

针对一般情形的全息单元有效视角图像切片嵌合法 全息体视图打印

樊帆^{1,2}, 闫兴鹏¹, 李沛³, 张腾¹, 韩超¹, 王晨卿¹, 蒋晓瑜^{1*}

¹中国人民解放军陆军装甲兵学院信息通信系, 北京 100072;

²中国人民解放军陆军研究院建设与发展研究所, 北京 100012;

³深圳清华研究院, 广东 深圳 518057

摘要 基于全息单元的有效视角图像切片嵌合法是一种对两步法进行模拟的全息体视图打印方法, 这种方法可以利用少量的采样图像生成具有高质量再现像的全息体视图。但由于此方法要建立精确的全息单元对应关系来获取有效视角图像切片, 因此只有在满足一定位置约束条件的情形下才能使用。为解决这一问题, 提出了一种针对一般情形的全息单元有效视角图像切片嵌合法, 用于全息体视图打印。所提方法利用全息单元的近似对应替代全息单元的精确对应, 以获取有效视角图像切片, 使其适用于一般情形。经光学实验验证, 所提方法同样可以利用少量的采样图像生成具有高质量再现像的全息体视图, 与有效视角切片嵌合法进行比较, 虽然有效视角图像切片获取的方式不同, 但两种方法获得的全息体视图再现像的质量相当, 而所提方法的打印效率更高, 且可以对“像素对应”全息体视图进行改进。

关键词 全息; 全息体视图; 全息单元

中图分类号 O438.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.1209001

General Hogel-Based Effective Perspective Image Segmentation and Mosaicking Method for Holographic Stereogram Printing

Fan Fan^{1,2}, Yan Xingpeng¹, Li Pei³, Zhang Teng¹,
Han Chao¹, Wang Chenqing¹, Jiang Xiaoyu^{1*}

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

²Institute of Construction and Development, Academy of Army Research, Chinese People's Liberation Army, Beijing 100012, China;

³Research Institute of Tsinghua University in Shenzhen, Shenzhen, Guangdong 518057, China

Abstract The hogel-based effective perspective image segmentation and mosaicking (EPISM) method utilizes a two-step approach for holographic stereogram printing. This method can generate a holographic stereogram with high-quality reconstructed images using only a few sampled images. However, this method needs to establish an accurate correspondence among hogels to obtain effective perspective image segments, and it can be utilized only when certain position constraints are satisfied. To solve this problem, we propose a general hogel-based EPISM method for holographic stereogram printing in this study. The proposed method uses an approximate correspondence of hogels instead of an accurate correspondence of hogels to obtain several effective perspective image segments, so it can be applied to general cases. Furthermore, using optical experiments, we verify that the proposed method can generate a holographic stereogram with high-quality reconstructed images by employing a few sampled images. Although the way to obtain the effective perspective image segments is different, the reconstructed images of the

收稿日期: 2019-07-15; 修回日期: 2019-08-14; 录用日期: 2019-09-03

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: jiangxiaoyu2007@gmail.com

holographic stereograms obtained by the two methods are with the same good quality. The printing efficiency of the proposed method is higher than that of the EPISM method, and the proposed method can also be utilized to improve the "pixel correspondence" holographic stereogram.

Key words holography; holographic stereogram; hogel

OCIS codes 090.2870; 090.2900; 090.1995

1 引 言

全息体视图打印技术是一种已经在诸多领域被广泛应用的裸眼全息显示技术^[1],这种技术利用相机对三维场景进行采样,将采样图像经过处理后曝光到全息干板上生成全息单元(hogel)。对全息干板上的 hogel 依次进行曝光得到全息体视图。当观察全息体视图时,双目看到的分别是场景在相应视角的再现像,根据双目视差原理,可以观察到再现的三维场景。

全息打印技术最早由 Gabor^[2]在 1948 年提出,主要利用干涉记录、衍射还原的原理对实物进行全息打印。DeBitetto^[3]在 1969 年出了一种全息打印方法,这种方法利用相机在水平方向对三维场景进行采样,随后将采样得到的图像依次曝光到全息干板上的一系列全息狭缝上,这就是最早的水平视差(HPO)全息体视图。1970 年,King 等^[4]以此为基础提出了 HPO 型全息体视图打印方法,即两步法。20 世纪 90 年代,全息体视图技术迎来了重大的突破,Yamaguchi 等^[5]在 1990 年首次提出了通过一步打印过程获取全视差全息体视图的打印法。1991 年, Halle 等^[6]提出了称之为 Ultragram 的水平视差全息体视图打印法,这种方法可以实现任意景深,无失真的水平视差全息体视图打印。随后, Halle 等^[7-11]与 Klug 等^[12]将 Ultragram 推广到了全视差情形,并以此为基础成立了 Zebra imaging 公司。90 年代末, Brotherton-Ratcliffe 等创立了 Geola 公司,并致力于研究利用脉冲激光制作全息体视图。Brotherton-Ratcliffe 等^[13]在 2008 年提出了称为激光直写数字全息图(DWDH)的一步打印方法,基于这种方法与脉冲激光技术,Geola 公司进行了一系列的研究^[14-15],并开发了基于脉冲激光的商用全息体视图打印系统。2017 年,本课题组提出了一种称为有效视角图像切片嵌合(EPISM)法的全息体视图打印方法,用来通过一步打印过程对两步法进行模拟^[16],随后课题组基于此方法进行一系列的理论研究^[17-20]。2019 年课题组提出了基于全息单元的有效视角图像切片嵌合法的打印方法^[21]。基于全息单元的有效视角图像切片嵌合法,利用“全息单元

对应”替代“像素对应”的思路对两步法进行模拟,但必须满足特定的约束条件。除此以外,近年来很多研究小组对全息体视图技术在各个方面进行了深入的研究,并获取了很好的成果^[22-24]。

为了将基于全息单元的有效视角图像切片嵌合法应用于一般情形,本文将精确的全息单元对应替换为近似的全息单元对应,去掉了约束条件,给出了针对于一般情形的全息单元有效视角图像切片嵌合法。利用光学实验对提出的方法进行验证,所提方法可以在没有约束条件的情况下,通过较少的采样图像获得具有高质量再现像的全息体视图。与 EPISM 法的打印结果进行了比较,发现两种方法获得的再现像的质量相当,但提出的方法可以节约生成合成视角图像的时间,从而提升打印效率。

2 基于全息单元的有效视角图像切片嵌合法的基本原理

2.1 有效视角图像切片嵌合法

有效视角图像切片嵌合法是用计算机对两步法全息体视图进行模拟,从而通过一步打印过程获取全息体视图的打印方法。两步法全息体视图打印的记录过程可以简单描述如下:先通过相机对三维场景进行采样,将采样图像依次曝光在全息干板的全息单元上,生成全息母版(H_1 干板),而后将全息母版的再现像曝光到另一块全息单板的 hologel 单元上,生成转移干板(H_2 干板),从而得到两步法全息体视图。有效视角图像切片嵌合法利用计算机对 H_1 干板的生成与再现过程进行模拟,将计算机模拟的 H_1 干板记为虚拟 H_1 干板,将 H_2 干板上 hogel 的中心选为该 hogel 的观察点,记为 O 点。从 O 点观察虚拟 H_1 干板上的虚拟 hogel 时,观察点和虚拟 hogel 之间形成一个视锥,视锥与虚拟 hogel 对应的视角图像相交,则相交部分可以视为虚拟 hogel 对于 O 点的有效视角图像切片,如图 1(a)所示。将 O 点对应的所有有效视角图像切片嵌合在一起,则得到 O 点对应的合成视角图像。而利用 hogel 对应的合成视角图像对 hogel 依次进行曝光,则得到 EPISM 法有效视角图像切片嵌合法全息体视图,如图 1(b)所示,图中 LCD 为液晶显示器。

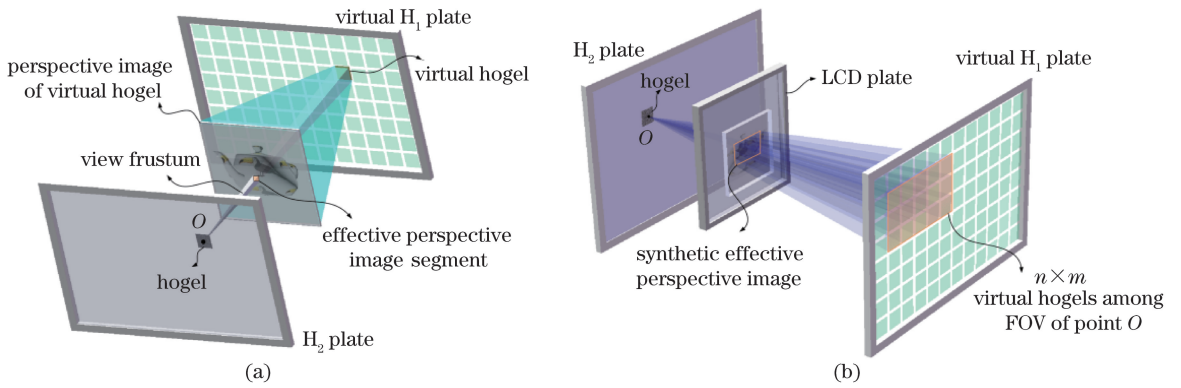


图 1 有效视角图像切片嵌合法的基本原理。(a)虚拟 hogel 有效视角图像切片的提取；

(b)由多个虚拟 hogel 嵌合构成合成视角图像

Fig. 1 Basic principle of effective perspective image segmentation and mosaicking method. (a) Extraction of effective perspective image segmentation corresponding to virtual hogel; (b) synthetic perspective image mosaicked by multiple virtual hogels

2.2 基于全息单元的有效视角图像切片嵌合法

基于全息单元的有效视角图像切片嵌合法和 EPISM 法类似,同样是利用计算机对 H₁ 干板的生成过程进行模拟,对两步法而言,从 H₂ 干板上的一点观察 H₁ 干板上的一点时,看到的是该点发出的一条光线。当 hogel 尺寸很小时,从 H₂ 干板上的 hogel 观察 H₁ 干板上的 hogel 时,可以近似地看成是该 hogel 发出的一条光束。根据这种思路,利用光束连接 H₂ 干板上的 hogel 与虚拟 H₁ 干板上的虚拟 hogel,该光束与虚拟 hogel 再现像的相交部分为有效视角图像切片,如图 2(a) 所示。将 hogel 对应的所有有效视角图像切片嵌合在一起,则得到用于对 hogel 进行曝光的合成视角图像。利用获得的合成视角图像对 H₂ 干板上的 hogel 依次进行曝光,则得到基于全息单元的有效视角图

像切片嵌合法全息体视图,如图 2(b) 所示。但此方法存在一个问题,H₁ 干板上相邻虚拟 hogel 对应的光束在 LCD 面板上的有效视角图像切片之间会有一部分重叠在一起,无法进行模拟。为了避免这种情形出现,将 LCD 面板按照有效视角图像切片尺寸进行分块,而后利用光束将 H₂ 干板上的 hogel 与有效视角图像切片的分块连接,用来寻找 H₁ 干板上对应的虚拟 hogel,如图 2(b) 所示。为此引入参数 k ,令 k 表示虚拟 H₁ 干板到虚拟 LCD 的距离与 H₂ 干板到真实 LCD 的距离的比值,使 k 为整数,这时虚拟 H₁ 干板的全息单元与 H₂ 干板的全息单元之间有精确对应的关系。以光束与虚拟 hogel 再现像相交的部分作为有效视角图像切片,则可得基于全息单元的有效视角图像切片嵌合法全息体视图。

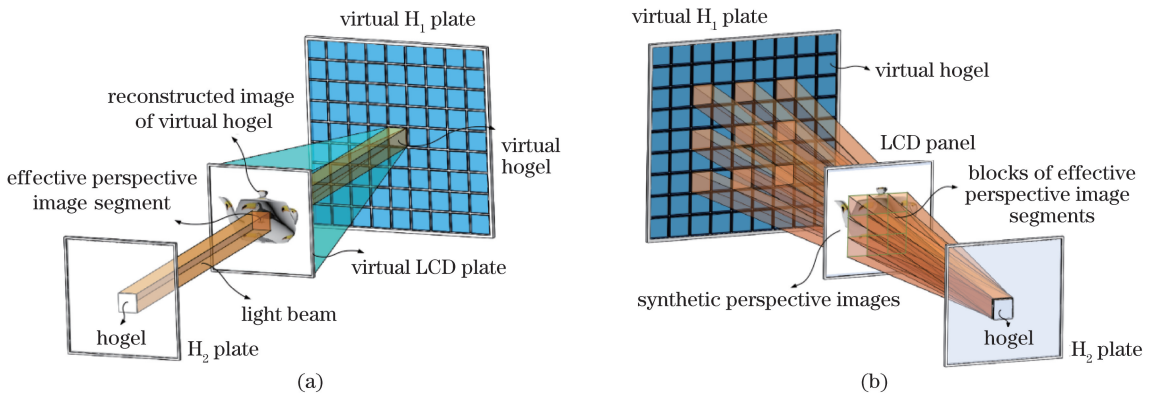


图 2 基于全息单元的有效视角图像切片嵌合法的基本原理($k=1$)。

(a)虚拟 hogel 有效视角图像切片的提取;(b)合成视角图像的获取

Fig. 2 Basic principle of hogel-based effective perspective image segmentation and mosaicking method ($k=1$).

(a) Extraction of effective perspective image segment with virtual hogel; (b) acquisition of synthetic perspective image

3 针对一般情形的全息单元有效视角图像切片嵌合法

3.1 基本原理

基于全息单元的有效视角图像切片嵌合法引入参数 k , 以保证虚拟 H_1 干板的全息单元与 H_2 干板的全息单元之间可以建立精确的对应关系, 但这使得该方法只能在 k 为整数的情形下应用。为了解决这一个问题, 本研究用全息单元的近似对应替代精确对应, 进而去除了这一约束条件, 给出了针对一般情形的全息单元有效视角图像切片嵌合法。

对于一般情形, 虚拟 H_1 干板到虚拟 LCD 的距离与 H_2 干板到真实 LCD 的距离是自由选取的, 这样连接 H_2 干板的全息单元与 LCD 上有效视角图

像切片分块的光束与 H_1 干板的相交区域未必能落在全息单元上, 这样就无法直接找到对应的全息单元, 也无法使再现像与光束相交以获取有效视角图像切片。为了解决这一问题, 选择相交区域的中心点所在的虚拟 hogel 作为近似的全息单元, 并将其再现像与光束相交的部分作为对应的有效视角图像切片, 如图 3(a) 所示。按照这种思路, 将 LCD 显示区域按照有效视角图像切片尺寸进行分块, 利用光束连接全息单元与有效视角图像切片子块, 找到近似的全息单元, 将其再现像与光束相交的部分作为有效视角图像切片加载到 LCD 的相应区域上, 将全部的有效视角图像切片嵌合在一起, 得到用于对 H_2 干板的全息单元进行曝光的合成视角图像, 如图 3(b) 所示。

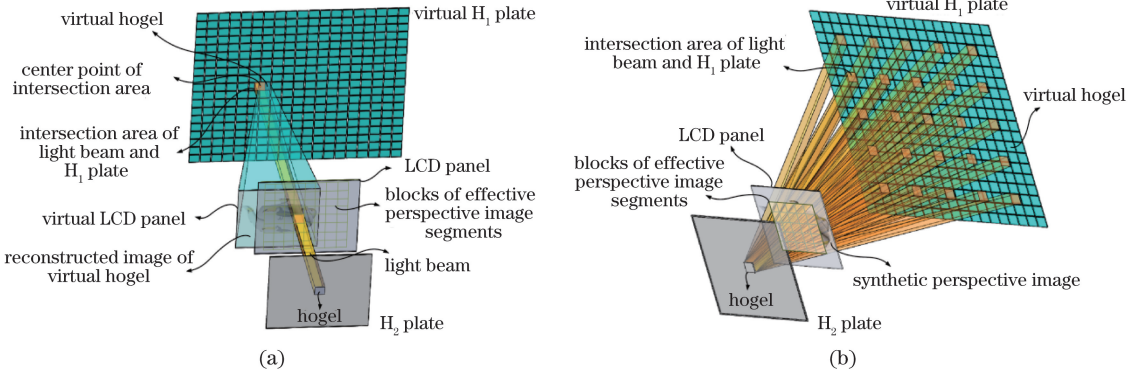


图 3 针对于一般情形的全息单元有效视角图像切片嵌合法原理。
(a) 虚拟 hogel 有效视角图像切片的提取; (b) 合成视角图像的获取

Fig. 3 Basic principle of general hogel-based effective perspective image segmentation and mosaicking method.

(a) Extraction of effective perspective image segment with virtual hogel; (b) acquisition of synthetic perspective image

3.2 具体算法

3.2.1 确定虚拟 H_1 干板所需虚拟全息单元数目

要确定虚拟 H_1 干板所需虚拟 hogel 的数目, 首先要设定一些参数。如图 4 所示, 将 H_1 干板与 LCD 之间的距离记为 L_1 , H_2 干板与 LCD 之间的距离记为 L_2 , H_2 干板上 hogel 的视场角记为 θ , 这时被视场覆盖的 LCD 的有效尺寸为 $D_{LCD,r} = L_2 \tan \frac{\theta}{2}$, 而相机的采样视场角应等于或略大于 θ ,

以保证可以通过近似 hogel 获取有效视角图像切片。将有效视角图像切片的尺寸记为 l_{LCD} , H_1 干板上的 hogel 的尺寸记为 l_1 , H_2 干板上的 hogel 尺寸记为 l_2 , 则根据有效视角图像切片的获取方法得到 $l_1 = l_2 = l_{LCD} = l$ 。

分别用 $hogel_r$ 与 $hogel_v$ 来区分真实的 H_2 干板与虚拟的 H_1 干板上的 hogel, 用上标表示 hogel 的序号, 如 $hogel_r^i$ 表示 H_2 干板的第 i 个 hogel。

如图 5 所示, 将 LCD 按照有效视角图像切片的尺寸进行分块, 这时视场中最多包含的子块数为 $N_{LCD,r} = \text{floor}\left(\frac{D_{LCD,r}}{l}\right)$, 这里 $\text{floor}(\cdot)$ 表示向下取整。为了满足 LCD 的分块为奇数个, 使位于中心子块两侧的子块数量相等, 若 $N_{LCD,r}$ 为偶数, 则令 LCD 的实际显示区域略小于视场覆盖的 LCD 区域, 使其包含 $N_{LCD,r} - 1$ 个子块即可, 用 n_{add} 表示位于中心子块两侧的子块数目, 则有

$$n_{add} = \begin{cases} \frac{N_{LCD,r} - 1}{2} & , \text{if } N_{LCD,r} \text{ is odd} \\ \frac{N_{LCD,r} - 2}{2} & , \text{if } N_{LCD,r} \text{ is even} \end{cases} \quad (1)$$

利用 $m = -n_{add}/n_{add}$ 来表示有效视角图像切片子块, 当 $m = 0$ 时, 对应的就是第 0 个有效视角图像切片子块, 即中心子块, 位于第 0 个子块左侧的子块用负值表示, 如 LCD 左侧的第 n_{add} 子块为 $m =$

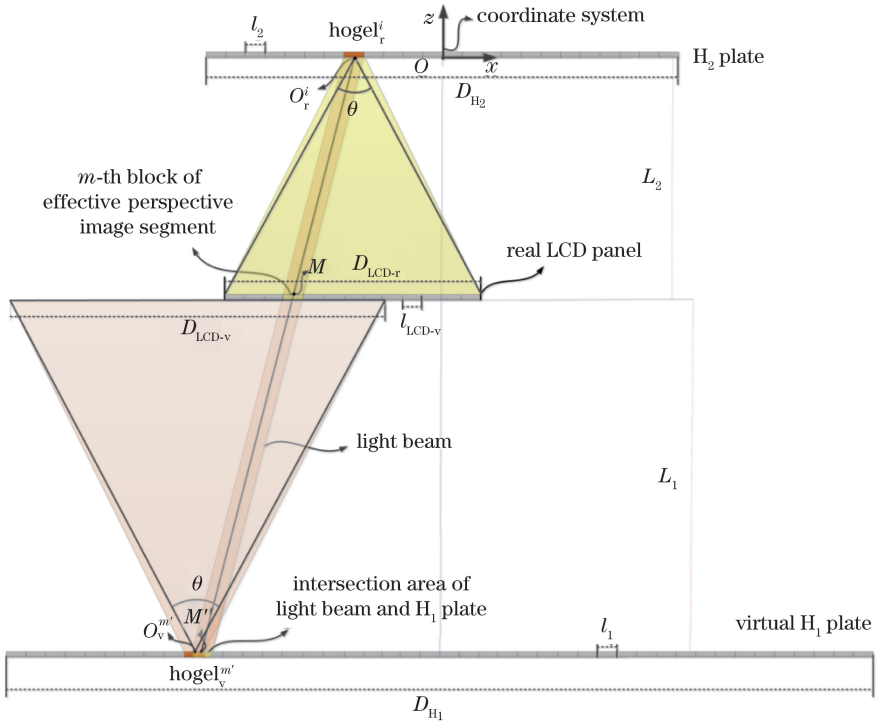


图 4 针对一般情形的全息单元有效视角图像切片嵌合法的参数设置以及有效视角图像切片的获取方法
 Fig. 4 Parameter setting of general hogel-based effective perspective image segmentation and mosaicking method and acquisition method of effective perspective image segment

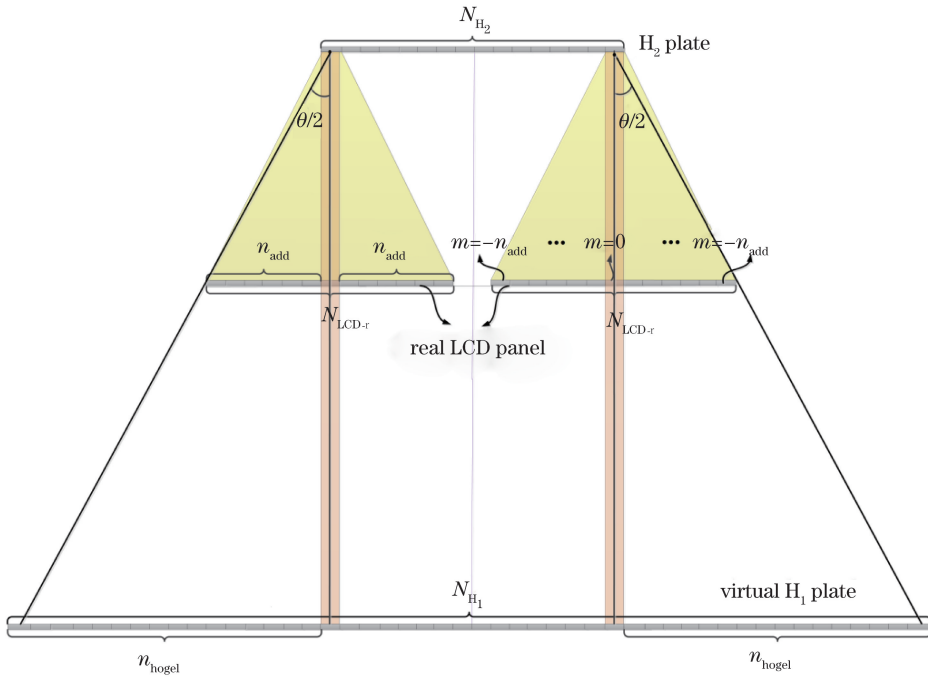


图 5 虚拟 H₁ 干板所需虚拟全息单元数目的确定

Fig. 5 Determination of number of virtual hogels on virtual H₁ plate

$-n_{\text{add}}$, 而位于第 0 个子块右侧的子块用正值表示, 如 LCD 右侧的第 n_{add} 子块为 $m = n_{\text{add}}$ 。

虚拟 H₁ 干板的全息单元总数记为 N_{H_1} , H₂ 干板上的全息单元总数记为 N_{H_2} , 用 n_{hogel} 表示虚拟

H₁ 干板两端超出 H₂ 干板上 hogel 对应部分的 hogel 数目, 则有

$$n_{\text{hogel}} = \text{ceiling} \left[(L_1 + L_2) \cdot \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) / l \right], \quad (2)$$

式中: $\text{ceiling}(\cdot)$ 表示向上取整。 $N_{H_1} = N_{H_2} + 2n_{\text{hogel}}$, 且 $D_{H_1} = N_{H_1} \times l$ 为 H_1 干板的长度。

3.2.2 有效视角图像切片以及合成视角图像的获取

如图 4 所示, 仍以 H_2 干板的第 i 个 hogel (hogel_r^i) 为例, 若要获得用来对 hogel_r^i 进行曝光的合成视角图像, 先要获取有效视角图像切片。将用来加载合成视角图像的 LCD 按有效视角图像切片的尺寸 l 进行分块, 针对第 m 个有效视角切片子块的位置, 利用光束连接 hogel_r^i 和有效视角图像切片子块, 该光束与 H_1 干板相交区域并未与 H_1 干板上的 hogel 重合。若将第 m 个有效视角切片中心记为 M , 相交区域中心记为 M' , 将 M' 点所在的虚拟 H_1 干板上的 hogel 选择为近似 hogel, 并将其记为 $\text{hogel}_v^{m'}$, $\text{hogel}_v^{m'}$ 表示虚拟 H_1 干板上的第 m' 个 hogel。 $\text{hogel}_v^{m'}$ 的再现像与第 m 个有效视角切片子块相交部分就是要获取的有效视角图像切片。具体算法可以表示如下。

如图 4 所示, 以 H_2 干板中心点 O 建立坐标系, hogel_r^i 的中心点 O_r^i 的坐标可以表示为

$$x_r^i = i \times l - \frac{l}{2} - \frac{D_{H_2}}{2}, \quad (3)$$

式中: $D_{H_2} = N_{H_2} \times l$ 为 H_2 干板的长度; N_{H_2} 表示 H_2 干板包含的 hogel 个数; 第 m 个有效视角图像切片子块中心点 M 的坐标为

$$x_m = x_r^i + m \times l. \quad (4)$$

用直线连接 O_r^i 与 M , 若连线与 H_1 干板相交点记为 M' , 则坐标记为

$$x_{M'} = x_r^i + (x_m - x_r^i) \frac{L_1 + L_2}{L_2}. \quad (5)$$

由于 M' 所在的 $\text{hogel}_v^{m'}$ 为 H_1 干板上的第 m' 个 hogel, 则有

$$m' = \text{ceiling} \left[\left(x_{M'} + \frac{D_{H_1}}{2} \right) / l \right], \quad (6)$$

且 $\text{hogel}_v^{m'}$ 的中心点 $O_v^{m'}$ 的坐标表示为

$$x_v^{m'} = m' \times l - \frac{l}{2} + \frac{D_{H_1}}{2}. \quad (7)$$

由于有效视角图像切片子块的中点 M 的坐标为 x_m , 则该有效视角图像切片子块可表示为 $\left(x_m - \frac{l}{2}, x_m + \frac{l}{2} \right)$, 结合有效视角图像切片子块以及 $O_v^{m'}$ 的坐标可找出有效视角图像切片子块在 $\text{hogel}_v^{m'}$ 的再现像上对应的像素, 将这些像素加载到真实 LCD 面板上, 对应于有效视角图像切片子块的位置, 则可以得到可用于对 hogel_r^i 进行曝光的一个

有效视角图像切片。重复以上过程, 找到真实 LCD 面板上所有有效视角图像切片对应的像素并加载到真实 LCD 面板上, 则得到可用于对 hogel_r^i 进行曝光的合成视角图像。对 H_2 干板上的 hogel 依次进行曝光, 则可得到针对于一般情形的全息单元有效视角图像切片嵌合法全息体视图。

4 实验验证

采用带有贴图的茶壶模型作为三维场景, 茶壶的三维尺寸为宽 3.2 cm、高 2.4 cm、深 4 cm, 倾斜 40° 放置。由于 H_1 干板与 H_2 干板上全息单元的尺寸相等, 且等于有效视角图像切片分块的尺寸, 得到 $l_1 = l_2 = l_{\text{LCD}} = l$ 。选取 $l = 0.2$ cm, 采样相机放置在茶壶模型前方 18.6 cm 的位置, 用来加载合成视角图像的 LCD 放置在 H_2 干板前方 11.4 cm 的位置, 选取 $N_{H_2} = 30$, 则 H_2 干板包含的全息单元总数为 $N_{H_2} \times N_{H_2} = 900$ 。设全息单元视场角 $\theta = 30^\circ$, 采样相机的采样视场角应略大于全息单元视场角, 以保证有效视角图像切片可以从近似替代的全息单元的再现像上取得, 这里采样相机 30° 的视场角恰好能满足需要, 采样图像的分辨率为 $1000 \text{ pixel} \times 1000 \text{ pixel}$ 。根据以上提供的参数, 可得到合成有效视角图像的分辨率为 $580 \text{ pixel} \times 580 \text{ pixel}$ 。由上述条件可得 $N_{H_1} = 110$, 由于 H_1 干板上的虚拟 hogel 是相机在虚拟 hogel 的位置捕捉的采样图像直接对虚拟 hogel 曝光得到的, 因此所需相机采样图像的数量与 H_1 干板上虚拟 hogel 的数目是一致的, 即所需相机采样图像的数量为 $N_{H_1} \times N_{H_1} = 110 \times 110 = 12100$ 。

相机的采样图像如图 6 所示, 图 6(a)~(c) 分别表示相机位于左上方、中心、右下方进行采样时获取的视角图像。

基于采样图像生成的合成视角图像如图 7 所示, 图像左上方的 $\text{image}(a, b)$ 代表其对应的是 H_2 干板上第 a 行第 b 列的 hogel。

之后进行实验光路的搭建, 光路设置如图 8 所示。选取单纵模线偏振固态红光激光器作为激光光源, 其有效功率为 400 mW, 中心波长为 639 nm。一个电动快门被放置在激光器之前用来控制曝光时间, 利用反射镜将激光反射到一个分束棱镜处, 激光被分为两束, 一束作为物光, 另一束作为参考光。物光与参考光都经过衰减片以调整物光与参考光的光能量密度比例, 即每秒照射在 1 cm^2 区域内的物光与参考光的能量之比。物光经过一个空间光调制器

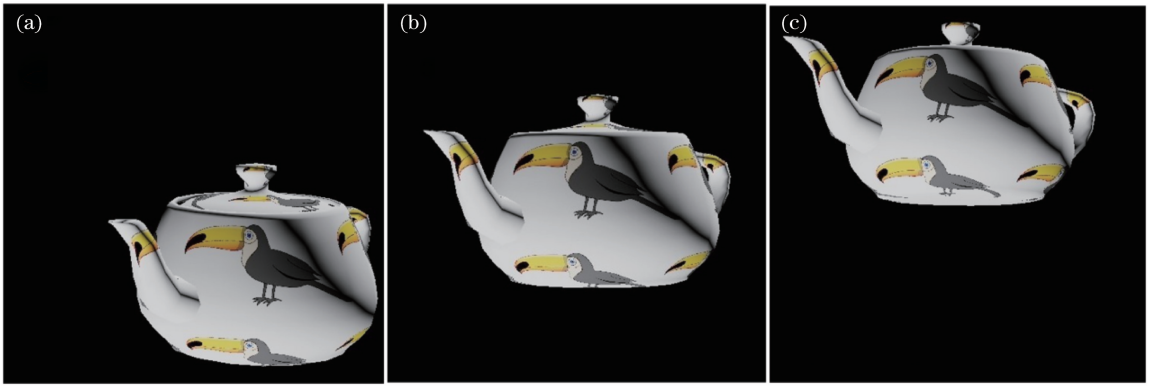


图 6 相机在不同位置的采样图像。(a)相机在左上方采样获得的视角图像；
(b)相机在中心位置采样获得的视角图像；(c)相机在右下方采样获得的视角图像

Fig. 6 Sampled images in different camera locations. (a) Perspective image sampled by camera in left-top location; (b) perspective image sampled by camera in central location; (c) perspective image sampled by camera in right-bottom location

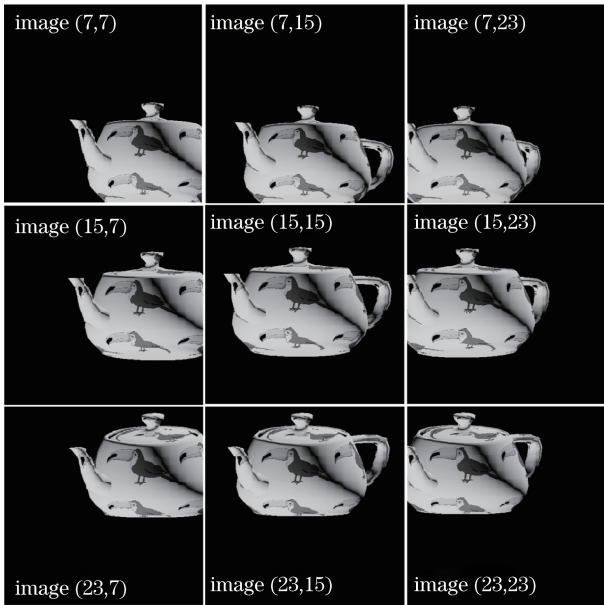


图 7 不同位置的全息单元对应的合成视角图像

Fig. 7 Synthetic perspective images corresponding to hogels at different positions

滤掉高频波后,照射到 LCD 的显示区域,该 LCD 屏幕的显示区域为 8.9 inch(1 inch=2.54 cm),包含的像素个数为 1920×1200 ,即每 $1 \text{ cm} \times 1 \text{ cm}$ 的显示区域大约为 $100 \text{ pixel} \times 100 \text{ pixel}$ 。紧贴着 LCD 放置一个弥散屏将物光扩散开,将全息干板放置在 LCD 前方 11.4 cm 的位置,并在全息干板两侧放置两个带孔径的挡板,扩散后的物光透过全息干板前方的孔径照亮全息干板前方的方形区域。参考光经过反射镜反射到全息干板后方,利用空间光调制器滤掉高频波后,再经过透镜转换为平行光,透过全息干板后方的孔径照亮干板后方的方形区域,物光与参考光在孔径位置发生干涉,生成 hogel。全息干板被放置在 X-Y 移动平台上,可编程的控制器用来控制移动台,而移动台、快门以及 LCD 面板通过一个专门编写的软件实现同步。采用定制的银盐干板用作全息记录介质,其感光度为 $E = 1250 \mu\text{J}/\text{cm}^2$,将曝光时间记为 T_e ,用 P_s 表示物光的光能量密度,用 P_r 表示参考光的光能量密度,则银盐干板的曝

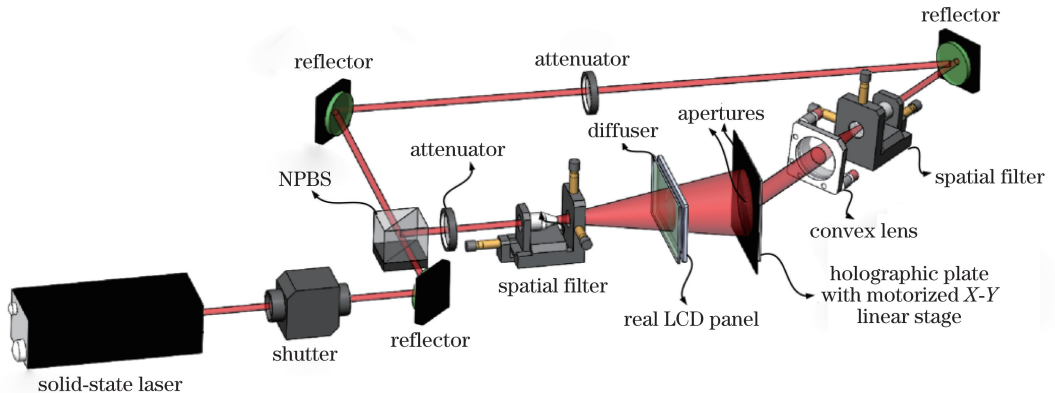


图 8 全息体视图打印系统的光路设置

Fig. 8 Optical setup of holographic stereogram printing system

光时间可以表示为 $T_e = E / (P_s + P_r)$ 。设置物光与参考光能量密度的比值为 1/30 以节省打印时间,物光的光能量密度为 $10 \mu\text{W}/\text{cm}^2$,参考光的光能量密度为 $300 \mu\text{W}/\text{cm}^2$,因此曝光时间为 4 s,静态时间为 16 s,总共需要的打印时间为 18000 s。

图 9 展示的是利用相机从不同观察角度对全息视图进行拍摄得到的再现像,其中在下标为 $(+10^\circ, -10^\circ)$ 的图中, $+10^\circ$ 表示水平方向的拍摄角度, -10° 表示垂直方向的拍摄角度,在水平方向从干板右侧拍摄的角度为正,从干板左侧拍摄为负。在垂直方向从干板上方向拍摄的角度为正,从干板下方拍摄的角度为负。如 $(+10^\circ, -10^\circ)$ 表示的是相机在水平方向从右方 10° 位置、在垂直方向从下方 10° 位置拍摄所得到的再现像。当相机在水平方向从 -10° 到 $+10^\circ$ 进行拍摄时,茶壶的壶把逐渐地显现出来。而当相机在垂直方向从 -10° 到 $+10^\circ$ 进行拍摄时,茶壶的壶盖逐渐从被遮挡变到部分显现。由于采样相机并非在所有的位罝都能获取完整的三维场景信息,因此实际能观察到的完整三维场景的角度要小于全息单元的视场角 θ ,即小于 30° 。由于合成视角图像位于 LCD 显示区域的位置到全息干板前方孔径的距离不同,因此透过 LCD 加载的合成视角图像透过孔径照射到相应全息单元的物光强度也不同,这就造成位于中间位置的再现像较明亮,而位于边缘位置的再现像相对略暗,但在各个视角都可以清晰地观察到三维场景的再现像。

将两个同样的刻度尺放置在全息干板旁用来对再现距离进行分析,刻度尺左侧的刻度单位为厘米,右侧的刻度单位为英寸。其中右侧刻度尺放置在原来 LCD 所在的位置,即距干板 11.4 cm,左侧刻度尺紧贴干板放置,如图 10(a) 所示,将相机放置在距离全息干板 25 cm 位置进行拍摄,当聚焦在右侧刻度尺位置时,可以拍摄到右侧刻度尺的刻度与茶壶上再现像的细节,如图 10(b) 所示。当聚焦在左侧刻度尺位置时,可以拍摄到左侧刻度尺的刻度以及全息干板上的再现像的轮廓,如图 10(c) 所示。这意味着在 11.4 cm 的深度位置可以获得高质量的再现像。由于远离成像平面时,再现像不再精确会聚于像点,而是在各 hogel 区域形成亮斑,因此全息干板处的再现像轮廓要比会聚于成像平面的清晰再现像略大。

与 EPISM 法进行比较,通过 EPISM 法按照相同的全息单元尺寸与位置关系生成的合成视角图像如图 11(a) 所示,这种方法利用观察点 O 与虚拟

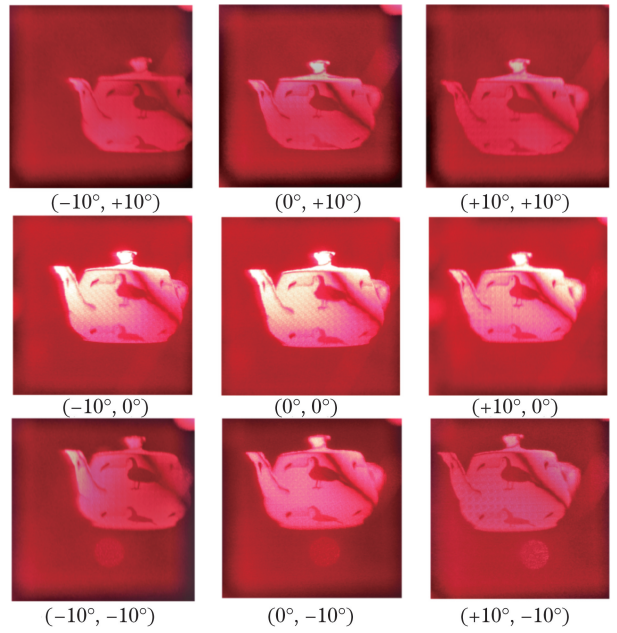


图 9 不同观察角度的光学再现像

Fig. 9 Optical reconstructed images at different viewing positions

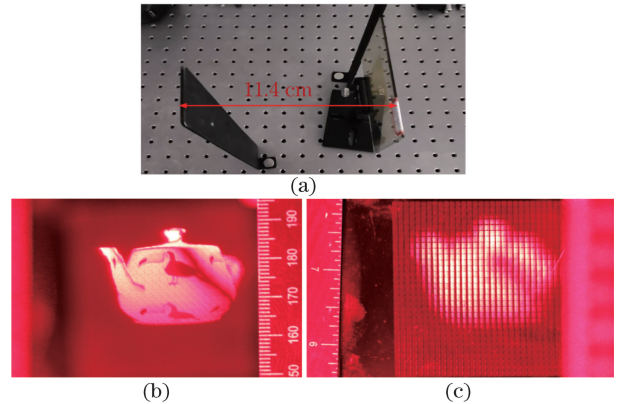


图 10 三维场景的浮显再现像。(a)干板与两个刻度尺之间的位置关系;(b)聚焦于右侧刻度尺时清晰的再现像;(c)聚焦于左侧刻度尺时干板上只有再现像的轮廓

Fig. 10 Floating reconstructed images of three-dimensional scene. (a) Position relation between holographic plate and two rulers; (b) clear reconstructed image when light is focused on right ruler; (c) only contour of reconstructed image on holographic plate when light is focused on left ruler

hogel 之间的视锥生成有效视角图像切片,使得有效视角图像切片的尺寸较小,合成视角图像较为平滑。而针对一般情形的全息单元有效视角图像切片法的合成视角图像,如图 11(b) 所示,由于利用全息单元对应的方式生成有效视角图像切片,因此有效视角图像切片的尺寸较大,合成视角图像中的子块

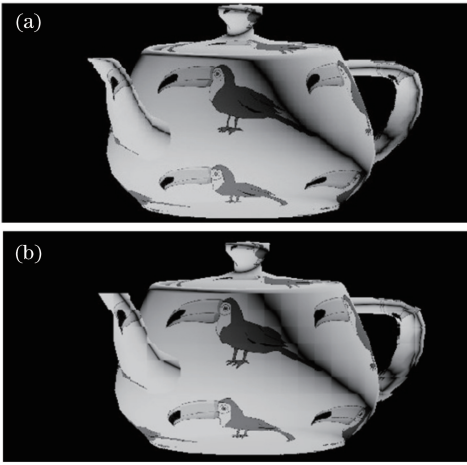


图 11 合成视角图像的比较。(a)EPISM 法的合成视角图像;(b)针对一般情形的全息单元有效视角图像切片嵌合法的合成视角图像

Fig. 11 Comparisons of synthetic perspective images. (a) Synthetic perspective image obtained by EPISM method; (b) synthetic perspective image obtained by general hogel-based effective perspective image segmentation and mosaicking method

较明显。而要考虑有效视角图像切片的尺寸对合成视角图像的影响,以人眼的明视距离 25 cm 为例,根据瑞利判据可知,当有效视角图像切片的尺寸为 0.1 mm 时,相邻的有效视角图像切片几乎无法分辨,因此可以忽略有效视角图像切片尺寸对合成视角图像的影响。由于 0.1 mm 也是像素的基本尺寸,因此当有效视角图像切片尺寸为 0.1 mm 时,该方法可以等同于基于像素对应的全息体视图打印方法。但实际上由于全息单元的尺寸很难达到 0.1 mm,通常的全息单元尺寸一般在 0.4 mm 到 1.6 mm,考虑到打印效率问题,本研究采用的全息单元尺寸为 2 mm。容易发现全息单元尺寸越接近 0.1 cm,则合成视角图像效果越好,但所需的采样图像数量也相应越多,而全息单元尺寸越大,则合成视角图像拼接效果越明显,并且所需采样图像数量越少,如何寻找最佳的全息单元尺寸还需要进一步研究。但由于全息单元对应方式与传统全息体视图像素对应的方式较为近似,因此当全息单元尺寸较小时,可以作为像素对应的替代方法用于减少所需采样图像的数量。

如果采用像素对应关系制作全息体视图,由于一张采样图像中仅有一个像素被用于生成对全息单元进行曝光的图像,因此要制作分辨率为 580 pixel×580 pixel 的曝光图像,需要 336400 张采样图像,即便利用算法减少采样图像数量,至少也需

要十余万张采样图像。而如果可以用全息单元对应替代像素对应,则所需的采样图像数量直接减少到 12100 张,极大地提高了图像的利用率。有效视角图像切片法虽然同样可以大幅减少采样图像数量,但曝光图像获取的方式与传统的像素对应法有较大差异,因此无法用于传统的基于像素对应的全息体视图的改进。而基于全息单元的有效视角图像切片法必须满足采样距离 L_1 为曝光距离 L_2 的整数倍这一约束条件,这使得此种方法的使用场景极其有限。

从生成合成视角图像时间角度考虑,由于提出方法只需从部分视角图像获取有效视角图像切片且算法较简单,因此生成用于曝光的合成视角图像的时间要远少于 EPISM 法,此实验中,EPISM 法生成合成视角图像所需时间大约为 150 s,而提出的方法只需约 25 s。

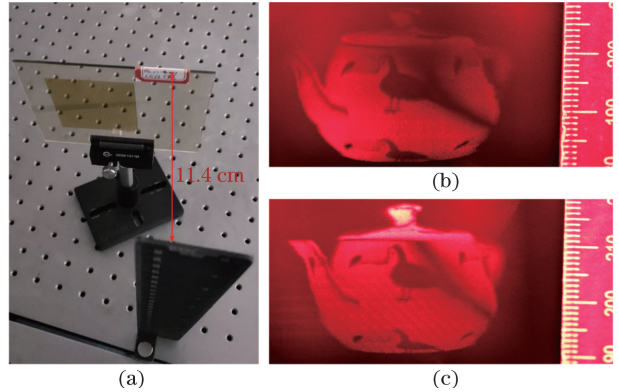


图 12 再现像的比较。(a)全息干板与刻度尺之间的位置关系;(b)EPISM 法全息体视图的再现像;(c)针对一般情形的全息单元有效视角图像嵌合法全息体视图的再现像

Fig. 12 Comparisons of reconstructed images. (a) Position relation between holographic plate and ruler; (b) reconstructed image obtained by EPISM method; (c) reconstructed image obtained by general hogel-based effective perspective image segmentation and mosaicking method

将 EPISM 法与提出方法的再现像进行比较,如图 12 (a) 所示,将刻度尺放置于距全息干板 11.4 cm 的位置来获取再现像,图 12 (b) 中展示的是 EPISM 法全息体视图的再现像,图 12 (c) 中展示的是针对一般情形的全息单元有效视角图像嵌合法全息体视图的再现像。与 EPISM 法相比较,合成视角图像的总像素数并没有太大差异 (EPISM 法为 600 pixel×600 pixel,提出方法为 580 pixel×580 pixel),因此两种方法的再现像分辨率没有明显

差别。而对比两个再现像的贴图细节(两张图像壶底的鸟的贴图)可以发现,EPISM法在清晰度方面略高于提出的方法,这是由EPISM法的合成视角图像较为细腻造成的,两种方法的再现像的差别及其成因还需要从成像原理方面进行建模分析。

5 结 论

给出了针对一般情形的全息单元有效视角图像切片嵌合法,该方法利用在全息单元之间建立近似对应关系的方式来获取有效视角图像切片,进而生成全息单元曝光所需的合成视角图像。这种方法消除了基于全息单元的有效视角图像切片嵌合法为建立精确的全息单元对应所引入的距离约束条件,使得全息单元有效视角图像切片嵌合法可以被应用于一般情形。经过光学实验验证,提出的方法可以利用少量的采样图像获取具有高质量再现像的全息体视图,并且与EPISM法进行对比,再现像的质量相当,而获取合成视角图像的时间要远少于EPISM法。由于全息单元的对应方式与传统全息体视图所采用的像素对应方式近似,因此这种方法可用于改进基于像素对应的全息体视图打印方法。

参 考 文 献

- [1] Lucente M. The first 20 years of holographic video and the next 20 [C]//SMPTE 2nd Annual International Conference on Stereoscopic 3D for Media and Entertainment, June 21-22, 2011, New York, USA. USA: SMPTE, 2011.
- [2] Gabor D. A new microscopic principle[J]. Nature, 1948, 161(4098): 777-778.
- [3] DeBitetto D J. Holographic panoramic stereograms synthesized from white light recordings[J]. Applied Optics, 1969, 8(8): 1740-1741.
- [4] King M C, Noll A M, Berry D H. A new approach to computer-generated holography [J]. Applied Optics, 1970, 9(2): 471-475.
- [5] Yamaguchi M, Ohyama N, Honda T. Holographic 3-D printer[J]. Proceedings of SPIE, 1990, 1212: 84-92.
- [6] Halle M W, Benton S A, Klug M A, *et al.* Ultragram: a generalized holographic stereogram[J]. Proceedings of SPIE, 1991, 1461: 142-155.
- [7] Halle M W. The generalized holographic stereogram [D]. USA: Massachusetts Institute of Technology, 1991.
- [8] Klug M A, Halle M W, Hubel P M. Full-color ultragrams[J]. Proceedings of SPIE, 1992, 1667: 110-119.
- [9] 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.
- [10] Halle M W. Holographic stereograms as discrete imaging systems [J]. Proceedings of SPIE, 1994, 2176: 73-84.
- [11] Halle M W, Kropp A B. Fast computer graphics rendering for full parallax spatial displays [J]. Proceedings of SPIE, 1997, 3011: 105-112.
- [12] Klug M A, Klein A, Plesniak W, *et al.* Optics for full-parallax holographic stereograms [J]. Proceedings of SPIE, 1997, 3011: 78-88.
- [13] Brotherton-Ratcliffe D, Rodin A, Hrynkiw L. Method of writing a composite 1-step hologram: US7333252 [P/OL]. 2008-02-19 [2019-07-14]. <https://patents.glgoo.top/patent/US7333252B2/en>.
- [14] Brotherton-Ratcliffe D, Nikolskij A, Zacharovas S, *et al.* Image capture system for a digital holographic printer: US8154584 [P/OL]. 2012-04-10 [2019-07-14]. <https://patents.glgoo.top/patent/US8154584B2/en>.
- [15] Bjelkhagen H, Brotherton-Ratcliffe D. Ultra-realistic imaging: advanced techniques in analogue and digital colour holography [M]. Boca Raton: CRC Press, 2016.
- [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, 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] Fan F, Jiang X Y, Yan X P, *et al.* Holographic element-based effective perspective image segmentation and mosaicking holographic stereogram printing[J]. Applied Sciences, 2019, 9(5): 920.
- [22] Zhang H, Cao L C, Jin G F. Scaling of three-dimensional computer-generated holograms with layer-based shifted Fresnel diffraction [J]. Applied Sciences, 2019, 9(10): 2118.
- [23] Gao H Y, Xu F, Liu J C, *et al.* Holographic three-dimensional virtual reality and augmented reality display based on 4K-spatial light modulators [J]. Applied Sciences, 2019, 9(6): 1182.
- [24] Ma J S, Wei Y F, Su P. A binocular stereo-view 3D reconstruction algorithm based on contour extraction and depth screening [J]. Computer Engineering & Science, 2018, 40(4): 665-672.
- 马建设, 魏云峰, 苏萍. 基于轮廓提取与深度筛选的双目三维重构技术[J]. 计算机工程与科学, 2018, 40(4): 665-672.