

全息体视图打印技术进展综述

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

摘要 全息体视图技术是一种成熟的裸眼三维显示技术, 很多基于全息体视图技术的产品已经成功地实现了商业化并带来较好的视觉体验。但在实际应用中, 全息体视图技术仍存在着再现像的视角无法满足观察需要、打印高质量的全息图所需采样图像过多、光学实验结果缺少模拟结果与其对照等问题。很多国内外研究小组对这些问题进行了深入研究。在此介绍了应用最广泛的两种全息技术, 并综述了近年来在扩大全息体视图视场角、减少全息体视图所需要的采样数量以及全息体视图的数值重构等方面的研究进展。

关键词 全息; 体视图; 打印技术

中图分类号 O438.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.150002

Review of Development of Holographic Stereogram Printing Technology

Jiang Xiaoyu^{1*}, Fan Fan^{1,2}, Yan Xingpeng¹, Zhang Teng¹,
Han Chao¹, Wang Chenqing¹, Yu Haiyang¹

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

Abstract Holographic stereogram technology is a three-dimensional display technology that can be used with the naked eye. Several holographic stereogram products have been successfully commercialized and have realized amazing visual experiences. However, in practical applications, several problems remain, such as an inadequate field of view (FOV) in the reconstructed image applications, excessive number of sampled images required to print a high-quality holographic stereogram, and lack of simulation results used for comparison with experimental results. In recent years, several research groups have conducted in-depth research on these issues. This study introduces the two most widely used holographic stereogram techniques, and then summarizes recent progresses in enlarging the FOV of a holographic stereogram, reducing the number of required samples, and numerical reconstruction of holographic stereograms.

Key words holography; stereogram; printing technology

OCIS codes 090.2870; 090.2900; 090.1995

1 引言

全息体视图技术是当前主要的裸眼三维(3D)显示技术, 经过长时间的发展已经广泛应用于军事、医疗、商业、广告等领域。全息体视图的基本原理是

利用离散的光场采样近似替代连续的物光波前, 通过双目视差原理形成三维效果。具体方法是: 利用真实或虚拟相机对场景进行采样获得一组离散二维图像, 记录场景的光场信息, 将其经过处理加载到空间光调制器(SLM)上, 激光经过分束器被分成物光

收稿日期: 2019-01-10; 修回日期: 2019-01-24; 录用日期: 2019-03-05

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

和参考光,物光扩束后照射在 SLM 上加载图像信息,然后与扩束后的参考光在记录介质孔径区域发生干涉形成全息记录单元,即为 hogel;将二维图像依次记录到记录介质的 hogel 上,当沿参考光或其共轭方向照射记录介质时,通过衍射原理形成三维场景的全息再现像。

1969 年, DeBitetto^[1] 最早利用可移动狭缝将相机采样的一组视角图像依次记录在全息干板上,制作了最早的水平视差型(HPO)全息体视图。1970 年以来, King 等^[2] 在水平视差型全息体视图的基础上,提出了两步法全息体视图打印技术,随后学者针对消除水平视差全息图存在的色散与畸变、彩色全息体视图的打印等问题进行了研究^[3-11]。20 世纪 90 年代初,液晶(LCD)屏替代了传统的投影屏成为全息打印的主要工具,文献[12-15]以 LCD 为显示器提出一种通过一步打印过程获取全视差全息体视图的方法,并以此为基础进行了一系列的研究。这种方法通过增加垂直视差的方式,彻底解决了由单一水平视差所引起的畸变问题。其后,将更轻薄便携的光致聚合物材料替代银盐板作为新的全息记录介质,同时脉冲激光技术开始替代连续激光用于快速打印全息体视图。在这些技术进展的基础上,麻省理工学院的全息研究小组以光致聚合物为打印介质,提出了一种被称为 Ultragram 的全息体视图打印方法,Geola 公司则以脉冲激光为激光光源对全息体视图用于人像打印的技术进行了研究。近年来,很多研究小组致力于扩充全息体视图的视场角(FOV)、减少全息体视图需要的采样图像数量,以

及对全个体视图的打印结果进行数值模拟等问题的研究。

本文主要介绍两种主流的全息体视图打印技术,并从全息体视图视场角的扩充、减少采样图像数量的新方法——有效视角图像切片嵌合法,以及全息体视图数值重构 3 个方面对近年来的一些成果进行介绍。

2 全息体视图打印技术

2.1 Ultragram 全息体视图

1991 年, Halle 等^[16-17] 提出一种被称为 Ultragram 的全息体视图打印方法,并基于此打印方法成立了 Zebra Imaging 全息成像公司。

这种方法的基本思路如下:利用虚拟的无穷远相机对场景进行采样,在水平与垂直方向移动记录 $m \times n$ 张视角图像,并且每张视角图像为 $M \text{ pixel} \times N \text{ pixel}$, 每张视角图片相同位置的像素按照相机采样的位置顺序重新排列形成新的重组视角图片,再利用重组后的视角图片对 hogel 进行记录,得到了无穷远相机法的全视差 Ultragram。图 1(a)展示了全视差情形无穷远相机法视角图片的重组方法。该方法可表示为

$$H_{ij}(s, t) = P_{st}(i, j), s = 1, \dots, M, t = 1, \dots, N, i = 1, \dots, m, j = 1, \dots, n, \quad (1)$$

式中: $P_{st}(i, j)$ 为水平第 s 行、竖直第 t 列的视角图像的第 $i \times j$ 个像素位置的像素; $H_{ij}(s, t)$ 为重组后水平第 i 行、竖直第 j 列的重组视角图像的第 $s \times t$ 个像素位置的像素。

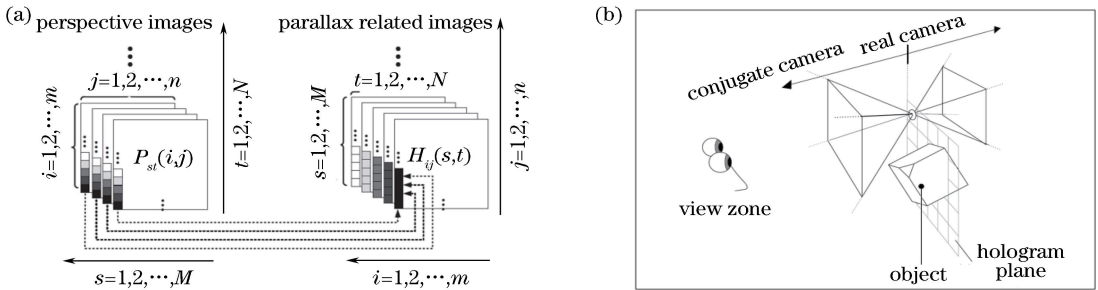


图 1 Ultragram 全息体视图。(a) 无穷远相机法全视差全息体视图视角图像的重组; (b) 双视锥采样法原理

Fig. 1 Holographic stereogram of ultragram. (a) Rearranged perspective image of full parallax holographic stereogram with infinite camera; (b) principle of double-cone sampling method

Ultragram 技术解决了传统水平视差全息体视图的畸变问题,实现了在任意深度无畸变再现的全息体视图的打印。

许多学者随后进行了一系列的相关研究,并取得了一些成果^[18-22]。1997 年, Halle 等^[23] 提出了双视锥

采样法,该方法构造一种快速生成全视差全息体视图的特殊渲染器(贗像相机),将普通相机与贗像相机反向放置于全息平面上进行采样,而后将贗像相机的采样图像替代普通相机的采样图像,则获取图像的速度较快并可直接用于体视图打印,图 1(b)给出了双视

锥法的基本原理。以 Ultragram 和双视锥法为基本思路,Zebra Imaging 公司对其全息体视图技术进行了商业化研究,利用扩展视角技术、脉冲激光打印技

术,以光致聚合物为材料成功地制作出水平放置高光照明可凸出全息干板显示的三维全息地图,并广泛应用于军事、民用等领域,如图 2 所示。

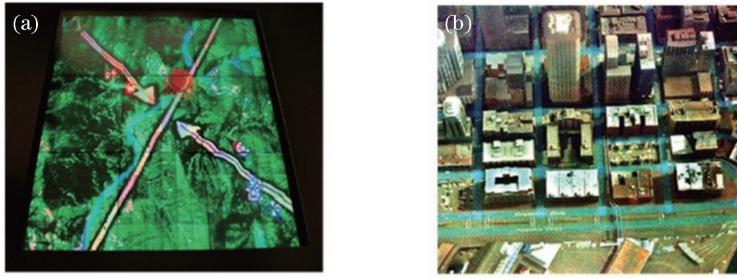


图 2 Zebra Imaging 公司制作的三维地图。(a)战场环境全息地图;(b)纽约市全息地图

Fig. 2 3D map of Zebra Imaging. (a) Holographic map of battlefield environment; (b) holographic map of New York city

Zebra Imaging 采用双视锥相机作为虚拟相机,可以快速获取和直接打印图像,然而由于其主要针对虚拟三维场景的处理,所以需要建立三维模型才能得到相应的全息体视图。2017 年,Zebra Imaging 公司进行转型,将公司的商业与研究部门分离,其研究部门仍然从事全息体视图技术的研究工作。

2.2 脉冲激光打印与数字直写全息体视图打印技术

Brotherton-Ratcliffe 等成立的综合光学实验室(Geola),主要致力于研制应用于全息体视图打印的脉冲激光打印系统以及三维人像打印的研究。1998 年起, Brotherton-Ratcliffe 与 Rodin 等尝试使用脉冲激光进行数字全息图的打印工作^[24-28]。2005 年, Geola 采用紧凑型 RGB 脉冲激光直接写入数字全息方案解决了脉冲激光制作全息体视图的问题^[29]。2008 年, Brotherton-Ratcliffe 等^[30]基于水平轨道相机设计的打印系统提出了一步合成全息体视图打印法,图 3(a)给出了脉冲激光打印系统以及相应的数

字直写全息体视图(DWDH)的原理。该方法在相机的镜头平面、胶卷平面、胶卷的投影平面与全息平面、空间光调制器(SLM)平面,以及 SLM 投影平面之间建立起对应关系,利用光线追踪法,当 hogel 位置与相机位置一定时,通过一条测试线建立相机胶卷上一点与 SLM 上一点的对应关系,表示为

$${}^{\nu}S_{\alpha\beta} = {}^kI_{ij}, \quad (2)$$

式中: S 为 SLM 上的像素; I 为相机采样图像上的像素; μ, ν 分别为用以打印全息图 SLM 平面的水平和竖直位置; α, β 分别为全息图的水平 and 竖直全息像素的位置; k 为水平相机轨道上的相机位置; i, j 分别为相机采样图像的水平 and 竖直像素位置。

Brotherton-Ratcliffe 等^[31-32]提出了一种图像捕获技术,可以将水平轨道目标相机采样的图像通过图形变换的方法转换为用于全息图视图打印的中心相机图像,如图 3(b)所示,目标相机帧上点与相机点连线在全息平面上的投影可以表示为

$$P(x_1, y_1) + \lambda k = Q(x_2, y_2), \quad (3)$$

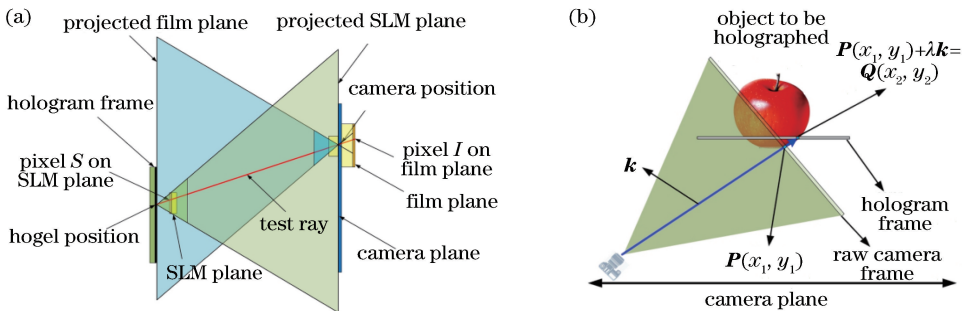


图 3 Geola 的数字直写全息图和中心相机变换。(a)数字直写全息体视图原理;(b)中心相机图像变换原理

Fig. 3 Direct-writing digital holography and centred camera transform of Geola. (a) Principle of direct-writing digital holography; (b) principle of centred camera image transform

式中: $(x_1, y_1), (x_2, y_2)$ 分别为目标相机帧平面和全息平面上的点的坐标; $P(x_1, y_1)$ 为目标相机帧

上点的向量坐标; $Q(x_2, y_2)$ 为全息平面上点的向量坐标; k 表示经过相机点与全息平面上点的向

量。(3)式意味着目标相机帧上点、相机点以及全息平面上点共线,即 $Q(x_2, y_2)$ 为目标相机帧上点与相机点连线在全息平面上的投影点对应的向量。

利用此种技术,Geola 设计出一系列用于商业



图4 Geola的全息体视图打印系统。(a) Geola的脉冲激光打印系统;(b)该系统制作的高质量大幅面全彩色全息体视图
Fig. 4 Holographic stereogram printing system designed by Geola. (a) Pulse laser printing system of Geola; (b) full color holographic stereogram with high quality and large format made by this system

另外,随着脉冲激光技术的发展,2013年 Geola 开始利用脉冲激光直写全息体视图打印技术取代连续激光制作模压全息图^[34]。这一技术也在逐渐成熟,2018年 Geola 已能够通过多次曝光技术将深度

领域的全息体视图采样系统。

近些年,Geola 公司致力于基于 RGB 脉冲激光的数字全息打印系统的研究,并打印出 hogel 尺寸在 0.4~2 mm 之间的高质量、高衍射效率的大幅面全彩色反射式全息体视图^[33],如图 4 所示。

三维场景与常用的全息安全元素集成为彩色三维全息图^[35],图 5 为加入了深度安全特征的混合模压全息图,而这种新型的安全防伪全息图也成为 Geola 公司的新商业化项目。

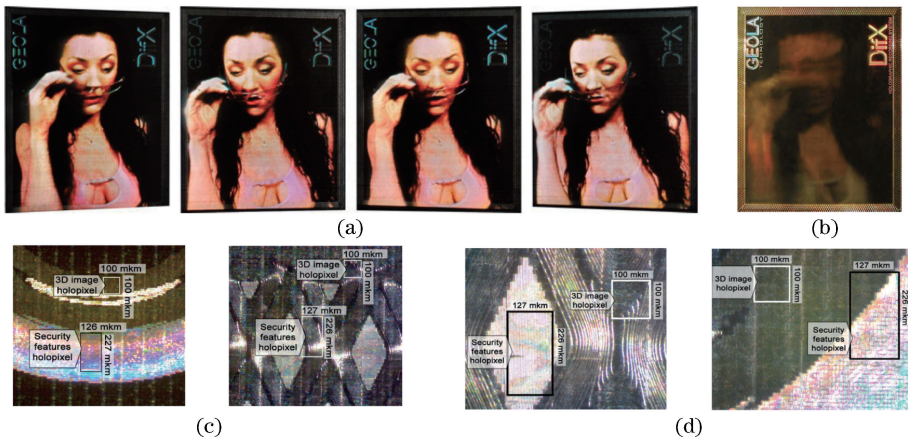


图5 具有公共和光学安全特性的混合模压全息图。(a)从深度三维场景清晰可见的方向照明全息图看到的照片;(b)从模压铭文清晰可见的方向照明全息图得到的照片;(c)(d)不同放大倍率下看到的模压全息图的缩微图像

Fig. 5 Mixed molded holograms with public and optical security features. (a) Photographs of hologram illuminated from direction where deep 3D image is clearly visible; (b) photograph of hologram illuminated from direction where embossed inscriptions are clearly visible; (c) (d) microphotographs of embossed holograms with different magnifications

Geola 公司主要以银盐板为全息记录材料,其设计的全息打印脉冲激光器以及打印系统极大地提高了全息体视图的打印速度。由于真实人像的打印技术需要对真实相机拍摄的采样图像进行处理,为了提高相机设计的灵活性,节约图像打印时间,Geola 公司的产品主要采用水平视差的形式展示。

3 近年来全息体视图打印技术的进展

3.1 全息体视图视场角的扩充

传统全息体视图打印技术将显示器的图像透射到散射膜上,并将其上每一点射线的一部分透射到全息孔径上进行全息打印,然而此种方法的主要问题是高能量损失,并且视场受限于接近 60° 的散射

场,其能量损失随着视场的扩大而增大。为了提高光能利用率、扩大视场角,可以采用添加折射透镜的方法,并通过透镜将 LCD 的光线会聚到全息孔径位置,但同样由于折射光学的限制性,其视场不能超过 90° 。

为了解决这一问题,2016 年 Zherdev 等^[36]设计了一种将全息光学元件作为衍射透镜,采用衍射替代折射的方法,可将视场角扩大到 120° ,如

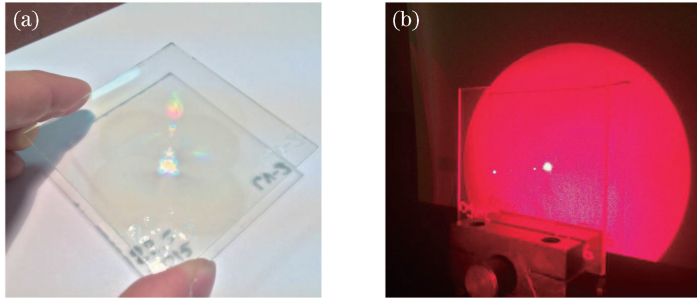


图 6 基于全息光学元件的复合衍射透镜。(a)通过全息打印法获得的复合衍射透镜;(b)复合衍射透镜的视场角
Fig. 6 Composite diffraction lens based on holographic optical elements. (a) Composite diffraction lens obtained by holographic printing method; (b) FOV of composite diffraction lens

传统的平面全息图只能记录正对位置的图像,即使有足够大的视场角也无法做到在侧面与后面观察全息视图,这是最基本的平面全息的局限。为了解决视场的问题,2018 年 Sando 等^[37]提出了一种利用凸抛物镜通过平面全息图获取具有水平和垂直视场的全息图的方法。如图 7 所示,由于凸抛物镜具有将平面波反射为从抛物镜焦点发出的球面波的特性,因此,反射球面波的发散角 φ 由半径 r 与凸

图 6(a)所示。由于一次曝光无法得到需要的全息干涉图像,因此需要的全息透镜要由多个全息元件组合而成。复合全息透镜由 4 个基本的全息图构成,并且每个全息图焦点一致并位于距离复合全息透镜 f 的位置。每个全息图视场角都为 60° ,则复合全息透镜的视场角为 120° ,如图 6(b)所示。另外,基于菲涅耳波带板的振幅型衍射透镜也可以实现此种目的。

抛物面镜焦距 d 之比确定,设置为 r/d ,比值越大,则发散角越大。当 $r > 2d$ 时,发散角 $> 180^\circ$,而高数值孔径折射球面波不可能实现这样的视角。由于抛物面镜的旋转对称性,反射球面波的视角理论上可以实现水平、高度分别为 360° 和 90° 的视角再现。利用凸抛物镜的这种原理,将凸抛物镜作为视场角扩充设备对视场角进行扩大,经过实验验证反射的球面波可以实现水平 180° 、高度 90° 的视角再现。

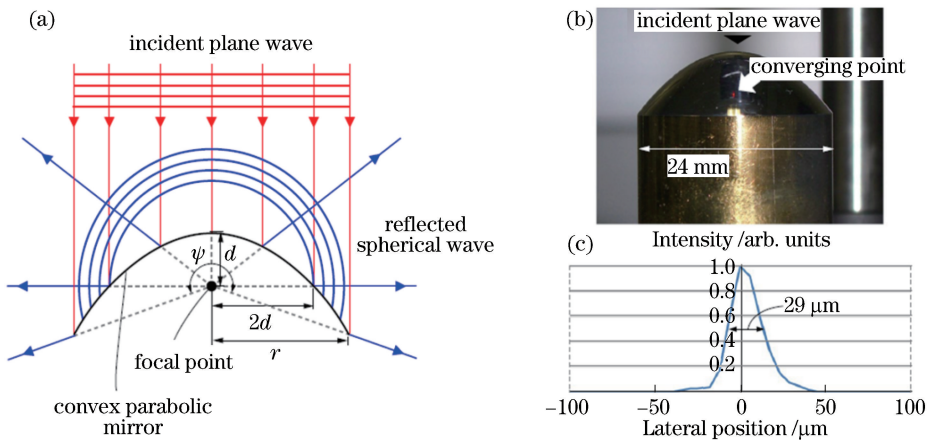


图 7 利用凸抛物镜对全息图视场角的扩充。(a)凸抛物镜将平面波转换为球面波的原理;(b)凸抛物镜对视场角的扩充;(c)扩充视场后虚拟会聚点侧向剖面图
Fig. 7 FOV expansion of hologram by convex parabolic lens. (a) principle of converting plane wave into spherical wave by convex parabolic mirror; (b) expansion of FOV by convex parabolic mirror; (c) horizontal lateral profile of virtually converging point after expanding FOV

3.2 有效视角图像切片嵌合法

传统的视角图像处理方法通常利用光线追踪原理,在采样图像像素与全息打印的重排图像之间建立像素对应关系,这要求重排图像的分辨率由采样图像的数量决定,而要提高全息体视图的质量就需要大量的采样图像。为了解决这一问题,Su 等^[38]在 2017 年提出了一种被称为有效视角图像切片嵌合(EPISM)法的全息体视图一步打印法。该方法利用两步转印法的基本思路,利用视角图像切片嵌合的办法代替传统的像素对应获取用以全息打印的合成视角图像。通过该办法,极大地提高了采样图像像素的利用率,只需要很少的采样图像就可以获得高质量的全息体视图。

在 EPISM 法中,通过计算机模拟的方式产生虚拟的全息母版,并将其命名为虚拟 H_1 干板,将转印干板记作 H_2 干板,通过光线追踪原理,模拟光线从虚拟 H_1 干板传输到 H_2 干板的过程,可以获得位于 H_2 干板上的 hogel 中心位置的观察点 O 所观察到的再现像,观察点 O 和虚拟 H_1 干板上的 hogel 形成的视锥与 LCD 相交部分作为 O 点的一个有效视角图像切片,将所有有效视角图像的视角切片拼接在一起,则可以获得打印 hogel 的合成有效视角图像。图 8(a)给出了有效视角图像片段,由多个虚拟 hogel 的有效视角图像片段嵌合成有效视角图像,如图 8(b)所示。EPISM 法类似于两步法,可以获得突出 H_2 干板的正实像。

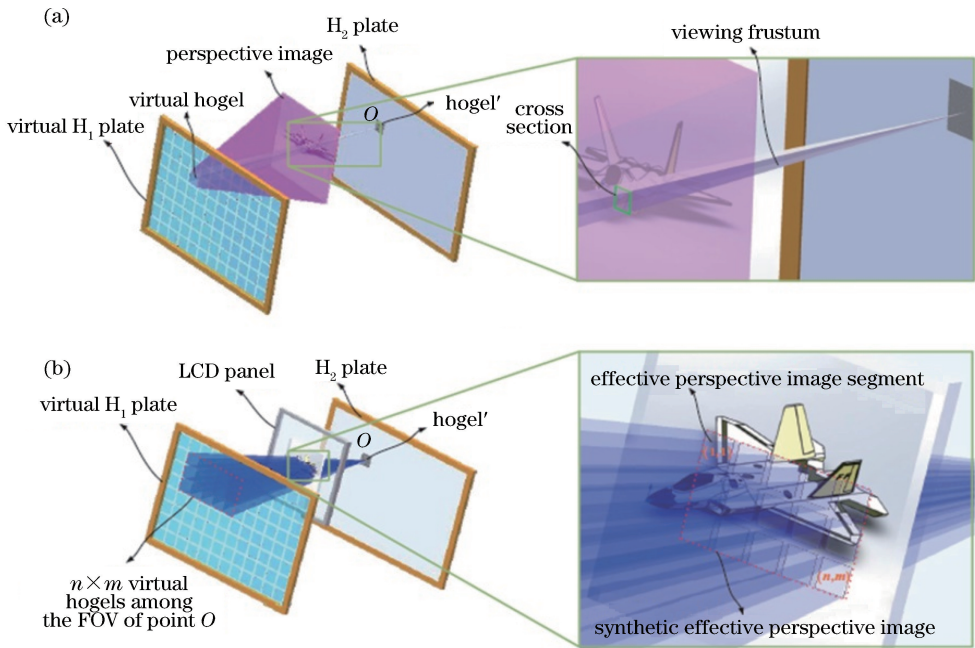


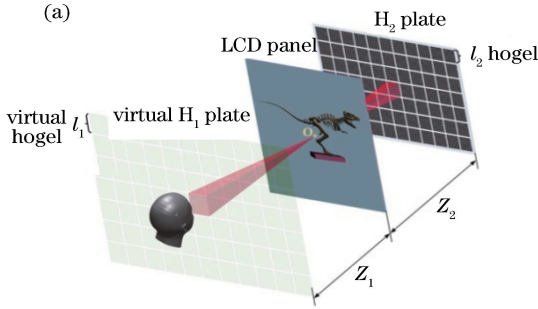
图 8 EPISM 法的基本原理以及再现像。(a)单一 hogel 的有效视角图像切片的获取;(b)有效视角图像切片的嵌合
Fig. 8 Basic principle of EPISM method and reconstructed image. (a) Acquisition of single hogel image segments with effective perspective; (b) mosaic of image segments with effective perspective

针对 EPISM 法存在的像差问题,2018 年 Su 等^[39]从空间频域的角度利用光学传递函数对 EPISM 法进行了分析和优化。如图 9(a)所示,以 LCD 像素点为中心建立视觉模拟模型,当利用体视

图进行重建时,由于离散二维图像片段逼近物光波前,因此会产生离焦像差,利用光学传递函数 (OTF)对模型进行分析,EPISM 法的光学传递函数 $OTF(f_x, f_y)$ 可表示为

$$OTF(f_x, f_y) = \Delta \left[\frac{\lambda(z_1 - z_v) |f_x|}{l'} \right] \times \Delta \left[\frac{\lambda(z_1 - z_v) |f_y|}{l'} \right] \times \text{sinc} \left\{ \frac{(z_1 - z_0)}{z_0(z_1 - z_v)} \cdot [l'(z_1 - z_v) f_x] \left[1 - \frac{\lambda(z_1 - z_v) |f_x|}{l'} \right] \right\} \times \text{sinc} \left\{ \frac{(z_1 - z_0)}{z_0(z_1 - z_v)} \cdot [l'(z_1 - z_v) f_y] \left[1 - \frac{\lambda(z_1 - z_v) |f_y|}{l'} \right] \right\}, \quad (4)$$

式中: 函数 $\Delta(x) = \begin{cases} 1 - |x|, & |x| \leq 1 \\ 0, & \text{else} \end{cases}$; 函数 $\text{sinc}(x) = \frac{\sin(\pi x)}{\pi x}$; l_1, l_2 分别为虚拟 H_1 干板和 H_2 干板上的 hogel 尺寸; f_x, f_y 分别为水平和垂直方向的空间频率分量; λ 为激光波长; z_1 为虚拟 H_1 干板到 LCD 面板的距离; z_2 为 H_2 干板到 LCD 面板的距离; z_0 为物点到 LCD 面板的距离; z_v 为观察平面与虚拟 H_1 干板的距离; l' 为出瞳尺寸。



分析 OTF 函数可知, 由空间物点和 LCD 的距离决定的离焦像差, 距离越远则像差越大。选取 OTF 沿 f_x, f_y 的积分值在积分区域内的平均值 γ 作为评价指标, 通过研究三维场景不同深度范围 γ 随出瞳尺寸的变化规律可知, 对于与 LCD 距离为 0 的平面, 最优出瞳尺寸较大, 但不能超过人眼尺寸; 对于与 LCD 距离不为 0 的平面, 距离越大, 最优出瞳尺寸越小。图 9(b) 所示为不同距离、不同出瞳尺寸再现图像质量的对比。

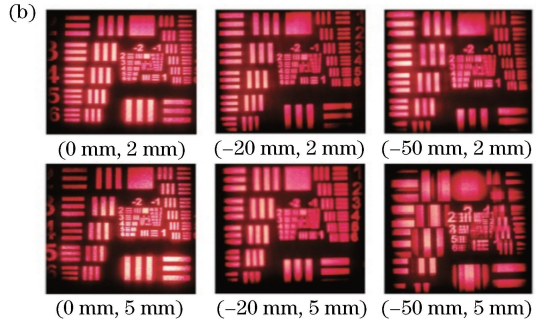


图 9 利用光学传递函数分析 EPISM 法。(a) 基于 EPISM 法全息体视图的出瞳函数模型; (b) 不同条件下的光学重建图像
Fig. 9 Analysis of EPISM method by optical transfer function. (a) Exit pupil function model of holographic stereogram based on EPISM method; (b) optical reconstruction images under different conditions

2018 年 Su 等^[40] 还利用增加散射膜和透镜的方式对提升 EPISM 法全息体视图打印效率进行了分析和优化。如图 10(a) 所示, 由于 EPISM 法采用传统的在 LCD 前方放置毛玻璃的方法, 通过毛玻璃的散射光照射全息干板前侧孔径获取物光, 而该方法会造成大量的物光能量浪费。为了提高打印效率并保证打印质量, Su 等^[40] 采用全息散射膜加场镜的方法进行全息体视图打印。如图 10(b) 所示, 引入放置在 LCD 前端的场镜是为了将原本散射的光会聚到全息孔径

位置以提高光能利用率, 而在紧贴 LCD 的位置放置全息散射膜, 是为了防止单一使用场镜时全息干板记录面能量过高, 使得再现时场景淹没于背景光之内。利用全息散射膜替代毛玻璃是因为毛玻璃扩展角过大, 而其可以将散射范围限制在一个较小的角度之内。利用波动光学原理对散射膜和场镜的配合对记录光场的影响进行分析, 并通过数值仿真和光学实验完成了全息散射膜展角的优化, 既提高了打印效率, 又保证了良好的三维场景再现效果。

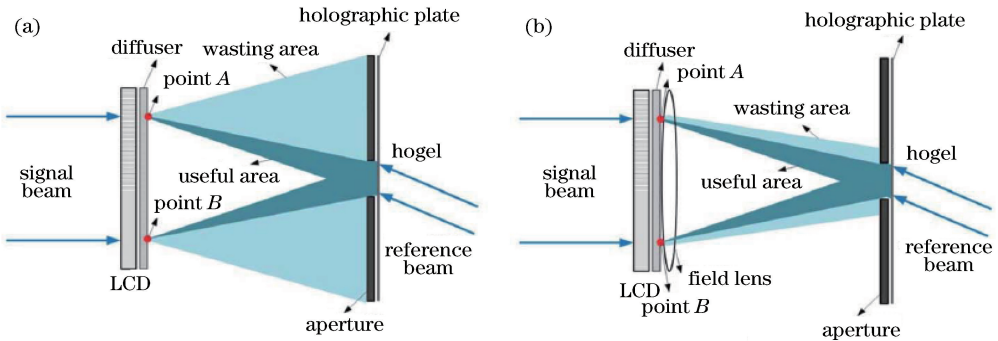


图 10 不同条件下物光的分布。(a) 只有散射膜时物光的分布; (b) 既有散射膜又加场镜对光线的会聚
Fig. 10 Distributions of object light under different conditions. (a) Distribution of object light when diffuser is used; (b) convergence of light when diffuser and field lens are used

3.3 全息体视图的数值重构

全息体视图打印的光学实验通常需要各种细致的准备, 一旦微小的环节出现问题就可能会影响整

个打印图像的质量。在很多情况下, 难以判断实验结果中存在的问题究竟是由于实验中间环节的失误造成的还是由于所用方法自身原因造成的, 为此在

进行光学实验之前,利用处理后的采样图像对全息视图的再现像进行模拟已成为很有意义的研究课题。

2012年, Park等^[41]提出了一种全视差全息视图进行数值重构的算法。该算法基于 Halle 给出的全息视图图像重组算法处理后的采样图像,根据光线追踪原理给出了相应的全息视图的数值重构图像的算法。如图 11 所示,这种算法根据人眼与全息单元位置之间的连线获取全息单元再现像相对位置的像素,将所有像素按照相应全息单元的位置组成图像,则得到全息视图的数值重构图像。这种数值重构图像算法的好处在于可以在光学实验之

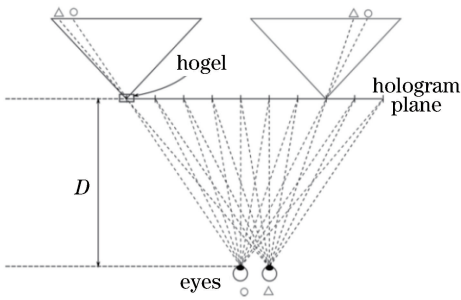


图 11 全息视图的数值重构原理

Fig. 11 Numerical reconstruction principle of holographic stereogram



图 12 不同几何畸变因子对全息视图再现像的影响。(a) $\kappa=0$; (b) $\kappa=0.000001$; (c) $\kappa=0.00001$; (d) $\kappa=0.0001$; (e) $\kappa=0.001$

Fig. 12 Effects of different geometric distortion factors on reconstructed image of holographic stereogram. (a) $\kappa=0$; (b) $\kappa=0.000001$; (c) $\kappa=0.00001$; (d) $\kappa=0.0001$; (e) $\kappa=0.001$

受上述数值重构算法的启发,2018年樊帆等^[43]基于 EPISM 法的成像原理提出了针对于 EPISM 法的数值重构算法。将人眼所在位置看作一个视点,利用该视点与 H_2 干板上的 hogel 建立视锥并获得有效观察图像切片,将所有有效视角观察图像切片嵌合在一起以获得视点观察到的再现像。如图 13 所示,将数值重构图像与原始采样图像以及通过光学实验的再现像进行了比较,该算法可以较好地 EPISM 法全息视图打印的光学实验结果进行模拟。

4 结束语

全息视图打印技术在全息地图制作以及三维

前利用处理过的视角图像对再现像进行数值模拟,为光学实验提供实验前的效果预期。将数值模拟结果与光学再现像结果进行比较可以发现,该算法可以较好地模拟光学再现像。

由于全息视图打印通常使用透镜将 LCD 的光线会聚到全息孔径的位置,以提高能量利用率,因此对全息视图数值重构时,需要考虑由于引入透镜而引起的径向畸变的问题。2014年, Park等^[42]基于前述数值重构算法的思路,提出一种带有径向畸变的全视差全息视图的数值重构算法。这种算法针对彩色全息视图,将引入光学透镜引起的径向畸变问题加入到数值重构算法的内容中,算法引入径向畸变模型表示透镜引入的径向畸变,其模型表示为

$$\xi_u = \frac{\xi_d}{1 + \kappa r_d^2}, \eta_u = \frac{\eta_d}{1 + \kappa r_d^2}, r_d = \sqrt{\xi_d^2 + \eta_d^2}, \quad (5)$$

式中: (ξ_u, η_u) 和 (ξ_d, η_d) 分别为未畸变与畸变的 hogel 图像与一个给定的光强输入的交点坐标; r_d 为畸变的直径; κ 是几何畸变因子,其正、负分别表示枕型畸变和桶形畸变。通过峰值信噪比与结构相似性两个指标对数值重建图像质量进行评价,如图 12 所示。经实验证明,在各种情况下,当物镜造成的畸变不严重时,算法可以得到高质量的再现像。

人像打印等方面得到广泛应用,并且通过使用全息光学元件以及凸抛物透镜,全息视图可以具有更大的观察范围;随着新的采样图像处理算法的提出,要获取高质量的全息视图只需要很少的采样数据;利用数值重构算法,可以获得全息视图再现像的数值模拟结果,并为光学实验提供参考。一系列研究成果为全息视图技术的进一步发展提供了支撑,并且,近年来国内一些研究小组在其他全息领域取得的成果也对全息视图技术的进步产生着积极的影响^[44-46]。随着对全息技术领域的不断探索,全息视图的视觉体验会进一步提高,并且制作时间会大幅减少。图像更逼真、制作更简单、成本更低廉的全息视图将得到更加广泛的应用。

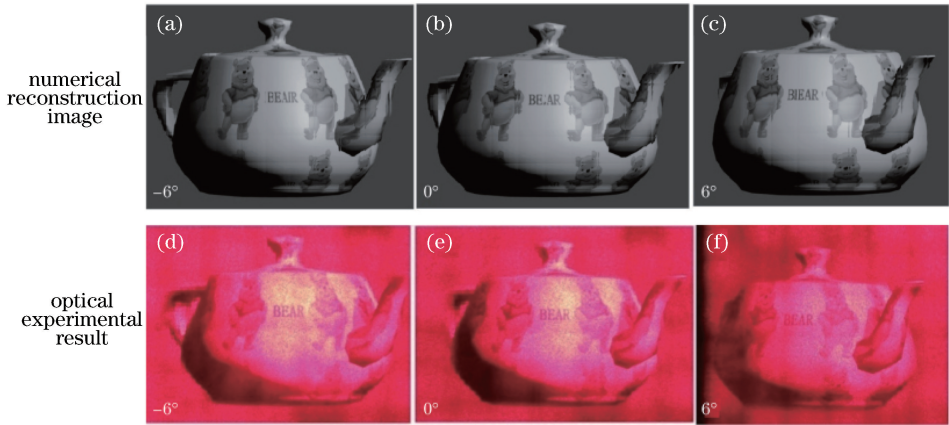


图 13 EPISM 法全息体视图的数值重构图像与光学实验结果的对比

Fig. 13 Comparison between numerical reconstruction images and optical experimental results of EPISM holographic stereogram

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] Yatagai T. Stereoscopic approach to 3-D display using computer-generated holograms [J]. *Applied Optics*, 1976, 15(11): 2722-2729.
- [4] Benton S A. Achromatic holographic stereograms (A) [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1981, 71(12): 1568.
- [5] Andrews J R. Pseudocolor transmission holographic stereograms with point white light source illumination [J]. *Applied Optics*, 1990, 29(19): 2864-2871.
- [6] Spierings W C, van Nuland E. Calculating the right perspectives for multiple photo-generated holograms [J]. *Proceedings of SPIE*, 1992, 1600: 96-108.
- [7] Spierings W C, van Nuland E. Development of an office holoprinter II [J]. *Proceedings of SPIE*, 1992, 1667: 52-62.
- [8] van Nuland E, Spierings W C. Development of an office holoprinter III [J]. *Proceedings of SPIE*, 1993, 1914: 9-14.
- [9] van Nuland E, Spierings W C. Development of an office holoprinter IV [J]. *Proceedings of SPIE*, 1994, 2176: 85-92.
- [10] van Nuland E, Spierings W C, Govers N. Development of an office holoprinter V [J]. *Proceedings of SPIE*, 1996, 2652: 62-69.
- [11] Munday R A, Robb J, Newman P R. Digital input/holographic output [J]. *Proceedings of SPIE*, 1995, 2333: 436-443.
- [12] Yamaguchi M, Ohya N, Honda T. Holographic 3-D printer [J]. *Proceedings of SPIE*, 1990, 1212: 84-92.
- [13] Yamaguchi M, Honda T, Ohya N, *et al.* Multidot recording of rainbow and multicolor holographic stereograms [J]. *Optics Communications*, 1994, 110(5/6): 523-528.
- [14] Yamaguchi M, Endoh H, Koyama T, *et al.* High-speed recording of full-parallax holographic stereograms by a parallel exposure system [J]. *Optical Engineering*, 1996, 35(6): 1556-1559.
- [15] Yamaguchi M, Sugiura H, Honda T, *et al.* Automatic recording method for holographic three-dimensional animation [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1992, 9(7): 1200-1205.
- [16] Halle M W, Benton S A, Klug M A, *et al.* Ultragram: a generalized holographic stereogram [J]. *Proceedings of SPIE*, 1991, 1461: 142-155.
- [17] Halle M W. The generalized holographic stereogram [D]. USA: Massachusetts Institute of Technology, 1991.
- [18] Klug M A, Halle M W, Hubel P M. Full-color ultragrams [J]. *Proceedings of SPIE*, 1992, 1667: 110-119.
- [19] 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.
- [20] Halle M W. Holographic stereograms as discrete imaging systems [J]. *Proceedings of SPIE*, 1994,

- 2176: 73-84.
- [21] Klug M A, Klein A, Plesniak W J, *et al.* Optics for full-parallax holographic stereograms [J]. Proceedings of SPIE, 1994, 3011: 78-88.
- [22] Klug M, Holzbach M, Ferdman A. Method and apparatus for recording one-step, full-color, full parallax, holographic stereograms: US6330088 [P/OL]. 2001-12-11 [2018-12-28]. <http://www.google.co.in/patents/US6330088>.
- [23] Halle M W, Kropp A B. Fast computer graphics rendering for full parallax spatial displays [J]. Proceedings of SPIE, 1997, 3011: 105-112.
- [24] Rodin A M, Ratcliffe D B, Rus R. Large-format automated pulsed holography camera system [J]. Proceedings of SPIE, 2001, 4415: 39-43.
- [25] Grichine M V, Rodin A M, Ratcliffe D B, *et al.* Automated system for the production of image-planed white-light-viewable holograms by pulsed laser [J]. Proceedings of SPIE, 1999, 3637: 141-147.
- [26] Rodin A M, Taylor R. Emulsions for pulsed holography: new and improved processing schemes [J]. Proceedings of SPIE, 2003, 5005: 75-85.
- [27] Brotherton-Ratcliffe D, Vergnes F M R, Rodin A, *et al.* Holographic printer: US7800803 [P/OL]. 2010-09-21 [2018-12-26]. <http://www.google.co.in/patents/US7800803>.
- [28] Rodin A, Vergnes F, Brotherton-ratcliffe D. Pulsed multiple colour laser system: US7983316 [P/OL]. 2011-07-19 [2018-12-26]. <http://www.google.co.in/patents/US7983316>.
- [29] Brotherton-Ratcliffe D, Vergnes F M R, Rodin A, *et al.* Holographic printer: US6930811 [P/OL]. 2005-08-16 [2018-12-26]. <http://www.google.co.in/patents/US6930811>.
- [30] Brotherton-Ratcliffe D, Rodin A, Hrynkiw L. Method of writing a composite 1-step hologram: US7333252 [P/OL]. 2008-02-19 [2018-12-26]. <http://www.google.co.in/patents/US7333252>.
- [31] Brotherton-Ratcliffe D, Nikolskij A, Zacharovas S, *et al.* Image capture system for a digital holographic printer: US8154584 [P/OL]. 2012-04-10 [2018-12-26]. <http://www.google.co.in/patents/US8154584>.
- [32] Bjelkhagen H, Brotherton-Ratcliffe D. Ultra-realistic imaging: advanced techniques in analogue and digital colour holography [M]. Boca Raton: CRC Press, 2013.
- [33] Brotherton-Ratcliffe D C, Zacharovas S J, Bakanas R J, *et al.* Digital holographic printing using pulsed RGB lasers [J]. Optical Engineering, 2011, 50(9): 091307.
- [34] Zacharovas S, Nikolskij A, Bakanas R, *et al.* One-step 3D full colour and achromatic transmission holograms digitally printed using a 440 nm pulsed laser for embossed applications [J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8644: 864407.
- [35] Zacharovas S, Bakanas R, Bulanovs A. New diffractive effects for security holograms produced with Geolas Originators [J]. Proceedings of SPIE, 2018, 10558: 105580E.
- [36] Zherdev A Y, Odinkov S B, Lushnikov D S, *et al.* High-aperture diffractive lens for holographic printer [J]. Proceedings of SPIE, 2016, 10022: 100220I.
- [37] Sando Y, Satoh K, Kitagawa T, *et al.* Super-wide viewing-zone holographic 3D display using a convex parabolic mirror [J]. Scientific Reports, 2018, 8: 11333.
- [38] 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.
- [39] 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.
- [40] 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.
- [41] Park J, Stoykova E, Kang H, *et al.* Numerical reconstruction of full parallax holographic stereograms [J]. 3D Research, 2012, 3(3): 6.
- [42] 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.
- [43] 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.

[44] Wu S H, Wang Z, Cao L C, *et al.* Volume holographic display technology based on angular multiplexing[J]. *Journal of Applied Optics*, 2017, 38(2): 215-220.

吴圣涵, 王靖, 曹良才, 等. 多路角度复用体全息三维显示技术[J]. *应用光学*, 2017, 38(2): 215-220.

[45] Wu Q, Wang H, Shi Y L, *et al.* Color reproduction quantitative analysis of color reflection holography [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(11):

1109001.

吴琼, 王辉, 施逸乐, 等. 彩色反射全息图颜色再现定量分析[J]. *中国激光*, 2016, 43(11): 1109001.

[46] Wang J J, Yu J, Liu H P, *et al.* Method of color holographic stereogram generation based on Fourier transformation[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(2): 0209001.

王姣姣, 于佳, 刘惠萍, 等. 基于傅里叶合成全息的彩色全息制作方法[J]. *中国激光*, 2016, 43(2): 0209001.