

- [1] Debitetto D J. Holographic panoramic stereograms synthesized from white light recordings[J]. *Applied Optics*, 1969, 8(8): 1740-1741.
- [2] King M C, Noll A M, Berry D H. A new approach to computer-generated holography [J]. *Applied Optics*, 1970, 9(2): 471-475.
- [3] Yamaguchi M, Ohyama N. Holographic 3-D printer [J]. *Proceedings of SPIE*, 1990, 1212: 84-92.
- [4] Halle M W, Benton S A, Klug M A, *et al.* The generalized holographic stereogram[J]. *Proceedings of SPIE*, 1991, 1461: 142-155.
- [5] Halle M W. The generalized holographic stereogram [D]. [S.l.]: Massachusetts Institute of Technology, 1991.
- [6] Klug M A, Halle M W, Hubel P M. Full-color ultragrams[J]. *Proceedings of SPIE*, 1992, 1667: 110-119.
- [7] Klug M A, Halle M W, Lucente M E, *et al.* Compact prototype one-step ultragram printer [J]. *Proceedings of SPIE*, 1993, 1914: 15-24.
- [8] Halle M W. Holographic stereograms as discrete imaging systems [J]. *Proceedings of SPIE*, 1994, 2176: 73-84.
- [9] Halle M W, Kropp A B. Fast computer graphics rendering for full parallax spatial displays [J]. *Proceedings of SPIE*, 1997, 3011: 105-112.
- [10] Klug M A, Klein A, Plesniak W, *et al.* Optics for full-parallax holographic stereograms [J]. *Proceedings of SPIE*, 1997, 3011: 78-88.
- [11] Ratcliffe D B, Vergnes F M, Rodin A, *et al.* Holographic printer: 7800803[P]. 2003-08-21.
- [12] Ratcliffe D B, Vergnes F M, Rodin A, *et al.* Holographic printer:6930811[P]. 2005-08-16.
- [13] Ratcliffe D B, Rodin A, Hrynkiw L. A method of writing a composite 1-step hologram: US7333252 [P]. 2008-02-19.
- [14] Ratcliffe D B, Nikolskij A, Zacharovas S, *et al.* Image capture system for a digital holographic printer: 8154584[P]. 2012-04-10.
- [15] 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(29): 23523-23544.
- [16] 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(1): 4488.
- [17] Huang Y Q, Su J, Chen Y B, *et al.* Progress in holographic printing technique [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(4): 0406008. 黄应清, 苏健, 陈祎贝, 等. 全息打印技术研究进展 [J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(4): 0406008.
- [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): 851-860.
- [19] Huang Y Q, Zhao K, Jiang X Y, *et al.* Using wavefront plane to improve imaging resolution of holographic stereogram [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(2): 0209002. 黄应清, 赵锴, 蒋晓瑜, 等. 用波前平面提高全息体视图成像分辨率 [J]. *中国激光*, 2016, 43(2): 0209002.
- [20] Pei C, Jiang X Y, Yan X P, *et al.* A novel perspective slice method to improve resolution of reconstruction parallax image in holographic stereogram[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(9): 090901. 裴闯, 蒋晓瑜, 闫兴鹏, 等. 采用视角切片法提高全息体视图再现视差图像分辨率 [J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(9): 090901.
- [21] Park J, Stoykova E, Kang H, *et al.* Numerical reconstruction of full parallax holographic stereograms[J]. *3D Research*, 2012, 3(3): 6.
- [22] Park J, Kang H, Stoykova E, *et al.* Numerical reconstruction of a full parallax holographic stereogram with radial distortion [J]. *Optics Express*, 2014, 22(17): 20776-20788.