

# 赝像-正像转换算法在全息体视图打印中的应用

张腾, 闫兴鹏\*, 王晨卿, 汪熙, 陈颂, 陈卓, 蒋晓瑜

陆军装甲兵学院信息通信系, 北京 100072

**摘要** 将适用于三维场景信息非对称采集和显示的赝像-正像转换(POC)算法应用于全息体视图打印,得到了采样平面与全息图平面的距离、采样间隔与全息单元尺寸比例不同时,采样图像和合成视差图像之间的像素匹配关系。分析了曝光光学系统参数和 POC 算法参数对体视图再现像视场角的影响,得到了场景深度和视场角之间的制约关系。实验通过在不同场景深度下三维物体的再现,验证了 POC 算法对全息体视图打印的适用性以及场景深度和视场角之间制约关系的正确性。实验结果表明,当场景深度较小时,再现像重影导致分辨率降低,并从理论上分析了全息体视图重影现象产生的原因。像素级精确的视差图像避免了数据误差对体视图再现质量的影响,对提高再现像分辨率有积极意义。

**关键词** 全息; 全息体视图; 赝像-正像转换; 场景深度; 视场角

中图分类号 O438.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0909001

## Application of Pseudoscopic-Orthoscopic Conversion Algorithm in Holographic Stereogram Printing

Zhang Teng, Yan Xingpeng\*, Wang Chenqing, Wang Xi, Chen Song,  
Chen Zhuo, Jiang Xiaoyu

*Department of Information Communication, Academy of Army Armored Forces, Beijing 100072, China*

**Abstract** The pseudoscopic-orthoscopic conversion (POC) algorithm, which is applicable to asymmetrical capture and display of three-dimensional (3D) scene information, is utilized to perform the holographic stereogram printing. The matching relationship between pixels on the sampled image and the synthetic parallax image is obtained under different distances between the sampling plane and the holographic plane and different ratios of sampling interval to holographic unit size. The influences of exposure optical system parameters and POC algorithm parameters on the field of view of the stereogram are also analyzed, and the relationship between scene depth and field of view is obtained. The experimental results demonstrate the applicability of POC algorithm to holographic stereogram printing and the validity of the relationship between scene depth and field of view by reconstructing 3D objects at different scene depths. The resolution is reduced because of the reconstructed image ghosting when the depth of the scene is small, and reasons for the ghosting of the holographic stereogram are also explained. The accurate parallax image at the pixel level avoids the influence of data error on the quality of holographic stereogram, and has positive significance in improving the resolution of the reconstructed image.

**Key words** holography; holographic stereogram; pseudoscopic-orthoscopic conversion; scene depth; field of view

**OCIS codes** 090.2870; 090.2910; 090.1970

## 1 引言

全息体视图打印是近年来全息打印技术的研究热点<sup>[1-8]</sup>,该技术将双目视差效应运用于全息图的制

作,用有限的、离散的二维图像来形成近似连续的三维场景,是一种区别于传统全息图的打印技术。全息体视图打印技术的核心思想是,通过与全息干板位置相对变化的掩模独立曝光全息图,形成多个子

收稿日期: 2019-03-15; 修回日期: 2019-04-30; 录用日期: 2019-05-17

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

\* E-mail: yanxp@foxmail.com

全息图,子全息图又被称作全息单元(hogel),再现时掩模对再现光线的遮挡作用,使得不同位置观察到的图像不同,当不同图像满足合理视差关系时,就可以观察到立体效果。全息体视图打印技术由曝光图像生成算法和曝光光学系统两部分组成。全息打印中曝光图像生成算法的主要目的是,把采样得到的视差图像信息通过必要的算法进行采样编码,得到可用于打印到全息干板的曝光图像。按照生成全息单元方式的不同,曝光光学系统可以分为光阑遮挡形成全息单元和透镜聚焦形成全息单元两种<sup>[9]</sup>。

Yamaguchi 等<sup>[10]</sup>提出了一种全息体视图打印新技术。通过计算穿过全息图平面某一点的所有光线得到相应全息单元的视差图像,将视差图像加载到空间光调制器(SLM)上,在 SLM 后放置球面透镜,使光线会聚到全息单元处并与参考光发生干涉,完成一个全息单元的打印。通过这种方法打印的全息图再现像具有无畸变和全视差等特点。Halle<sup>[11]</sup>把图像预处理技术引入体视图打印中,解决了水平全息体视图再现像畸变问题。详细分析了水平视差全息体视图打印技术中图像采集、全息曝光和场景再现之间的几何关系,通过光线追迹的方法分析了三者之间几何关系被破坏时,再现像会发生怎样的畸变,并提出无穷远相机法和视角切片法来修正这种畸变。Bjelkhagen 等<sup>[9]</sup>提出了直写数字全息打印技术,为了获取视差图像,从曝光光学系统中抽象出 6 个平面,分别是相机平面、胶片平面、胶片投影平面、SLM 平面、SLM 投影平面和全息图平面,根据光线追迹方法得到采样图像和视差图像之间的像素对应关系,最终从相机采样图像中获取正确的视差图像。随着计算机图形学的发展和计算机运算能力的提升,可以采用双视锥相机算法从三维场景数据中获取可直接进行全息体视图打印的合成视差图像,该算法的核心是根据曝光光学系统的要求,得到正像数据和三维模型数据结构之间的对应关系,构造一种快速生成目标图像的特殊渲染器<sup>[12-13]</sup>。

近年来本研究组提出了一种有效的视差图像分割与重组的单步全息体视图打印(EPISM)方法<sup>[14-17]</sup>,基于模拟“两步法”,通过光线追迹的方法,用较少的采样图片获取合成视差图像,实现单步打印并获取凸出于全息记录介质显示的再现像。这种基于模拟“两步法”的 EPISM 方法的核心是有效像素片段的拼接,通过较少的采样数据近似采样点周围未采样数据,从而得到合成视差图像。这种方法降低了采样数据量,减小运算成本,但也导致了合成

视差图像的不精确性。EPISM 方法获取合成视差图像时存在误差,不可避免地降低了再现像分辨率。为了避免 EPISM 存在的算法误差对再现效果的影响,本文将适用于非对称采集和显示的集成成像(POC)算法<sup>[18-21]</sup>应用于全息体视图的打印中,探索采样图像与合成视差图像之间的编码关系,深入分析影响再现像可视角的各种因素,进一步提升全息体视图的再现效果。

## 2 光场再现原理和全息体视图打印的 POC 算法

### 2.1 光场再现原理

如果不考虑全息单元尺寸引起的衍射效应,全息体视图每个全息单元记录的是所在位置的光线强度和方向。如图 1 所示,三维坐标系  $Oxyz$  中的一束光线  $AB$ ,与平面  $P$  相交于点  $A(x, y)$ ,与平面  $P'$  相交于点  $B(x', y')$ , $AB$  在  $xz$  平面上的投影与  $z$  轴夹角为  $\alpha$ , $AB$  与  $xz$  平面的夹角为  $\gamma$ 。在平面  $P$  上,可以用一个四元函数  $\xi(x, y, \alpha, \gamma)$  来描述这束光线,其中  $(x, y)$  表示光线与平面  $P$  相交的位置,  $(\alpha, \gamma)$  表示通过该相交点的光线方向,函数值表示这束光线的强度。通过平面  $P$  的所有光线的方向和强度信息可由函数  $\xi(x, y, \alpha, \gamma)$  表示,称  $\xi(x, y, \alpha, \gamma)$  为三维空间中平面  $P$  上的光场信息函数。

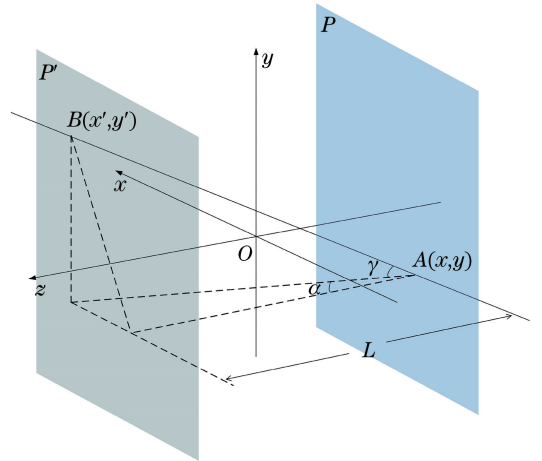


图 1 光场再现原理图

Fig. 1 Principle diagram of light field reconstruction

在平面  $P'$  上,同样可用一个四元函数  $\xi'(x', y', \alpha', \gamma')$  来描述光线  $AB$ ,其中  $(x', y')$  表示光线通过平面  $P'$  时与平面  $P'$  相交的位置,  $(\alpha', \gamma')$  表示通过该相交点的光线方向,函数值表示这束光线的强度。已知平面  $P$  上的光场信息函数  $\xi(x, y, \alpha, \gamma)$ ,可求得与平面  $P$  平行、与平面  $P$  距离为  $L$  的另一

个平面  $P'$  上的光场信息函数  $\xi'(x', y', \alpha', \gamma')$ 。其中  $x' = x + L \tan \alpha$ ,  $y' = y + L \sec \alpha \tan \gamma$ 。因为  $\alpha$  和  $\alpha'$  均表示光线  $AB$  在  $xz$  平面上的投影与  $z$  轴的夹角, 所以  $\alpha' = \alpha$ , 同理  $\gamma' = \gamma$ 。对于同一束光线  $AB$ , 光线强度相同, 即  $\xi'(x', y', \alpha', \gamma') = \xi(x, y, \alpha, \gamma)$ , 则有

$$\xi'(x + L \tan \alpha, y + L \sec \alpha \tan \gamma, \alpha, \gamma) = \xi(x, y, \alpha, \gamma) \quad (1)$$

(1)式可变形为

$$\xi'(x, y, \alpha, \gamma) =$$

$$\xi(x - L \tan \alpha, y - L \sec \alpha \tan \gamma, \alpha, \gamma) \quad (2)$$

(2)式表示若已知某一平面上的光场信息, 可求得与这一平面平行、距离为  $L$  的另一平面上的光场信息。这与惠更斯原理的子波理论类似, 即三维空间中任一平面的复振幅可由某一平面的复振幅计算得到, 三维空间中任一平面上的光场信息可由某一平面的光场信息确定。

全息体视图打印技术中的曝光图像生成算法的目的是, 将某一平面的采样图像经过编码变换为另一平面的合成视差图像。采样时相机的位置对应平面  $P$  上的点  $(x, y)$ , 采样图像中的一个像素对应原始光场中的一束光线, 像素在图像中的位置对应光线的方向  $(\alpha, \gamma)$ , 像素值对应光线强度。同理, 合成视差图像曝光的全息单元位置对应平面  $P'$  上的点  $(x', y')$ , 合成视差图像中的一个像素对应再现光场中的一束光线, 像素在图像中的位置对应光线的方向  $(\alpha', \gamma')$ , 像素值对应光线强度。当采样图像和合成视差图像之间的像素匹配关系正确时, 原始光场可实现再现。

## 2.2 用于全息体视图打印的 POC 算法

在集成成像中, 为解决贗像问题, 使用适用于非对称采集和显示的集成成像 POC 算法, 进行贗像-正像的转换。POC 算法的目的是将某一平面的采样图像数据编码为适合显示设备的合成图像, 其中合成图像是由等透镜数目的子图拼接而成。集成成像系统中的透镜阵列间隔对应全息体视图中全息单元的尺寸, 合成图像中每一个子图对应全息曝光时的每一个合成视差图像。

使用集成成像技术中适用于非对称采集和显示的 POC 算法, 获取全息体视图打印所需的合成视差图像。采样参数如下: 采样相机平面与全息图平面距离为  $L$ , 采样范围为  $C \times C$ , 采样相机视场角为  $\theta_1$ , 相机间距为  $\Delta C$ , 采样图像分辨率为  $m \times m$ 。而曝光光学系统参数如下: 全息图尺寸为  $S \times S$ , 全息

单元大小为  $\Delta H$ , 曝光每一个全息单元时, 合成视差图像的分辨率为  $n \times n$ , 液晶显示器(LCD)加载的图像对全息单元的张角为  $\theta_2$ 。采样参数和曝光光学系统参数需要满足一定的条件, 即满足

$$\begin{cases} L = \frac{\Delta H \times n}{2 \tan(\theta_2/2)} \\ C = \Delta H \times n + S \\ \theta_1 = \theta_2 \\ m = n \\ \Delta C = \Delta H \end{cases} \quad (3)$$

如图 2 所示, 同样可以将采样平面设置到距离全息图平面  $L/2$  处, 那么相应的采样平面边长  $C = \Delta H \times n/2 + S$ , 采样间隔  $\Delta C = \Delta H/2$ , 相机视场角满足  $\theta_1 = \theta_2$ , 采样图像分辨率满足  $m = n$ 。同理, 可以设置采样平面与全息图所在平面的距离为  $L/N$ , 其中  $N = 1, 2, 3, \dots$ , 那么采样参数和曝光光学系统的参数需要满足的条件为

$$\begin{cases} C = \Delta H \times n/N + S \\ \theta_1 = \theta_2 \\ m = n \\ \Delta C = \Delta H/N \end{cases} \quad (4)$$

(4)式表示通过调整采样间隔, 可以改变采样平面与全息图平面的距离。采样完成后, 需要对采样图像的像素与合成视差图像的像素进行匹配, 完成由采样图像到合成视差图像的编码转换。

假设采样平面与全息图平面的距离为  $L$ , 为简化系统, 在此采用一系列采样相机代替相机阵列, 如图 2 所示。规定每一个采样相机获取的采样图像的像素从左到右依次为  $p_1, p_2, p_3, p_4, p_5$ , 而曝光每一个全息单元所需的合成视差图像的像素从右到左依次为  $p_1, p_2, p_3, p_4, p_5$ 。可以看出 hogel 1 的  $p_1$  对应 camera 5 的  $p_5$ , hogel 1 的  $p_2$  对应 camera 4 的  $p_4$ , hogel 1 的  $p_3$  对应 camera 3 的  $p_3$ , 依此类推可以得到曝光 hogel 1 的合成视差图像。hogel 2 的  $p_1$  对应 camera 6 的  $p_5$ , hogel 2 的  $p_2$  对应 camera 5 的  $p_4$ , hogel 2 的  $p_3$  对应 camera 4 的  $p_3$ , 依此类推可以得到曝光 hogel 2 的合成视差图像。同理可以获取所有 hogel 的合成视差图像。

当采样平面与全息图平面距离为  $L/N$ 、采样图像像素为  $m \times m$  时, 可得

$$H_{k,g} = C_{m+(k-1)N-(g-1), m-(g-1)}, \quad (5)$$

式中:  $C_{i,j}$  表示第  $i$  个采样图像的第  $j$  个像素;  $H_{k,g}$  表示第  $k$  个 hogel 所需合成视差图像的第  $g$  个像素。根据(5)式表示的采样图像和合成视差图像之

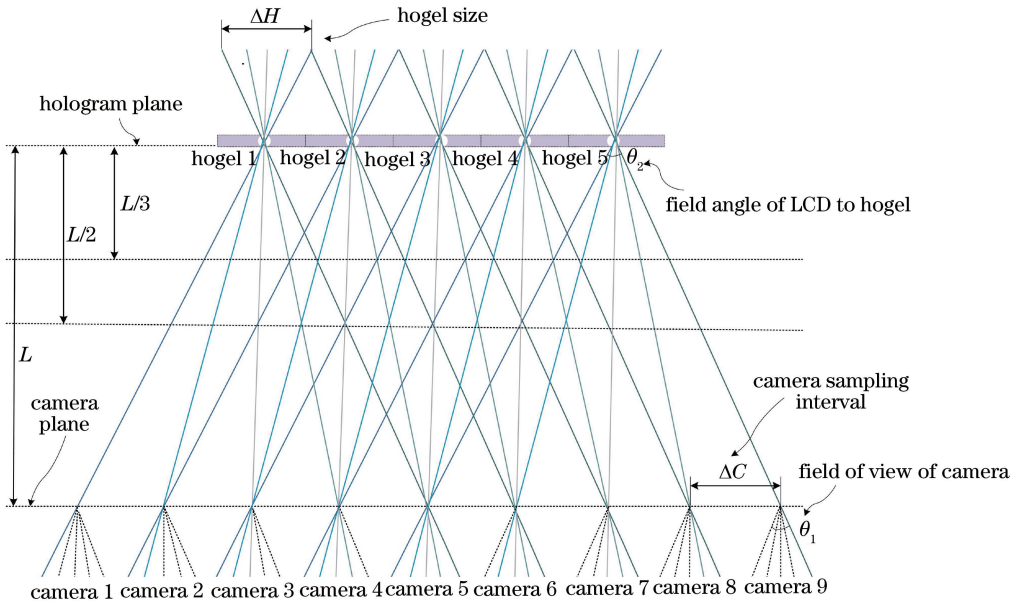


图 2 POC 算法原理图

Fig. 2 Principle diagram of POC algorithm

间的像素匹配关系,可由不同采样间隔、任意像素数目的采样图像得到全息曝光光学系统所需的合成视差图像。

### 2.3 待曝光的合成视差图像生成

在全息单元尺寸为 5 mm 的全息体视图中,需要获得像素数为  $1000 \times 1000$ 、视场角为  $32^\circ$  的合成视差图像,经计算可得  $L = (\Delta H \times n) / [2 \tan(\theta_2/2)] = 8750 \text{ mm}$ 。

当采样间隔等于全息单元尺寸时,采样平面与全息图平面之间的距离为 8750 mm,该距离过大会导致采样图像中三维物体的占比太低,有效像素太少,影响合成效果。因此需减小采样间隔,从而改变采样平面与全息图平面的距离。经实验验证,当采样间隔为全息单元尺寸的  $1/20$  时,全息图平面与采样平面的距离为 437.5 mm,采样图像中三维物体的占比足够大,有效像素数目足够多,不会影响合成效果。在曝光光学系统中,LCD 平面与全息图平面的距离为 175 mm,同时,物体中心应与 LCD 平面重合,综合可知采样平面与物体中心的距离应为 262.5 mm。采样区域大小  $C = \Delta H \times n/N + S = 330 \text{ mm}$ 。利用 3D MAX 软件对茶壶模型进行采样,采样示意图如图 3 所示,坐标轴 X、Y 和 Z 分别表示视图中的右方、上方和后方。设置茶壶半径为 20 mm,茶壶中心位于原点,壶口朝前。采样平面为  $Z = -262.5 \text{ mm}$ 、采样范围是以  $(0, 0, -262.5)$  为中心、边长为 330 mm 的正方形区域,采样间隔设置为 0.25 mm。相机模式为简单模式,水平和垂直视场

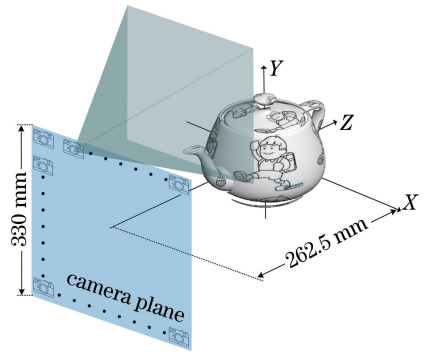


图 3 虚拟相机采样示意图

Fig. 3 Virtual camera sampling diagram

角均为  $32^\circ$ ,渲染分辨率为  $1000 \text{ pixel} \times 1000 \text{ pixel}$ 。

经过 POC 算法将采样图像编码变换为合成视差图像,观察采样图像和合成视差图像的区别。图 4(a)和(b)分别为左上视角的采样图像和合成视差图像,图 4(c)和(d)分别为中间视角的采样图像和合成视差图像,图 4(e)和(f)分别为右下视角的采样图像和合成视差图像。

相机位于左上角时,茶壶位于视角图像的右下角,可观察到茶壶的左面和上面。而对于左上视角全息单元对应的合成视差图像,茶壶同样位于合成视差图像的右下角,但可观察到茶壶的右面和下面。对于其他视角的采样图像和合成图像也有同样的关系。这是因为采样平面位于茶壶前方,全息图平面位于茶壶后方,采样得到的图像数据是虚像数据,而合成的图像数据是正像数据,实验需要打印凸出于全息记录介质的体视图,所需的是正像数据。另外,

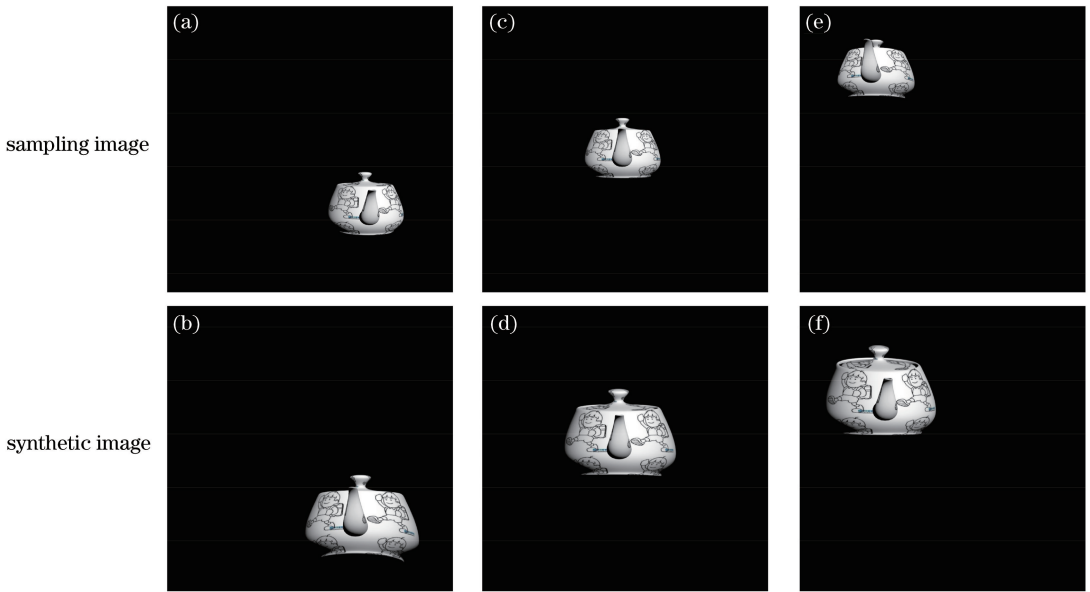


图 4 采样图像与合成视差图像对比图。(a)(b) 左上视角;(c)(d) 中间视角;(e)(f) 右下视角

Fig. 4 Comparison of sampled and synthetic parallax images. (a) Upper left; (b) centre; (c) lower right

由于采样平面与茶壶的距离比全息图平面与茶壶的距离更远,茶壶在整个图片中占据空间更小。

### 3 曝光光学系统参数和 POC 算法参数对再现像视场角的影响

视场角一方面受记录介质分辨率的限制,另一方面由记录系统的几何关系以及相机采样时的视场角共同决定。全息干板记录的干涉条纹密度与物光参考光的夹角有一定的关系,不同夹角的物光和参考光干涉后,将生成不同方向和疏密程度的干涉层,当生成的干涉层密度超过全息干板可记录的分辨率时,无法再现相应物光波。当物光参考光从记录介质的两侧入射时,构成反射全息图。如图 5 所示, $\theta_R$  表示参考光入射角, $\theta_O$  表示物光入射角,假如物光和参考光方向呈对称分布,即  $\theta_R = \theta_O$ ,形成的干涉层与介质表面平行,反射式体全息图的干涉层密度  $\rho = 2\cos \theta_R / \lambda$ ,其中  $\lambda$  表示光的波长。

当物光和参考光正对照射记录介质时,即  $\theta_R = \theta_O = 0^\circ$ ,生成的干涉层最密。实验所用的激光波长  $\lambda = 639 \text{ nm}$ ,生成干涉层最大密度  $\rho = 3.13 \times 10^6 \text{ lp/m}$ 。全息打印采用天津 I 型银盐干板,极限分辨率约为  $8000 \sim 10000 \text{ lp/mm}$ ,可记录的干涉层密度为  $8 \times 10^6 \text{ lp/m}$ 。这种全息干板可记录来自任意方向的物光和参考光形成的干涉层,记录介质分辨率对再现角度没有限制。

采样相机视场角为  $\theta_1$ ,LCD 加载的图像对全息单元的张角为  $\theta_2$ ,全息干板对物体的张角为  $\theta_3$ ,这

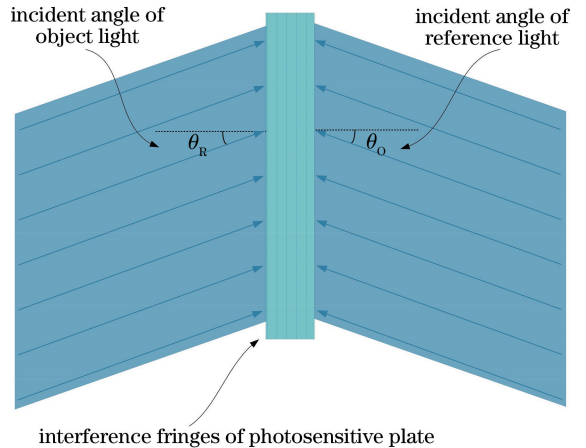


图 5 对称光路下的干涉层密度

Fig. 5 Interference layer density of symmetry optical path

三个参数共同决定了全息图的视场角,如图 6 所示,全息图的最大视场角为  $\min(\theta_1, \theta_2, \theta_3)$ 。因为 POC 算法要求  $\theta_1 = \theta_2$ ,且通过改变 3D MAX 采样参数可对  $\theta_1$  进行调节,所以  $\theta_2$  和  $\theta_3$  最终决定了全息图的最大视场角。

LCD 屏幕大小  $l_1 = 10 \text{ cm}$ ,全息干板边长  $l_2 = 8 \text{ cm}$ 。设置茶壶半径  $r = 2 \text{ cm}$ ,记物体中心与全息图平面的距离为场景深度  $W$ , $W$  也是 LCD 平面与全息图平面之间的距离。 $\theta_2, \theta_3$  与  $W$  的关系如下:

$$\theta_2 = \frac{360}{\pi} \arctan(l_1/2W) = \frac{360}{\pi} \arctan(5/W), \quad (6)$$

$$\theta_3 = \frac{360}{\pi} \arctan[(l_2/2 - r)/W] = \frac{360}{\pi} \arctan(2/W). \quad (7)$$

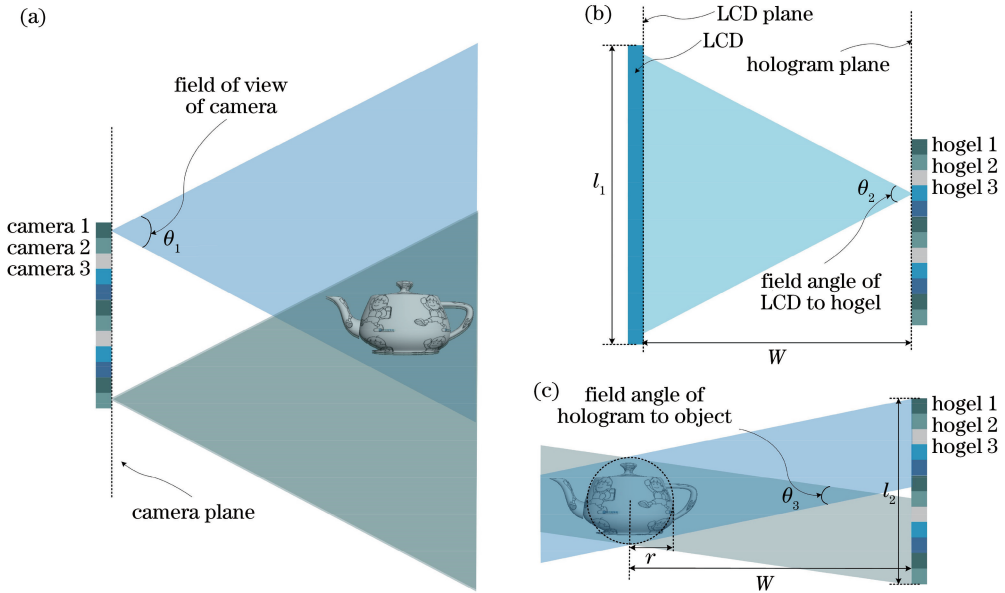


图 6 影响体视图视场角的参数。(a)采样相机视场角;(b)LCD对hogel的张角;(c)全息干板对物体的张角

Fig. 6 Parameters influencing field angle of stereogram. (a) Field of view of camera; (b) field angle of LCD to hogel; (c) field angle of hologram to object

$\theta_2$ 、 $\theta_3$  均随着场景深度  $W$  的减小而增大,且  $\theta_3$  恒小于  $\theta_2$ ,所以全息图的最大视场角等于  $\theta_3$ 。当观察视角大于  $\theta_3$  且小于  $\theta_2$  时,场景并不是完全不可见的,而在完全不可见和完全可见之间存在一个部分可见的角度区间,随着观察视角变大,该可见部分逐渐减小。当观察角度大于  $\theta_2$  时,场景完全不可见。由此得到了曝光光学系统参数和 POC 算法参数共同作用下,场景深度和再现像视场角之间的制约关系。图 7 是  $\theta_2$  和  $\theta_3$  随  $W$  变化的函数图像。

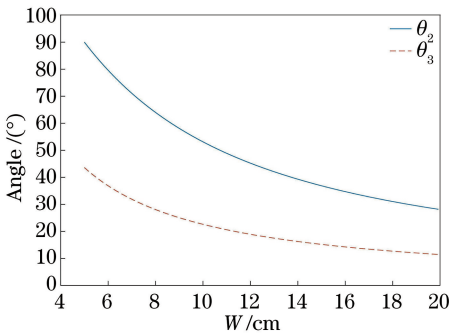


图 7  $\theta_2$  和  $\theta_3$  随  $W$  变化的函数图像

Fig. 7 Function images of  $\theta_2$  and  $\theta_3$  varying with  $W$

## 4 实验结果与分析

实验光路如图 8 所示,使用 400 mW 单纵模线偏振固体激光器(CNI MSL-FN-639)作为光源,型号为 Sigma Koki SSH-C2B 的电子快门用来控制曝光时间。激光经过偏振分光棱镜后分为物光和参考

光。旋转第一个 1/2 波片使得两个线偏振光产生半个波长的光程差,进而旋转激光的偏振方向。分光棱镜对不同偏振方向的偏振光有不同的反射透射比,通过第一个 1/2 波片和分光棱镜可以调节物光与参考光的光强比,实验中将传播到全息记录介质处的物光与参考光的光强比调整为 1:20。通过 40 倍的物镜对物光光束进行扩束,光束应扩大到足够覆盖 LCD 屏。所选择 LCD 屏(VVX09F035M20, Panasonic 公司,日本)的尺寸为 8.9 inch(1 inch = 2.54 cm),共 1920 pixel × 1200 pixel,拆除 LCD 屏的背景光模块和偏振片,将合成视差图像加载至屏中 1000 pixel × 1000 pixel 区域作为有效像素部分,对应的有效部分尺寸近似为 10 cm × 10 cm,单像素尺寸为 0.1 mm。在 LCD 后加入普通毛玻璃作为散射膜,使物光光束均匀透过全息单元孔径。旋转第二个 1/2 波片以调整参考光的偏振方向,使参考光和物光的偏振态一致,从而满足形成干涉条纹的必要条件。参考光经过反射镜后进入扩束镜,再经过焦距为 150 mm 的准直透镜和开孔尺寸为 5 mm × 5 mm 的方形光阑,得到均匀的平面波,参考光和全息干板法线约成 40°。实验使用天津 I 型银盐干板,对于 639 nm 的红光,其感光灵敏度为 1250 μJ/cm<sup>2</sup>。全息干板被固定于型号为 KSA300 的 X-Y 线性位移平台,通过可编程控制器 MC600 对其进行驱动控制。快门、LCD 加载图片和 X-Y 线性位移平台通过同步系统控制,从而实现同步曝

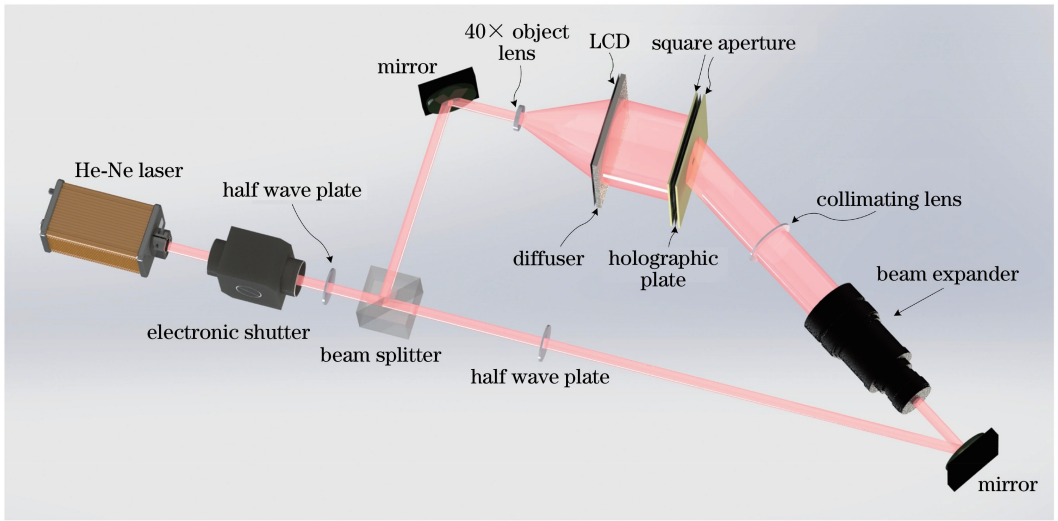


图 8 全息打印系统结构示意图

Fig. 8 Structural diagram of holographic printing system

光。通过位移平台移动全息记录介质,并变换合成视差图像,逐步记录各个位置的光场信息,直到完成所有全息单元的打印。

当  $W$  为 17.5 cm 时,  $\theta_3 = 13^\circ$ ,  $\theta_2 = 32^\circ$ , 在 3D MAX 中设置相机视场角  $\theta_1 = 32^\circ$ , 实验结果如图 9 所示。

当  $W$  为 12.5 cm 时,  $\theta_3 = 18^\circ$ ,  $\theta_2 = 43^\circ$ , 在 3D MAX 中设置相机视场角  $\theta_1 = 43^\circ$ , 实验结果如图 10 所示。

当  $W$  为 7.5 cm 时,  $\theta_3 = 30^\circ$ ,  $\theta_2 = 67^\circ$ , 在 3D MAX 中设置相机视场角  $\theta_1 = 67^\circ$ , 实验结果如图 11 所示。

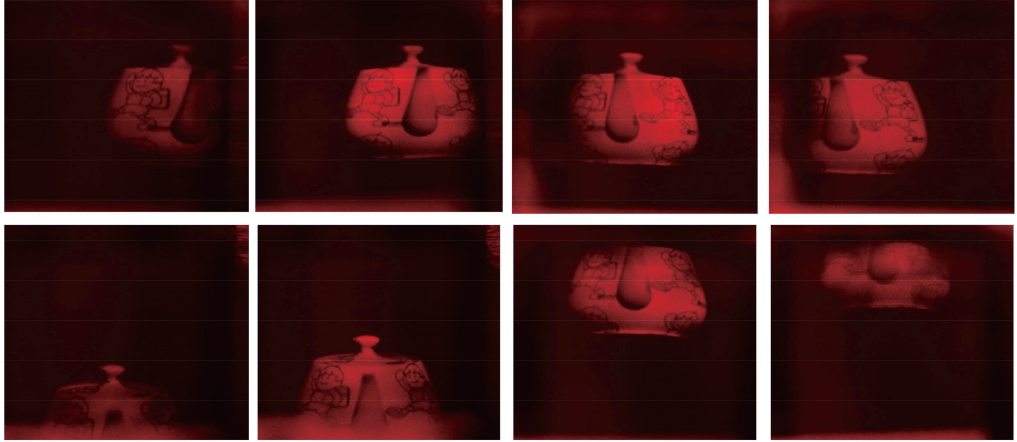


图 9  $W$  为 17.5 cm 时,茶壶的多视点再现效果

Fig. 9 Teapots recovered from different perspectives when  $W=17.5$  cm

当 LCD 与全息干板的距离为 17.5 cm 和 12.5 cm 时,观察体视图再现像,茶壶上的儿童图案清晰,三维效果显著,可视角度与理论分析相符,证明了 POC 算法在全息打印中的有效性。由(6)式和(7)式可得,在当前打印系统中增大体视图视场角,可通过以下方式实现:1)选取更大尺寸的 LCD 以增大  $l_1$ ; 2)减小 LCD 平面与全息图平面之间的距离  $W$ ; 3)使用更大尺寸的全息干板以增大  $l_2$ ;

对于同一场景深度的全息图,视场角越大,再现

像越暗,这是由 LCD 屏幕性质决定的, LCD 上的每一个发光像素均不是严格的点光源,其中沿 LCD 法线的光线最强,且与 LCD 法线夹角越大,光线越弱。因此再现像亮度随观察角度的增大而降低。当 LCD 与全息干板的距离为 12.5 cm 时,再现像中出现较强的背景光,这同样是由上述原因引起。当 LCD 与全息干板距离较小时,曝光一个全息单元的物光光线角度更大,这就导致物光与参考光的光强比低于 1:20, 较低的物参比导致较低的衍射效率,

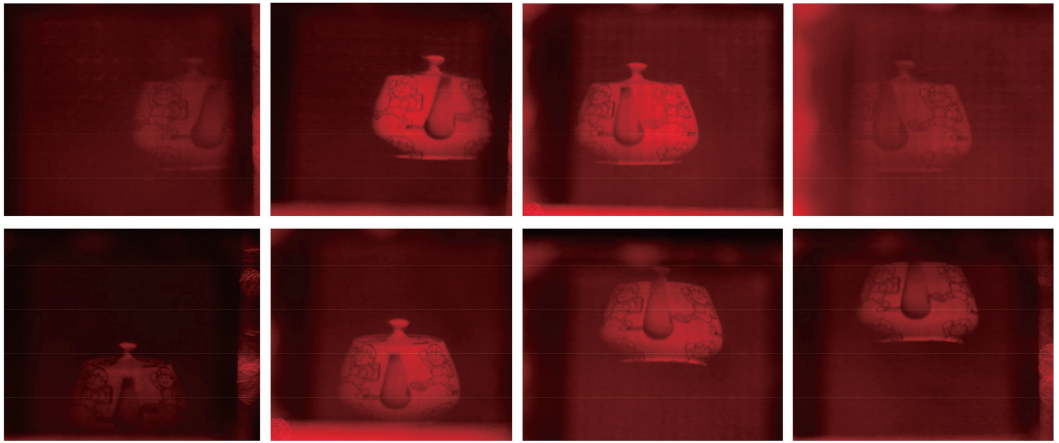


图 10  $W$  为 12.5 cm 时,茶壶的多视点再现效果

Fig. 10 Teapots recovered from different perspectives when  $W=12.5$  cm

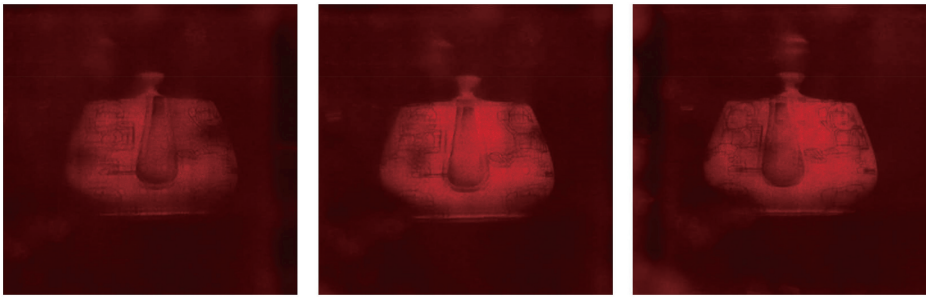


图 11  $W$  为 7.5 cm 时,茶壶的多视点再现效果

Fig. 11 Teapots recovered from different perspectives when  $W=7.5$  cm

最终在再现像中出现较强的零级光(即背景光)。

当 LCD 与全息干板的距离减小到 7.5 cm 时,再现茶壶有重影现象,严重影响了再现像的质量,这是全息体视图打印系统固有的缺陷。因为全息单元尺寸不可能无限小,全息体视图再现的三维场景仅在 LCD 平面是完全准确的,在其他平面会产生再现误差。如图 12 所示,与 LCD 平面相距  $H$  的点  $P$  关于 hogel 1 的视差点为  $P_1$ ,关于 hogel  $n$  的视差点为  $P_n$ 。因为全息单元具有一定的大小,所以由  $P_1$  和  $P_n$  再现点  $P$  时将出现一定程度的模糊,这也是壶口出现重影现象的原因。再现像可分辨的最小间隔  $\Delta X$  由全息单元尺寸  $\Delta H$ 、LCD 与全息干板的距离  $W$  以及茶壶上某点与 LCD 平面的距离  $H$  这三个参数决定。再现像可分辨的最小间隔为

$$\Delta X = \Delta H \times \frac{H}{W} \quad (8)$$

茶壶壶嘴与 LCD 平面的距离  $H$  约为 3 cm,全息单元的尺寸  $\Delta H$  为 5 mm。当 LCD 与全息干板的距离  $W$  为 17.5 cm 时,壶嘴处可分辨的最小间隔  $\Delta X$  为 0.86 mm;当 LCD 与全息干板的距离  $W$  为 12.5 cm 时,壶嘴处可分辨的最小间隔  $\Delta X$  为

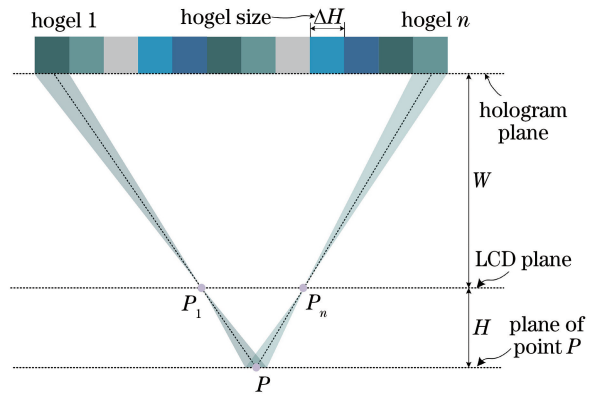


图 12 重影现象产生原理图

Fig. 12 Principle diagram of ghosting generation

1.2 mm;当 LCD 与全息干板的距离  $W$  为 7.5 cm 时,壶嘴处可分辨的最小间隔  $\Delta X$  为 2 mm。此时壶嘴处的重影现象严重影响了再现像的分辨率。

从系统景深角度考虑,当  $W$  减小时,该全息体视图系统成像的景深减小。由(8)式可知, $H = (\Delta X W) / \Delta H$ ,  $H$  表示在系统参数  $W$  和  $\Delta H$  一定、可接受的再现像分辨率  $\Delta X$  确定时,系统可以再现的物体半径(即景深的一半)。假设可接受的成像分辨率  $\Delta X = 1$  mm,在当前采用全息单元尺寸  $\Delta H =$



5 mm 的系统参数下,该系统的成像景深  $D=2H=2W/5$ 。当  $W=17.5$  cm 时,系统景深为 7 cm;当  $W=12.5$  cm 时,系统景深为 5 cm;当  $W=7.5$  cm 时,系统景深为 3 cm。

根据(8)式,可通过以下方式提高再现像分辨率:1)减小 hogel 的尺寸  $\Delta H$ ;2)增大 LCD 与全息干板的距离  $W$ 。减小全息单元的尺寸可通过在物光光路和参考光光路中使用更小的方形光阑来实现。但在实际中,当光阑尺寸小于 2 mm 时,物方光路和参考方光路的准直难度较高,以及较小尺寸的光阑将造成极大的能量浪费,体视图的打印时间成本也被大幅提高。而增大 LCD 与全息干板距离  $W$  的同时,体视图视场角会减小,两者形成矛盾。因此可从改进打印系统方面减小 hogel 尺寸,以提高再现像分辨率。比如使用衍射光学元件和高数值孔径的成像镜头的组合,可形成任意形状和大小全息单元,这时再现像视场角只取决于成像镜头的数值孔径。

适用于非对称采集和显示的集成成像 POC 算法可将采样图像转换为适合曝光光学系统的合成视差图像。所提的方法消除了 EPISM 方法通过较少的采样数据近似采样点周围未采样数据时,有效像素片段拼接出现的像素误差;同时也避免了在无穷远相机法中,合成视差图像的像素受全息单元数目限制、分辨率较低的问题,该方法可应用于小尺寸的全息体视图。

对于特定的打印系统,通过调整 POC 算法参数,可得到适合当前打印系统的像素级精确的合成视差图像。但是由于采样图像和合成视差图像之间是像素对应关系,合成视差图像的分辨率大致决定了所需的采样图像数量,生成  $1000 \text{ pixel} \times 1000 \text{ pixel}$  分辨率的合成视差图像所需的采样图像数量是百万级的。在实验中,使用 3D MAX 软件的虚拟相机对简单的三维场景进行  $10^6$  个视角的采样,计算机 CPU 为英特尔酷睿 i7-8750H,内存为 16 GB,操作系统为 Windows10,每个采样图像的分辨率为  $1000 \text{ pixel} \times 1000 \text{ pixel}$ ,所需的时间约为 10 h。然后用 POC 算法对这  $10^6$  张视角图像进行处理,生成  $16 \times 16$  幅合成视差图像,所需的时间约为 3 h。巨大的数据量和运算量致使生成视差图像耗费较长的时间,从而导致实验的时间成本较高。

## 5 结 论

将适用于非对称采集和显示的集成成像 POC

算法用于全息体视图的打印,以获取与当前全息打印系统匹配的像素级精确的合成视差图像。通过实验打印出不同场景深度下再现质量较好的体视图,体视图再现像视场角符合理论分析,验证了特定条件下场景深度和视场角之间的制约关系的正确性,并提出了改进体视图视场角的方法。当场景深度较小时,再现像分辨率显著降低,分析了全息体视图重影现象产生的原因,并指出提高再现像分辨率的研究方向。

## 参 考 文 献

- [1] Kim S C, Dong X B, Kim E S. Accelerated one-step generation of full-color holographic videos using a color-tunable novel-look-up-table method for holographic three-dimensional television broadcasting [J]. Scientific Reports, 2015, 5: 14056.
- [2] Schnell M, Carney P S, Hillenbrand R. Synthetic optical holography for rapid nanoimaging[J]. Nature Communications, 2014, 5: 3499.
- [3] Takaki Y, Taira K. Speckle regularization and miniaturization of computer-generated holographic stereograms [J]. Optics Express, 2016, 24 (6): 6328-6340.
- [4] Yoshikawa H, Yamaguchi T. Review of holographic printers for computer-generated holograms[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2016, 12(4): 1584-1589.
- [5] 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.
- [6] Ishii N, Kato T, Abe J. A real-time dynamic holographic material using a fast photochromic molecule[J]. Scientific Reports, 2012, 2: 819.
- [7] Wakunami K, Hsieh P Y, Oi R, *et al.* Projection-type see-through holographic three-dimensional display [J]. Nature Communications, 2016, 7: 12954.
- [8] Yue Z J, Xue G L, Liu J, *et al.* Nanometric holograms based on a topological insulator material [J]. Nature Communications, 2017, 8: 15354.
- [9] Bjelkhagen H, Brotherton-Ratcliffe D. Ultra-realistic imaging[M]. Boca Raton: CRC Press, 2016.
- [10] Yamaguchi M, Ohyama N, Honda T. Holographic three-dimensional printer: new method[J]. Applied Optics, 1992, 31(2): 217-222.
- [11] Halle M W. The generalized holographic stereogram [D]. Boston: Massachusetts Institute of Technology, 1991.

- [12] Jones A, McDowall I, Yamada H, *et al.* Rendering for an interactive 360° light field display[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2007, 26(3): 40.
- [13] Sánchez A M, Prieto D V. Design, development, and implementation of a low-cost full-parallax holoprinter[J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10558: 105580H.
- [14] 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.
- [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(19): 23523-23544.
- [16] 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.
- [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] Jung J H, Kim J, Lee B. Solution of pseudoscopic problem in integral imaging for real-time processing [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(1): 76-78.
- [19] Okano F, Hoshino H, Arai J, *et al.* Real-time pickup method for a three-dimensional image based on integral photography [J]. *Applied Optics*, 1997, 36(7): 1598-1603.
- [20] Martínez-Corral M, Javidi B, Martínez-Cuenca R, *et al.* Formation of real, orthoscopic integral images by smart pixel mapping [J]. *Optics Express*, 2005, 13(23): 9175-9180.
- [21] Navarro H, Martínez-Cuenca R, Saavedra G, *et al.* 3D integral imaging display by smart pseudoscopic-to-orthoscopic conversion (SPOC) [J]. *Optics Express*, 2010, 18(25): 25573-25583.