

用波前平面提高全息体视图成像分辨率

黄应清¹ 赵 镨² 蒋晓瑜^{2*} 闫兴鹏²

¹中国人民解放军装甲兵工程学院训练部, 北京 100072

²中国人民解放军装甲兵工程学院信息工程系, 北京 100072

摘要 针对全息体视图成像分辨率较低的问题,提出了用波前平面提高成像分辨率的方法。定量分析了空间采样、角采样和衍射效应对全息体视图成像极限分辨率的影响;以人眼在距离全息图 600 mm 处观察的极限分辨能力为标准,给出了全息体视图的成像极限分辨率与三维场景深度及全息单元(Hogel)尺寸之间的关系;得出了在波长取 632.8 nm 时,全息体视图能够高分辨率再现的三维场景的极限深度为 12.80 mm,最佳 Hogel 尺寸为 90 μm ,并且依据极限深度设置了波前平面。选择 2 个三维场景进行了验证实验:数字模拟再现了结构较为复杂的坦克模型,可以准确表现出模型的各个深度上的精细结构;用基于空间光调制器的全息三维显示系统对茶壶模型进行了光学再现,再现图像很好地提供了深度和光泽等三维感知因素。

关键词 全息; 计算全息; 全息显示; 成像分辨率

中图分类号 O438.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0209002

Using Wavefront Plane to Improve Imaging Resolution of Holographic Stereogram

Huang Yingqing¹ Zhao Kai² Jiang Xiaoyu² Yan Xingpeng²

¹Department of Training, Academy of Armored Forces Engineering, Chinese People's Liberation Army, Beijing 100072, China

²Department of Information Engineering, Academy of Armored Forces Engineering, Chinese People's Liberation Army, Beijing 100072, China

Abstract Because of the low imaging resolution of holographic stereogram, a method using wavefront plane is proposed to improve imaging quality. The resolution limit of holographic stereogram is mainly affected by spatial sampling, angular sampling and diffraction. The influences due to these factors are analyzed with mathematical equations. Supposing that the distance between hologram and human eyes is about 600 mm, the relationship between imaging resolution limit and depth of three-dimensional scene or Hogel size is provided according to acuity of human eyes. The depth limit of three-dimensional scene and optimal Hogel size are 12.80 mm and 90 μm , respectively, if the wavelength is 632.8 nm. A wavefront plane which is decided by depth limit is set. The experiments are performed with two three-dimensional scenes to evaluate the proposed method. With numerical simulation method, the tank model which has complicate structures is reproduced. The elaborate features of tank model at every depth are accurately obtained. A teapot model is optically reconstructed with holographic three-dimensional display system based on spatial light modulator. The three-dimensional cues such as depth and gloss are well provided in the reconstructed images.

Key words holography; computer holography; holographic displays; imaging resolution

OCIS codes 090.1760; 090.2870

收稿日期: 2015-10-09; 收到修改稿日期: 2015-10-28

基金项目: 全国优秀博士学位论文作者专项资金(201432)、北京市自然科学基金(4152049)、北京市科技新星计划(Z151100000315019)

作者简介: 黄应清(1966—),男,硕士,教授,主要从事信息光学及目标探测与识别方面的研究。

E-mail: huangyingqing1105@163.com

*通信联系人。E-mail: jiangxiaoyu2007@gmail.com

1 引 言

全息图记录了三维场景的振幅和相位信息,能够提供所有满足人眼三维感知的视觉因素,可以真实地再现三维场景^[1-2]。计算全息是全息术与计算机技术相结合的产物,即用计算机来模拟光学全息的物理过程,相对于光学全息,计算全息更加灵活,不管是真实存在的或者虚拟的三维场景,只要知道其数学描述,就能够用计算机生成全息图^[3-5]。另外,计算全息是实现真三维动态显示的重要途径^[6]。

点源法是一种典型的计算全息算法:三维场景被离散为大量的自发光物点,各个物点在全息面上的波前相干叠加得到三维场景的复振幅分布,其原理简单,完全模拟光学全息的衍射过程,能够精确再现三维场景的波前信息,但每一个物点都要执行一次衍射计算,因此计算速度慢,而且难以表现遮挡、阴影等视觉因素^[7-8];层析法首先把三维场景分割为一系列具有不同深度的二维图像,然后由菲涅耳衍射获得三维场景的波前,可以较快地生成全息图,但是难以高质量地表现三维场景的不同视角^[9-12];全息体视图方法利用计算机图形渲染技术获取三维场景的二维视差图像,然后将这些视差图像编码进全息图,可以精确重现三维场景的遮挡关系、阴影效果,但三维场景的采样和全息单元(Hogel)的衍射效应使成像的分辨率较低,特别是距离全息面较远的三维场景会变得模糊^[13-15];增加相位的全息体视图在生成全息图时考虑了三维场景的相位信息,提高了成像分辨率,但是需要采集三维场景的深度数据,同时也增加了计算复杂度^[16-17];一些学者将点源法和全息体视图结合起来提出了完全计算的全息体视图算法,显著提高了全息体视图对三维场景深度的表现能力,但增加了计算量,失去了三维场景的阴影和光泽效果^[18];Wakunami等^[19-21]指出造成全息体视图分辨率较低的主要原因是采样距离较远,提出了线采样平面法,在靠近三维场景的位置设置一个虚拟的二维平面作为采样平面,在采样平面位置拍摄三维场景的视差图像,根据角谱理论将视差图像通过傅里叶变换转换成波前,生成的全息图可以高分辨率成像,但是没有定量分析采样平面与三维场景之间的准确位置关系。

本文详细地分析了制约全息体视图成像极限分辨率的主要因素,提出了依据人眼分辨能力确定波前平面的位置和Hogel尺寸的方法,计算了多个三维场景的全息图,分别进行了数字和光学再现实验。结果表明,本方法成像分辨率高,能够准确表达三维场景的深度及光泽等信息。

2 全息体视图成像分辨率分析

生成全息体视图的一般过程如图1所示。首先,在水平和垂直方向上把全息面分割成一系列Hogel,利用计算机图形技术在全息面上每一个Hogel位置渲染三维场景的一幅二维视角图像;然后分别对渲染的图像进行傅里叶变换,最后与参考光干涉生成条纹图^[12,19]。三维场景各个视角的光线信息被全息图记录和再现。该算法能够准确重构三维场景的遮挡、阴影等效果,但是一个严重的缺陷是三维场景的空间采样、角采样和衍射效应制约再现像的分辨率,距离全息面较远的三维场景不能清晰成像^[13-15]。

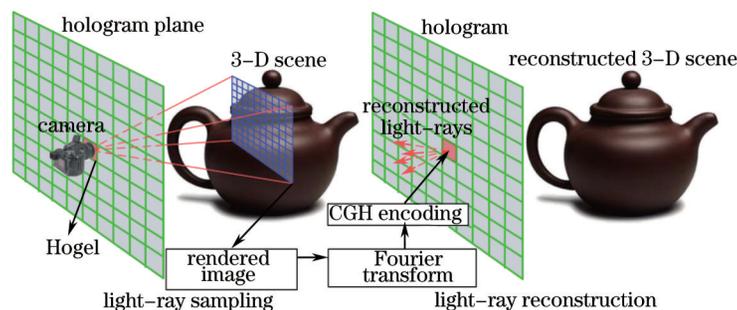


图1 全息体视图方法的基本模型

Fig.1 Model of holographic stereogram

如图2所示,Hogel的尺寸为 $w_h \times w_h$,人眼在距离全息图 z_v 处观察再现像,如果 δ_s 表示由全息面的空间采样造成的极限分辨率,那么 δ_s 可以表示为

$$\delta_s(w_h, z_D) \approx \frac{w_h(z_v + z_D)}{z_v}, \tag{1}$$

式中 z_D 表示三维场景的物点与全息图之间的距离,即物点的深度。

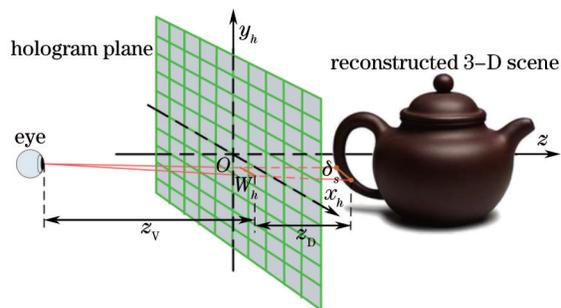


图2 全息图的空间采样极限分辨率

Fig.2 Resolution limit due to the spatial sampling

根据(1)式易知, δ_s 最小为 Hogel 的尺寸 w_h 。 δ_s 与 z_v 成反比, 而与 z_D 成正比。当三维场景的深度 z_D 较大时, δ_s 也会增大, 因此深度比较大时再现像的分辨率会较低, 为了获得更好的再现效果, 就要通过减小 Hogel 的尺寸来减小 δ_s 。

再现像的分辨率也会受到全息图角采样的影响, 如图3所示。Hogel 上的条纹以 θ_a 为角采样间隔向相应的方向衍射光线, 这些光线再现了全息图记录的三维场景。若用 δ_a 表示角采样极限分辨率, 那么 δ_a 可表示为

$$\delta_a \approx z_D \times \theta_a, \quad (2)$$

式中 θ_a 与以下两个参数相关, 分别是全息图的采样间隔 p 和三维场景投影图像的像素数 $M \times N$ 。根据光栅方程可知全息图的最大衍射角 $\theta_{\max} = \arcsin\left(\frac{\lambda}{2p}\right)$, 其中 λ 表示波长。而渲染图像的像素数与 Hogel 的像素数相同, 因此 $M = N = \frac{w_h}{p}$ 。 θ_a 可以由下式求得:

$$\theta_a = \frac{\theta_{\max}}{M} = \arcsin\left(\frac{\lambda}{2p}\right) p \frac{1}{w_h}, \quad (3)$$

把(3)式代入(2)式可知

$$\delta_a(w_h, z_D) \approx \frac{\lambda z_D}{2w_h}, \quad (4)$$

式中波长 λ 可看作定值, 于是 δ_a 与 z_D 成正比, 而与 w_h 成反比。深度较大的三维场景的 δ_a 也较大, 再现效果会较差。而此时增大 Hogel 的尺寸 w_h 可以减小 δ_a , 提高再现像的分辨率。

另外一个影响再现像分辨率的因素是全息面上 Hogel 的衍射效应, 如图4所示。再现光线在 Hogel 的衍射作用下产生发散角 θ_d , 再现光线被展宽了, 再现像因此会变得模糊。易知 $\theta_d = \arcsin\left(\frac{\lambda}{2w_h}\right)$, 那么衍射产生的极限分辨率 δ_d 可用下式获得:

$$\delta_d(w_h, z_D) \approx w_h + \frac{\lambda z_D}{w_h}, \quad (5)$$

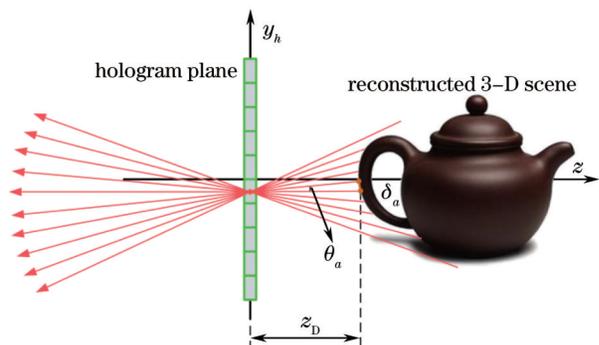


图3 全息图的角采样极限分辨率

Fig.3 Resolution limit due to the angle sampling

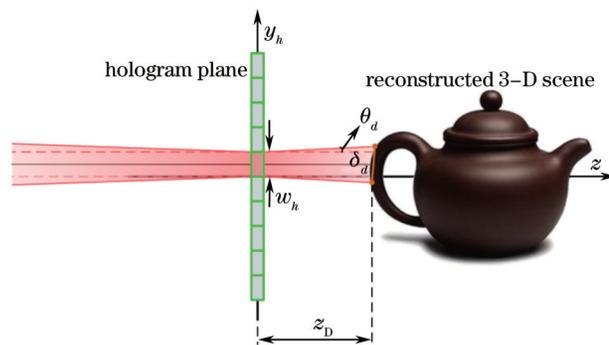


图4 Hogel 衍射产生的极限分辨率

Fig.4 Resolution limit due to diffraction of Hogel

式中波长 λ 是常值, δ_d 与 z_0 成正比, z_0 越大, δ_d 越大, 再现像成像效果越差; 而 δ_d 与 w_h 不具有单一单调性, 也就是说 w_h 过大或者过小都会使再现像的分辨率降低。

综上所述, 全息体视图的再现像分辨率主要受全息图的空间采样、角采样和 Hogel 的衍射效应的影响。三种因素作用的极限分辨率 δ_s 、 δ_a 和 δ_d 都会随着三维场景深度 z_0 的增大而变大, 因此传统的全息体视图算法再现深度较大的三维场景时会变得模糊。接下来讨论大景深的三维场景, 即 z_0 较大时, 根据(1)、(2)和(5)式来选择合适的 Hogel 尺寸 w_h , 提高再现像分辨率。

3 提高全息体视图的成像分辨率

3.1 全息体视图参数优化

δ_s 、 δ_a 和 δ_d 的最大值决定再现像的极限分辨率, 即再现像的极限分辨率 $\delta_l = \max(\delta_s, \delta_a, \delta_d)$ 。考虑三维场景某一深度处的极限分辨率, 把 z_0 当作常数, 一般情况下满足 $z_v > z_0$, 分析 δ_s 、 δ_a 和 δ_d 与 w_h 之间的关系, 根据(1)、(4)和(5)式可作出图 5 所示的曲线, 其中横轴表示 Hogel 尺寸 w_h , 纵轴表示成像极限分辨率 δ 。

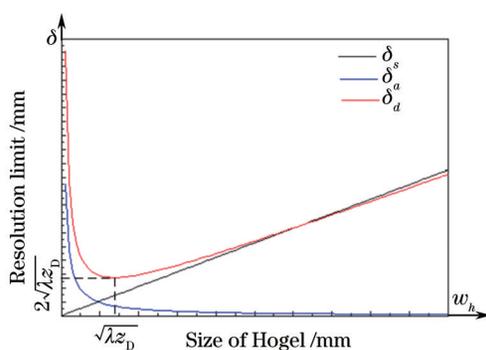


图 5 Hogel 尺寸与极限分辨率之间的关系

Fig.5 Relationship between size of Hogel and resolution limit

由 (5) 式易知, 当 $w_h = \sqrt{\lambda z_0}$ 时, δ_d 有最小值, 即 $\delta_d(\sqrt{\lambda z_0}) = 2\sqrt{\lambda z_0}$, 而此时 $\delta_s(\sqrt{\lambda z_0}) = \sqrt{\lambda z_0} \frac{z_v + z_0}{z_v} < 2\sqrt{\lambda z_0}$, $\delta_a(\sqrt{\lambda z_0}) = \frac{\sqrt{\lambda z_0}}{2} < 2\sqrt{\lambda z_0}$, 因此 $\delta_s(\sqrt{\lambda z_0}) < \delta_d(\sqrt{\lambda z_0})$, $\delta_a(\sqrt{\lambda z_0}) < \delta_d(\sqrt{\lambda z_0})$, 如图 5 所示。所以再现像的极限分辨率 $\delta_l = \delta_d(\sqrt{\lambda z_0}) = 2\sqrt{\lambda z_0}$ 。

已知人眼的角分辨率约为 0.3 mrad, 假设人眼在距离全息面 600.00 mm 的位置观察, 即 $z_v = 600.00$ mm, 那么人眼可分辨的最近两点的距离 $\Delta d = 600.00$ mm \times 0.0003 = 0.18 mm。可依据人眼的分辨能力来确定再现像的极限分辨率, 只要满足

$$\delta_l \leq \Delta d, \quad (6)$$

即 $2\sqrt{\lambda z_0} \leq 0.18$, 取 $\lambda = 632.8$ nm, 则 $z_0 \leq \frac{0.18^2}{4\lambda} \approx 12.80$ mm, 也就是距离全息面 12.80 mm 以内的三维场景均可以被高质量的再现, 深度超过 12.80 mm 的部分的分辨率会下降。令可高分辨率再现的最大深度 $z_f = \max(z_0) = 12.80$ mm, 那么 Hogel 的尺寸 $w_h = \sqrt{\lambda \times z_f} \approx 90$ μ m。

3.2 设置波前平面

根据以上分析可知, 全息面与三维场景之间的距离 z_0 越小, 即三维场景的深度越小, 全息体视图再现像的极限分辨率 δ_l 的值也越小, 成像效果越好。如果全息面与三维场景之间的距离 $z_0 > 12.80$ mm, 再现像的极限分辨率值将大于人眼的分辨极限, 即 $\delta_l > \Delta d$, 成像质量下降。

为了保证全息体视图的极限分辨率值不大于人眼的分辨极限, 即 $\delta_l \leq \Delta d$, 必须使全息面与三维场景最远物点之间的距离小于或等于极限深度 $z_f = 12.80$ mm。为了满足这一条件, 设置一个与全息面平行的虚拟平面, 使三维场景的最远物点与此虚拟平面之间的距离等于极限深度 $z_f = 12.80$ mm, 如图 6 所示; 然后按照图 1 所示全息体视图方法在虚拟平面处渲染三维场景, 并对渲染的图像作傅里叶变换, 得到三维场景在虚拟平面处的

波前;再用菲涅耳衍射计算三维场景在全息面处的波前,最后与引入的参考光在全息面上干涉生成全息图。设置虚拟平面的目的是为了在虚拟平面处获得三维场景的波前信息,因此称虚拟平面为波前平面。

波前平面与三维场景之间的距离不大于 z_f , 因此三维场景在波前平面处的极限分辨率满足 $\delta_1 \leq \Delta d$, 而波前平面到全息面之间的距离为 z_w , 两者之间精确的菲涅耳衍射过程不会引入误差,也不会改变三维场景的极限分辨率,全息面处的极限分辨率也满足 $\delta_1 \leq \Delta d$, 所以三维场景可以被清晰再现。

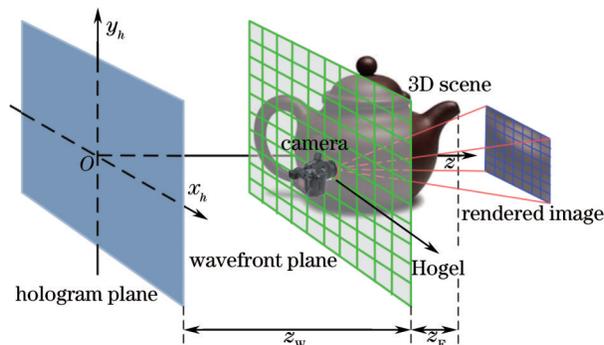


图6 渲染平面的设置方法

Fig.6 Method for setting rendering plane

4 实验分析

为了证明分析的正确性,选择不同的三维模型作为三维场景分别进行了数字和光学再现实验。

4.1 复杂三维场景的数字再现实验

用结构复杂的坦克模型作为数字模拟实验的三维场景,如图7所示,坦克模型的前部靠里,后部靠外,即坦克前部距离全息面远,后部距离全息面近,其占用的空间尺寸为 $34.31 \text{ mm} \times 12.91 \text{ mm} \times 12.00 \text{ mm}$,即坦克模型的深度为 12.00 mm 。采用图6所示的方法设置波前平面,波前平面与坦克模型最近点的距离分别为 0.80 mm ($12.80 \sim 12.00 \text{ mm}$)。全息面与波前平面之间的距离 $z_w = 200.00 \text{ mm}$ 。



图7 目标场景的图像

Fig.7 Image of object scene

用图1所示的传统全息体视图方法和本文提出的方法分别计算坦克模型的全息图,参数设置如表1和表2所示。表1定义了全息图和波前平面的尺寸及像素水平,表2为波前平面的相关参数。表2中渲染相机的视场角(FOV)是由全息图的像素尺寸决定的,可由光栅方程计算得到。

表1 全息图/波前平面的尺寸及像素水平

Table 1 Size and pixel level of hologram/wavefront plane

Size	Size of pixel	Pixel number
$36.00 \text{ mm} \times 36.00 \text{ mm}$	$3 \mu\text{m} \times 3 \mu\text{m}$	$12000 \text{ pixel} \times 12000 \text{ pixel}$

表2 波前平面的相关参数

Table 2 Parameters of wavefront plane

Hogel		FOV		Rendered image	
Size	Pixel number	Number		Pixel number	Number
$90 \mu\text{m} \times 90 \mu\text{m}$	$30 \text{ pixel} \times 30 \text{ pixel}$	400×400	12.11°	$30 \text{ pixel} \times 30 \text{ pixel}$	400×400

用传统方法和本文提出的方法计算得到全息图后分别进行了数字再现,结果如图8和图9所示。

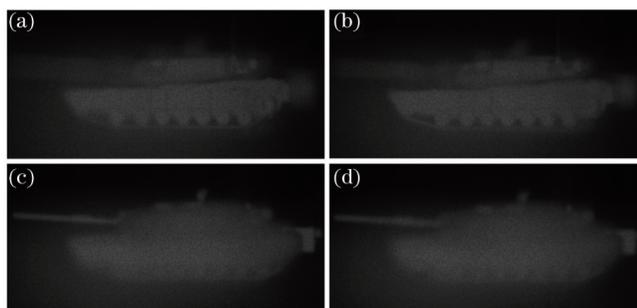


图8 传统方法计算的全息体视图的数字再现结果。(a)在208.00 mm处聚焦的再现图像;(b)在211.00 mm处聚焦的再现图像;(c)在217.00 mm处聚焦的再现图像;(d)在220.00 mm处聚焦的再现图像

Fig.8 Numerical reconstruction results with traditional holographic stereogram method. (a) Reconstruction image focused at 208.00 mm; (b) reconstruction image focused at 211.00 mm; (c) reconstruction image focused at 217.00 mm; (d) reconstruction image focused at 220.00 mm

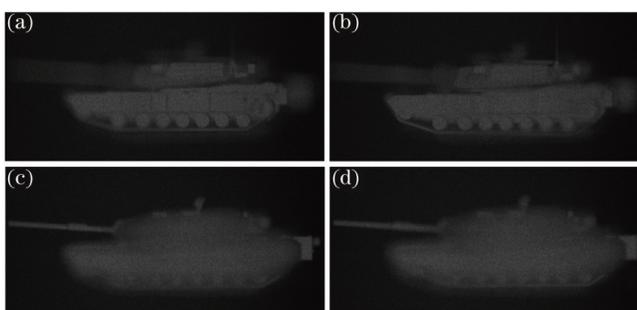


图9 用波前平面计算的全息体视图的数字再现结果。(a)在208.00 mm处聚焦的再现图像;(b)在211.00 mm处聚焦的再现图像;(c)在217.00 mm处聚焦的再现图像;(d)在220.00 mm处聚焦的再现图像

Fig.9 Numerical reconstruction results with proposed method using wavefront plane. (a) Reconstruction image focused at 208.00 mm; (b) reconstruction image focused at 211.00 mm; (c) reconstruction image focused at 217.00 mm; (d) reconstruction image focused at 220.00 mm

图8(a)和图9(a)表示两种方法计算的全息图在坦克模型的后部(深度为208.00 mm)处聚焦的再现图像,图9(a)明显比图8(a)质量好,图9(a)可以清晰分辨出车身前部表面的结构细节,图8(a)仅仅表现出了轮廓特征;图8(b)和图9(b)为全息图在坦克车身前部(深度211.00 mm)处聚焦的再现图像,显然图9(b)的清晰度更高;图8(c)和图9(c)的再现深度为217.00 mm,此时从图9(c)中可以观察到坦克模型的炮管、座舱盖和尾部的矩形结构清晰聚焦,而这些部分在图8(c)中聚焦效果不明显;当再现距离为220.00 mm时,坦克模型处于离焦状态,图8(d)和图9(d)中图像变得模糊,但图9(d)可以发现坦克不同深度处散焦程度的差异,而这种差异在图8(d)中没有得到表现。

上述实验结果表明:传统的全息体视图难以清晰再现距离全息面较远的三维场景,而本文提出的方法能够显著提高全息体视图的成像分辨率,三维场景的各个深度能够被高分辨率的再现。

4.2 简单三维场景的光学再现实验

为了进一步证明本文方法的有效性,用基于空间光调制器(SLM)的全息显示系统,如图10所示,进行光

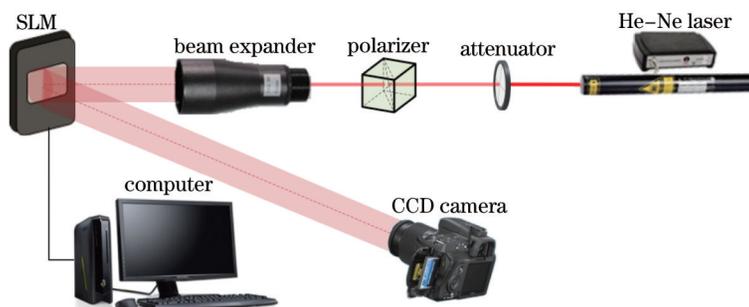


图10 基于SLM的全息再现系统

Fig.10 Optical reconstructed system based on SLM

学再现实验。图 10 中 SLM 像素尺寸为 $8\ \mu\text{m}$, 像素为 $1920\ \text{pixel}\times 1080\ \text{pixel}$ 。通过计算机把全息图加载到 SLM 上; 氦氖激光器发出的 $632.8\ \text{nm}$ 的激光经过衰减片、起偏器之后被扩束准直, 照射 SLM 的显示面板, 受到 SLM 调制的反射光重现了全息图所记录的三维场景, 数码单反相机(Canon EOS 550D, MACRO 100 mm)能够拍摄再现图像。



图 11 目标场景的图像

Fig.11 Image of object scene

鉴于 SLM 有限的空间带宽积, 本文选择结构简单的茶壶模型作为光学再现的三维场景, 如图 11 所示, 其尺寸为 $13.64\ \text{mm}\times 6.53\ \text{mm}\times 8.26\ \text{mm}$ 。波前平面与茶壶模型最近点的距离为 $4.54\ \text{mm}$ ($12.80\sim 8.26\ \text{mm}$), 波前平面与全息图之间的距离为 $z_w = 600.00\ \text{mm}$ 。

用图 1 所示的传统方法和本文提出的方法分别计算茶壶模型的全息图, 表 3 和表 4 给出了计算用到的相关参数, 需要特别说明的是表 4 中的 Hogel 尺寸是根据最优 Hogel 尺寸 $90\ \mu\text{m}$ 取的近似值 $88\ \mu\text{m}$, 因为需要保证 Hogel 的像素个数取整数。全息图的光学再现结果如图 12 所示。

表 3 全息图/波前平面的尺寸及像素水平

Table 3 Size and pixel level of hologram/wavefront plane

Size	Size of pixel	Pixel number
$15.31\ \text{mm}\times 8.62\ \text{mm}$	$8\ \mu\text{m}\times 8\ \mu\text{m}$	$1914\ \text{pixel}\times 1078\ \text{pixel}$

表 4 渲染平面的相关参数

Table 4 Parameters of wavefront plane

Hogel		FOV	Rendered image	
Size	Pixel number		Pixel number	Number
$88\ \mu\text{m}\times 88\ \mu\text{m}$	$11\ \text{pixel}\times 11\ \text{pixel}$	4.53°	$11\ \text{pixel}\times 11\ \text{pixel}$	174×98

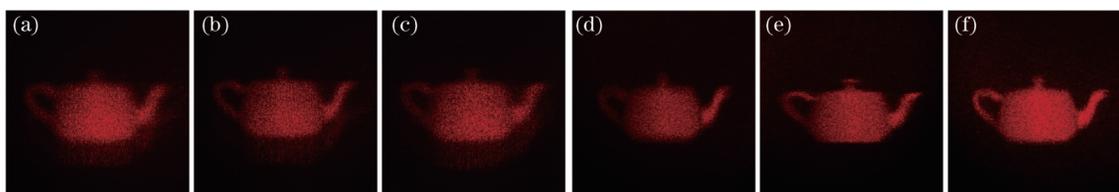


图 12 茶壶模型的光学再现结果。(a) 传统方法在 $605\ \text{mm}$ 处聚焦的再现图像; (b) 传统方法在 $609.00\ \text{mm}$ 处聚焦的再现图像; (c) 传统方法在 $613.00\ \text{mm}$ 处聚焦的数字再现图像; (d) 本文提出的方法在 $605.00\ \text{mm}$ 处聚焦的再现图像; (e) 本文提出的方法在 $609.00\ \text{mm}$ 处聚焦的再现图像; (f) 本文提出的方法在 $613.00\ \text{mm}$ 处聚焦的再现图像

Fig.12 Optical reconstruction results of teapot model. (a) Reconstruction image focused at $605.00\ \text{mm}$ with traditional method; (b) reconstruction image focused at $609.00\ \text{mm}$ with traditional method; (c) reconstruction image focused at $613.00\ \text{mm}$ with traditional method; (d) reconstruction image focused at $605.00\ \text{mm}$ with proposed method; (e) reconstruction image focused at $609.00\ \text{mm}$ with proposed method; (f) reconstruction image focused at $613.00\ \text{mm}$ with proposed method

图 12(a)、12(b)和 12(c)是用传统方法再现的结果, 相机的聚焦位置分别为茶壶模型的前部($605.00\ \text{mm}$)、中部($609.00\ \text{mm}$)和后部($613.00\ \text{mm}$); 而图 12(d)、12(e)和 12(f)则是用本文提出的方法再现的结果, 相机的聚焦深度分别为 605.00 、 609.00 、 $613.00\ \text{mm}$ 。图 12(d)、12(e)和 12(f)明显比图 12(a)、12(b)和 12(c)的清晰, 即本文提出的方法再现的图像具有更高的分辨率。对比图 12(b)和图 12(e), 两者的聚焦位置均为茶壶模型的中部

(609.00mm),图 12(e)中茶壶模型的盖子和壶嘴等细节结构非常清晰,而图 12(b)只表现出了大致的外形特征;另外,目标图像图 11 所示的茶壶模型表面的光泽效果也可以在图 12(d)、12(e)和 12(f)中看到,而图 12(a)、12(b)和 12(c)无光泽效果。

4.3 计算复杂度分析

实验用 Intel Pentium 6 核计算机, CPU 主频为 3.70 GHz, 内存 16 GB, Microsoft Windows 7 操作系统;渲染工具是开源软件 Blender 2.72b, 全息图用 Matlab R2013a 计算生成。

表 5 实验花费的时间(单位:s)

Table 5 Time spending in experiments (unit: s)

	Tank	Teapot
Rendering	6132.25	179.64
Calculation	6271.64	214.07
Total	12403.89	393.71

表 5 列出了用本文提出的方法生成全息图需要消耗的时间,实验过程分为三维场景渲染和计算全息图两个步骤。图像渲染和计算全息图所耗费的时间主要受渲染图像的像素数和渲染图像的数量影响。飞机模型需要渲染的图像数量多,像素高,因此花费了较多的渲染和计算时间,而茶壶模型渲染的图像数量较少,像素低,渲染和计算过程消耗的时间也较少。渲染和计算全息图时,对单幅视角图像的渲染和傅里叶变换运算都是相互独立的,因此可以利用图形处理器(GPU)并行处理能力提高渲染和计算的速度。

5 结 论

全息体视图的空间采样、角采样和 Hogel 的衍射效应是制约其成像分辨率的主要因素,而 Hogel 的衍射效应是再现像极限分辨率的决定因素。三维场景与全息面之间的距离和 Hogel 的尺寸是影响再现像极限分辨率的两个参数,其中三维场景与全息面的距离越远,成像的极限分辨率数值越大,成像质量越差,但 Hogel 的尺寸与再现像的极限分辨率不是简单的线性关系。以人眼的分辨能力作为全息体视图再现像的极限分辨率可以获得三维场景与全息面之间的极限距离,从而确定波前平面的位置和最佳 Hogel 尺寸。结果表明,应用该方法能够得到高分辨率的再现像。但是渲染三维场景和计算全息图的速度较慢,下一步的工作是利用 GPU 的并行处理能力进行加速。

参 考 文 献

- 1 Lü Naiguang. Fourier Optics[M]. Beijing: China Machine Press, 2006: 226-228.
吕乃光. 傅里叶光学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006: 226-228.
- 2 Wei Sui. Basic Theory of Holographic Imaging[M]. Hefei: Anhui University Press, 2013: 20-23.
韦 穗. 全息成像概论[M]. 合肥: 安徽大学出版社, 2013: 20-23.
- 3 Jia Jia, Wang Yongtian, Liu Juan, *et al.*. Progress of dynamic 3D display of the computer-generated hologram[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(5): 050002.
贾 甲, 王涌天, 刘 娟, 等. 计算全息三维实时显示的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(5): 050002.
- 4 Li Junchang, Gui Jinbin, Lou Yuli, *et al.*. Study of creation algorithm of computer-generated hologram of diffuse reflection 3D object[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(2): 020903.
李俊昌, 桂进斌, 楼宇丽, 等. 漫反射三维物体计算全息图算法研究[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(2): 020903.
- 5 Wang Hui, Jin Hongzhen, Wu Dongyuan, *et al.*. Information capacity and reduction in computing holographic three-dimensional display [J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(2): 0209012.
王 辉, 金洪震, 毋东元, 等. 计算全息三维显示的信息量及其简化[J]. 中国激光, 2014, 41(2): 0209012.
- 6 Hong J, Kim Y, Choi HJ, *et al.*. Three-dimensional display technologies of recent interest: principles, status, and issues [Invited][J]. Appl Opt, 2011, 50(34): H87-H115.
- 7 Zhang Hao, Collings N, Chen Jing, *et al.*. Full parallax three-dimensional display with occlusion effect using computer generated hologram [J]. Opt Eng, 2011, 50(7): 074003.
- 8 Ichikawa T, Yamaguchi K, Sakamoto Y. Realistic expression for full-parallax computer-generated holograms with the ray-tracing method

- [J]. Appl Opt, 2013, 52(1): A201-A209.
- 9 Sun Ping, Xie Jinghui, Zhou Yuanlin, *et al.*. Optical tomography based on Fresnel zone plate scanning holography[J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24(1): 110-114.
- 孙 萍, 谢敬辉, 周元林, 等. 基于菲涅耳波带板扫描全息术的光学层析成像[J]. 光学学报, 2004, 24(1): 110-114.
- 10 Cao Xuemei, Sang Xinzhu, Chen Zhidong, *et al.*. Computer generated hologram of complex three-dimensional object based on a two-dimensional color image and the depth map[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(6): 0609002.
- 曹雪梅, 桑新柱, 陈志东, 等. 基于二维彩色图像和深度图的复杂三维场景的计算全息图[J]. 中国激光, 2014, 41(6): 0609002.
- 11 Chen J S, Chu Daping, Smithwick Q. Rapid hologram generation utilizing layer-based approach and graphic rendering for realistic three-dimensional image reconstruction by angular tiling[J]. Journal of Electronic Imaging, 2014, 23(2): 023016.
- 12 Yang Lei, Xia Jun, Zhang Xiaobing, *et al.*. Three-dimensional display by holographic imaging on multiple focal planes[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(2): 0209017.
- 杨 磊, 夏 军, 张晓兵, 等. 基于多平面全息成像的三维显示[J]. 中国激光, 2014, 41(2): 0209017.
- 13 Takaki Y, Ikeda K. Simplified calculation method for computer-generated holographic stereograms from multi-view images[J]. Opt Express, 2013, 21(8): 9652-9663.
- 14 Jiang Xiaoyu, Pei Chuang, Yan Xingpeng, *et al.*. Optimization of exit pupil function: improvement on the OTF of full parallax holographic stereograms[J]. Journal of Optics, 2013, 15(12): 125402.
- 15 Wakunami K, Yamaguchi M, Javidi B. High-resolution three-dimensional holographic display using dense ray sampling from integral imaging[J]. Opt Lett, 2012, 37(24): 5103-5105.
- 16 Kang H, Yamaguchi T, Yoshikawa H. Accurate phase-added stereogram to improve the coherent stereogram[J]. Appl Opt, 2008, 47(19): D44-D54.
- 17 Kang H, Yamaguchi T, Yoshikawa H, *et al.*. Acceleration method of computing a compensated phase-added stereogram on a graphic processing unit[J]. Appl Opt, 2008, 47(31): 5784-5789.
- 18 Zhang H, Zhao Y, Cao L, *et al.*. Fully computed holographic stereogram based algorithm for computer-generated holograms with accurate depth cues[J]. Opt Express, 2015, 23(4): 3901-3913.
- 19 Wakunami K, Yamaguchi M. Calculation for computer generated hologram using ray-sampling plane[J]. Opt Express, 2011, 19(10): 9086-9101.
- 20 Wakunami K, Yamashita H, Yamaguchi M. Occlusion culling for computer generated hologram based on ray-wavefrontconversion[J]. Opt Express, 2013, 21(19): 21811-21822.
- 21 Utsugi T, Yamaguchi M. Speckle-suppression in hologram calculation using ray-sampling plane[J]. Opt Express, 2014, 22(14): 17193-17206.

栏目编辑: 何卓铭