

全息体视图——从打印到计算(特邀)

付星^{1,2*}, 石子健^{1,2†}, 常河彬³, 柳强^{1,2}, 闫兴鹏^{3**}¹清华大学精密仪器系, 激光与光子技术研究所, 北京 100084;²时空信息精密感知技术全国重点实验室, 北京 100084;³陆军装甲兵学院信息通信系, 北京 100072

摘要 全息体视图可利用光学打印、计算机生成方法获得, 具有制作简单、视觉效果真实等特点, 有望应用在大幅面全息显示、增强现实(AR)和虚拟现实(VR)等领域中。介绍全息体视图光学打印技术的写入方法的发展和打印装置的更新, 以及计算全息体视图中计算方法的迭代和计算速度的提升, 讨论了当前面临的挑战, 并对全息体视图的未来发展进行了展望。

关键词 三维显示; 全息体视图; 打印技术; 计算方法

中图分类号 O436 文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP232267

Holographic Stereogram: from Printing to Computing (Invited)

Fu Xing^{1,2*†}, Shi Zijian^{1,2†}, Chang Hebin³, Liu Qiang^{1,2}, Yan Xingpeng^{3**}¹Institute of Laser and Photonics, Department of Precision Instrument, Tsinghua University, Beijing 100084, China;²State Key Laboratory of Precision Space-Time Information Sensing Technology, Beijing 100084, China;³Department of Information Communication, Army Academy of Armored Forces, Beijing 100072, China

Abstract Holographic stereograms can be generated through optical printing and computer-generated methods, boasting uncomplicated production and authentic visual effects, which are anticipated to find applications in extensive holographic displays, augmented reality (AR), and virtual reality (VR). This paper gives an overview of the development of printing methods and the modernization of printing devices for holographic stereogram printing, as well as the iteration of computing methods and the acceleration of computational speeds in computational holographic stereograms. Finally, existing challenges are discussed and the future development of holographic stereograms is outlined.

Key words three-dimensional display; holographic stereogram; printing technology; computational method

1 引言

全息体视图是一种融合了集成成像技术和全息技术特点的混合显示技术^[1]。该技术利用摄像机阵列拍摄或计算机图形渲染技术生成的视差图像(也称光场)序列打印或计算全息图,以光学衍射的方式再现。相比传统的光学全息术,全息体视图既能显示实际存在的物体,也能显示虚拟物体,而且制作过程相对简单。与基于物理的计算全息方法相比,全息体视图可以更好地表示遮挡、视差、纹理、阴影等三维效果^[2]。

全息体视图打印技术利用光学全息的方法将视差图像序列逐个记录在全息单元(hogel)中。全息再现时,每个 hogel 独立再现所记录的一部分波前,多个 hogel 联合再现,即可使观察者看到完整的再现光场信息。由于每个 hogel 之间互不相关,可以独立曝光每个 hogel,因而全息体视图打印技术对激光器的功率要求较低,可应用于大幅面全息图的制作中。随着计算机技术的飞速进步,计算全息体视图技术得到了蓬勃发展,其利用计算的方式重组曝光每个 hogel 上的光场信息,并利用衍射计算等方式在 hogel 上获得该信息对应的全息条纹。计

收稿日期: 2023-10-10; 修回日期: 2023-11-06; 录用日期: 2023-11-08; 网络首发日期: 2023-11-17

基金项目: 国家自然科学基金(61975087, 62375286)

通信作者: *fuxing@tsinghua.edu.cn; **yanxp02@gmail.com

† 共同第一作者

算全息体视图省略了传统的曝光过程,光场信息通过计算直接转换为 hogel 中的全息条纹分布,具有生成过程简捷、易于更新、灵活性高等特点,可集成在增强现实 (AR) 和虚拟现实 (VR) 等动态显示设备中。

全息体视图打印技术的发展方向是高效率打印出方便观察、高图像质量和大幅面的全息图。最早提出的单步法打印方法要求观察者必须位于记录介质平面处观察再现图像,远离记录介质平面会观察到畸变的再现图像,导致较差的使用体验^[1]。随后出现了一系列重组光场的打印方法,放宽了观察条件。另一方面,包含了新型光源、记录材料和抗振装置的打印系统使得高像质、大幅面全息体视图的制作流程愈发简捷和高效。对于计算全息体视图,再现三维场景的逼真程度以及角度分辨率和空间分辨率的权衡问题是国内外研究者关注的两个主要问题。此外,计算速度限制了计算全息体视图的商用化。本文一方面回顾了全息体视图打印技术的发展过程,讨论了光场采集、光学器件和打印效率方面的创新工作。另一方面,紧扣计算全息体视图的两个主要问题,梳理了该技术的发展脉络,最后介绍了无 hogel 结构的计算全息体视图创新工作。

2 全息体视图打印技术

2.1 起源和发展

1967 年, Pole^[3] 提出了全息体视图技术,该技术通过一组透镜阵列获取物体不同视角的图片,并将图片记录到全息介质上,实现了场景的三维显示,然而用于

采样的透镜阵列工艺欠佳,导致成像质量退化严重。1969 年, DeBitetto 提出了水平视差 (HPO) 全息体视图的单步曝光方法 (简称单步法), 该方法利用可移动狭缝将相机采样得到的视差图像依次写入光阑曝光区域 (即全息单元) 中, 实现了场景的三维重现^[4]。单步法较好地解决了 Pole 方法中成像质量不佳的问题, 但受到光瞳的影响, 观察再现像时人眼必须紧贴记录介质平面, 极大地限制了全息图再现观察的灵活性。1970 年, King 等^[5] 提出了全息体视图的两步转移曝光方法 (简称两步法, 如图 1 所示), 通过对单步法打印出的水平视差全息图进行翻拍, 获得了可在白光下再现的转移全息图, 此时观察平面被限定为翻拍时主全息图所在的平面, 这使得观察全息图更加便利。但是该打印过程包含两次曝光步骤, 会引入较强的散斑噪声, 从而严重降低全息图的再现质量。当主全息图幅面较大时, 对主全息图进行翻拍时需要的激光器功率较高, 限制了全息图幅面的扩大, 同时操作复杂、成本较高, 难以实现自动化。

20 世纪 80 年代, 一系列关于全息体视图打印技术的改进和优化方法被提出^[6-7]。液晶显示技术的普及使其代替传统投影屏, 成为了全息打印的主要工具; 轻薄便携的光致聚合物材料代替银盐干板, 成为了新的全息记录介质; 脉冲激光技术的应用进一步提高了打印效率; 尤其是计算机性能的显著提升, 可直接计算生成所需的曝光图像, 提高了全息体视图场景采样的灵活性。

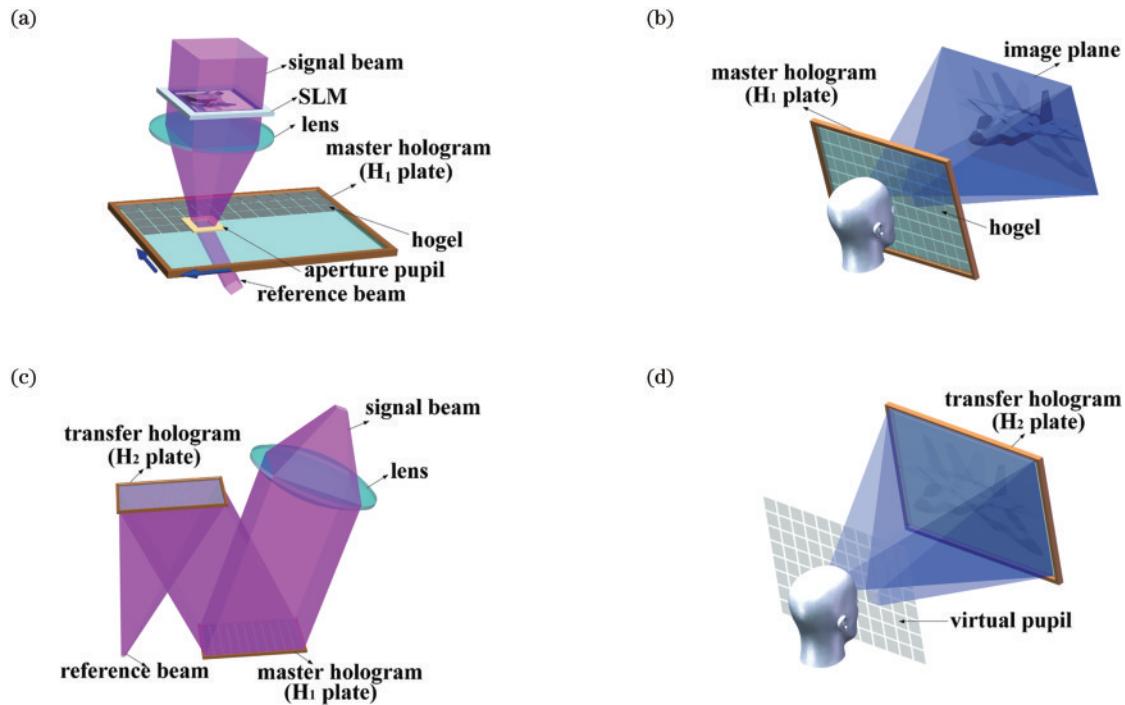


图 1 两步法的制作与再现^[8]。(a)主全息图的制作;(b)主全息图的再现;(c)由主全息图制作转移全息图;(d)转移全息图的再现
Fig. 1 Production and reconstruction of two-step method^[8]. (a) Production of master hologram; (b) reconstruction of master hologram; (c) reproduction of master hologram to transfer hologram; (d) reconstruction of transfer hologram

2.2 典型打印方法

两步法的提出为后续的全息打印改进研究提供了思路。为了获得无畸变的高质量再现像,并解决两步法“步骤多、成本高”的问题,美国麻省理工学院(MIT)的 Halle 等^[9]于 1991 年提出了称为 Ultragram 的打印技术,并基于该方法成立了 Zebra Imaging 公司。该方法的核心思想是:将相机的采样平面设置在距离全息记录平面无穷远处,从而近似认为进入全息单元的光线为平行光,此时通过对两步法的模拟,对采样图像的像素进行分割重组处理后,即可获得直接用于曝光 hogel 的编码光场信息。变换原理如图 2 所示,对三维场景进行横向 m 幅、纵向 n 幅的场景图像采样,记每幅图像像素为 $M \text{ pixel} \times N \text{ pixel}$ 。对于每幅视角图片相同位置的像素,按照相机采样顺序进行重新排列,组成新的二维图片,记录到相应的全息单元,即获得了无穷远相机法的全视差 Ultragram。上述采样过程中的场景视差图像既可以采用经过改造的“铰链剪切”式镜头相机来拍摄^[10],也可以通过计算机渲染的方式来生成。

无穷远相机法只需要一次曝光过程,而且解决了传统水平视差全息体视图的畸变问题。但理论上在观察时也要处于距离全息图足够远的位置,这种近似会引入一定误差,另外由于再现像的分辨率等于全息单元数量,所以分辨率较低。对此研究者提出了通过计算机进行预矫正的方法^[11],该方法可以解决畸变问题。

1992 年,日本东京工业大学的 Yamaguchi 等^[12]提出了 Lippmann 单步全息体视图打印技术。该方法的再现像具有水平和垂直视差,不会随观察距离的变化而发生畸变。制作过程包括点云数据的获取、曝光图像的生成和图像的打印 3 个步骤,如图 2(b)所示。首先基于光线追踪原理,以全息单元的中心为基准点,并考虑空间物点的遮挡关系,将场景的物点分别投影至液晶显示器(LCD)平面;投影直线与显示器平面的交点即为对应曝光图像的像素点,由此计算获得相应全息单元对应的曝光图像;然后将图像加载到 LCD 上,经透镜会聚后记录于全息干板,形成一个全息单元,依次记录曝光图像直至完成全部打印;全息图再现时,全息单元向外发出的光线方向与曝光图片计算生成的方向相反,从而得到无畸变的再现像。但是 Lippmann 单步法在计算生成所需曝光图像时须获取三维场景的点云数据,整体图像处理过程较为复杂。

Geola 综合光学实验室的 Brotherton-Ratcliffe 等^[13]和张腾^[14]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的打印方法,相应的直写数字全息图(DWDH)原理如图 2(c)所示。根据光线追踪原理,该方法根据在全息体视图打印系统中定义的“采样平面、相机底片平面、底片投射平面、液晶空间光调制器(SLM)平面、SLM 投射平面、记录介质平面”这 6 个平面,确定 SLM 平面和胶片平面之间精确的像素对应关系,从而获得能够直接用于曝光的图像。但是对于高分辨率图像,该方法的数据运算量

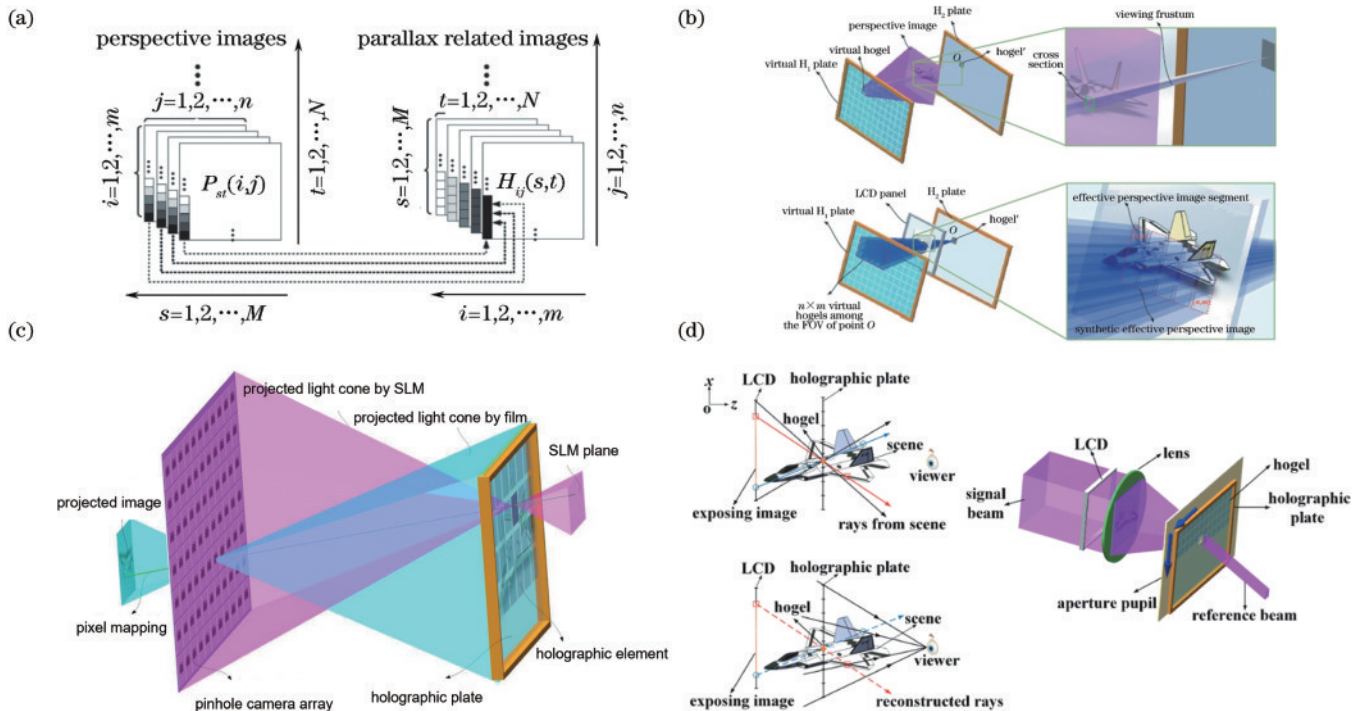


图 2 典型打印方法。(a)无穷远相机法中图像的重组方式^[8];(b)Lippmann 单步法的原理^[8];(c)DWDH 方法的原理^[14];

(d)EPISM 方法的原理^[8]

Fig. 2 Typical printing methods. (a) Reconfiguration of the image in the infinity camera method^[8]; (b) principle of Lippmann's single-step method^[8]; (c) principle of DWDH method^[14]; (d) principle of EPISM method^[8]

较大。

2017年, Su等^[15]提出了一种基于有效视角图像分割与重组 (EPISM) 的单步全息体视图打印方法。不同于传统的通过像素对应关系计算曝光图像的方法, 该方法利用两步法的基本思路和光线追踪原理, 通过对有效视角图像进行切片嵌合, 提取特定视点所能接收到的图像信息, 基本原理如图 2(d) 所示。通过模拟光线从虚拟干板 H_1 传输至干板 H_2 的过程, 可以获得位于干板 H_2 上某个全息单元中心位置 O 所观察到的再现像, 观察点 O 和虚拟干板 H_1 上的全息单元形成的视锥与 LCD 相交, 所形成的区域作为点 O 的一个有效视角图像的切片。重复以上过程, 将所有有效视角图像的切片拼接在一起, 即可获得用于打印这个全息单元

的合成有效视角图像。该技术在确保合成视差图像具有较高分辨率的前提下, 大大提高了采样图像像素的利用率, 降低了数据运算量。

2.3 打印系统的性能提升

2.3.1 光场信息的获取

为了获得用于全息打印的视差图像, 对于虚拟场景, 多使用计算机三维软件建模后再利用 3DS MAX、Blender 等软件渲染的方法; 对于真实场景, 一般使用多个真实相机组成的阵列进行单次拍摄^[16], 或者单机在特制轨道上滑动进行多次拍摄, 如图 3 所示。显然, 对真实场景的采样过程比较复杂, 存在采样数量多、效率低、故障率高的问题, 而且很难对大场景进行采样。

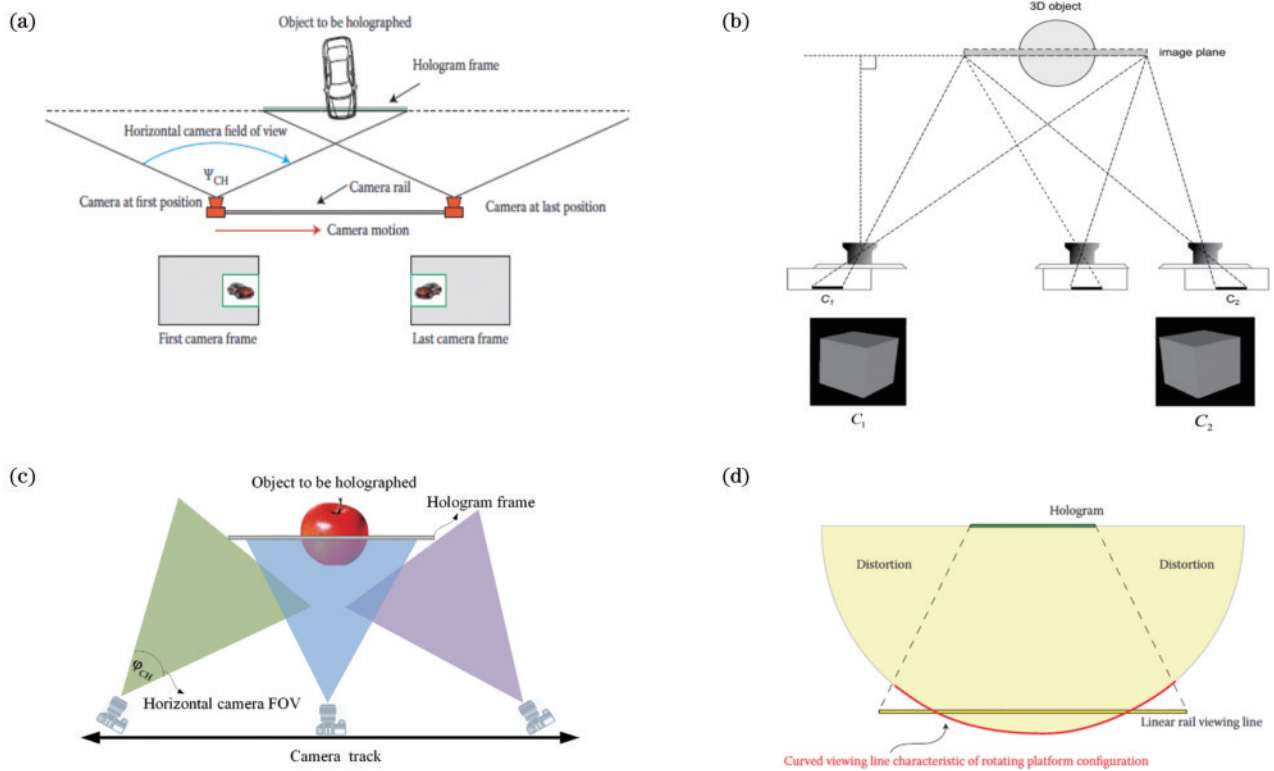


图 3 采样系统举例^[16]。(a)简单相机; (b)重定位相机; (c)混合平移/旋转相机; (d)旋转轨道相机

Fig. 3 Example of several capturing systems^[16]. (a) Simple camera; (b) re-centering camera; (c) hybrid panning/rotating camera; (d) rotating orbit camera

随着计算机性能的大幅提升, 视图合成技术^[17]开始应用于合成全息体视图的数据采集中, 该技术能够实现三维场景的任意虚拟视点的生成。Katz等^[18]使用特定卷积核生成了两幅图像对应的垂直边缘图像, 然后对虚拟视点图像进行仿射变换, 进而实现了虚拟视点图像的合成。Fan等^[19]在 EPISM 方法的基础之上分析了从目标摄像机图像到中心摄像机图像的像素映射思想, 建立了后向像素映射和前向像素映射模型, 提出了基于居中摄像机的有效透视图像分割和镶嵌 (CCEPISM) 方法, 大大减少了简单相机捕捉和采样透视图像数量造成的像素浪费。

Fachada等^[20]利用基于深度图像的渲染 (DIBR)

算法, 该算法仅须输入 4 幅 RGBD 图像 (三通道彩色图像及其对应的深度图像), 就获得了高质量的虚拟视差图像, 大大减少了实际采样量, 而且同步实现了真实场景与计算机三维模型的数据采集。Liu等^[21]为每个点引入一个光锥, 将 RGB 数据扩展为 RGB θ 数据, 为光场图像渲染提供了新自由度, 将传统 DIBR 算法的平均渲染速度提高了 168%, 并将应用扩展到了全息动态三维显示、增强现实、虚拟现实等领域。Khuderchuluun等^[22-23]基于逆向传播 (IDP) 算法和计算机生成全息图 (CGH) 过程, 直接生成用于打印的 hogel 分布。该方法采用并行计算, 而且通过 IDP 算法考虑了物体点的遮挡和调节效应, 只需很短时间就

能生成高分辨率全息图。

2.3.2 光学元器件的改进

全息体视图的打印质量受整个光学系统的影响,其中激光器和空间光调制器性能的影响尤为突出。随着脉冲激光器的输出能量、相干性、脉冲稳定性、重复频率等指标的提升,展现出了优于连续波激光器的性能。同时,脉冲激光器的光束发射时间短(一般为几十纳秒),对微小振动不敏感,曝光过程中不仅可以忽略静台时间,还可忽略环境噪声,使打印效率进一步提高。Geola 公司发展脉冲激光器应用,其在打印直写数字全息图系统中获得了良好效果。

空间光调制器是承载物光波的核心器件。相比 LCD,硅基液晶(LCOS)具有体积小、分辨率高、光利用率高和功耗低等优点。Tapsell^[24]将 LCOS 引入 DWDH 法的曝光系统中,获得了高达 92% 的填充因

子,对比 XGA1 型索尼 LCD 面板,LCOS 可产生 2000:1 的图像对比度,其色彩还原度和细节表现力更好。

近年来,多种新型光学记录介质广泛应用于全息打印系统,使得全息体视图的显示效果有了较大提升。其中光折变聚合物材料能够在光照下可逆地改变折射率,从而能动态记录全息图。而被超薄等离激元结构覆盖的表面(即超表面)已经被证明能够完全控制光的相位,代表了创新光学元件设计的新范式^[25]。光学超表面具有亚波长尺度的特征,能够解决传统全息体视图(微米级像素)存在的多级衍射和视角狭窄问题。Choi 等^[26]将光学超表面材料用于制作全息体视图,用空间傅里叶滤波器改进的 Gerchberg-Saxton(GS)算法计算微结构的相位和振幅分布,该方法为裸眼三维显示器开辟了道路,使其能够提供丰富且清晰的深度信息,显示原理如图 4 所示。

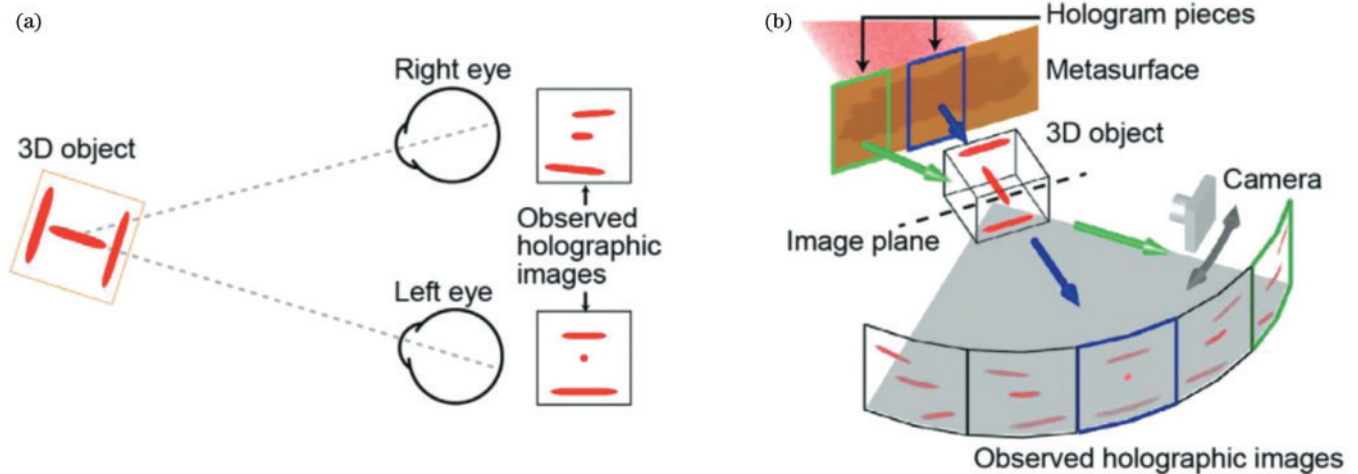


图 4 基于超表面的全息体视图^[26]。(a) 双目视差示意图;(b) 基于光学超表面的透射式全息体视图的生成示意图

Fig. 4 Metasurface holographic stereogram^[26]. (a) Schematic of binocular parallax; (b) schematic of generating transmission holographic stereogram based on optical metasurfaces

超表面紧凑高效地实现了对光场相位、振幅和偏振性能的调控,引起了极大关注。Kim 等^[27]介绍了超透镜和超全息图的可调谐超表面最新进展,以及每种工作机制的基本工作原理和优缺点,为可调谐超表面的进一步发展提供了展望。

2.3.3 打印效率的提高

全息体视图的打印效率不仅受到光学元器件性能的影响,与光路设计、抗振系统、记录介质、全息单元数量等因素也息息相关。提高打印系统的速度并降低成本,是全息体视图技术能够普及和商用的前提。Yamaguchi 等^[28]提出了平行曝光法,通过在液晶显示器上显示 4×3 的图像阵列,同时利用 4×3 凹透镜阵列中继图像信息,可将 12 幅图像同时写入对应的全息单元。Rong 等^[29]通过将图像分为三通道,然后将其加载于 SLM 进行同时曝光写入,提升了全息单元写入速度,但该方案中空间光调制器和激光器数量的增加也导致成本大幅增加。2014 年, Morozov 等^[30]具体对比

了连续打印和逐步打印这两种打印方法,并重点说明了打印速度提升的内容。

为减少使用连续激光器时环境噪声的影响, Lee 等^[31]采用单信号光束会聚模块减少了光学元件,应用具有开放式框架的光学系统并设计了一种抗振算法,可以显著减少环境噪声带来的影响,同时也减少了框架结构的振动影响。2019 年, Gentet 等^[32]设计了一种名为 CHIMERA 的第三代数字全息图打印系统,应用低功率(20 mW)RGB 连续激光器,研发了新型抗振机械系统,采用 Su 等^[15]提出的 EPISM 方法,使用 Ultimate U04 超细晶(4 nm)卤化银全息干板,实现了 50 Hz 打印速度,而且全息图的颜色再现、灰度再现效果大大得到提高。2022 年, Smyk 等^[33]提出了一种在连续曝光模式下记录介质垂直位置的合成全息体视图的方案,如图 5 所示。该方案基于红-绿-蓝 3 种颜色的联合物体通道,使用一个空间光调制器,使得系统更加紧凑,对振动和气流的抵抗力更强,为商业化应用提供了可能性。

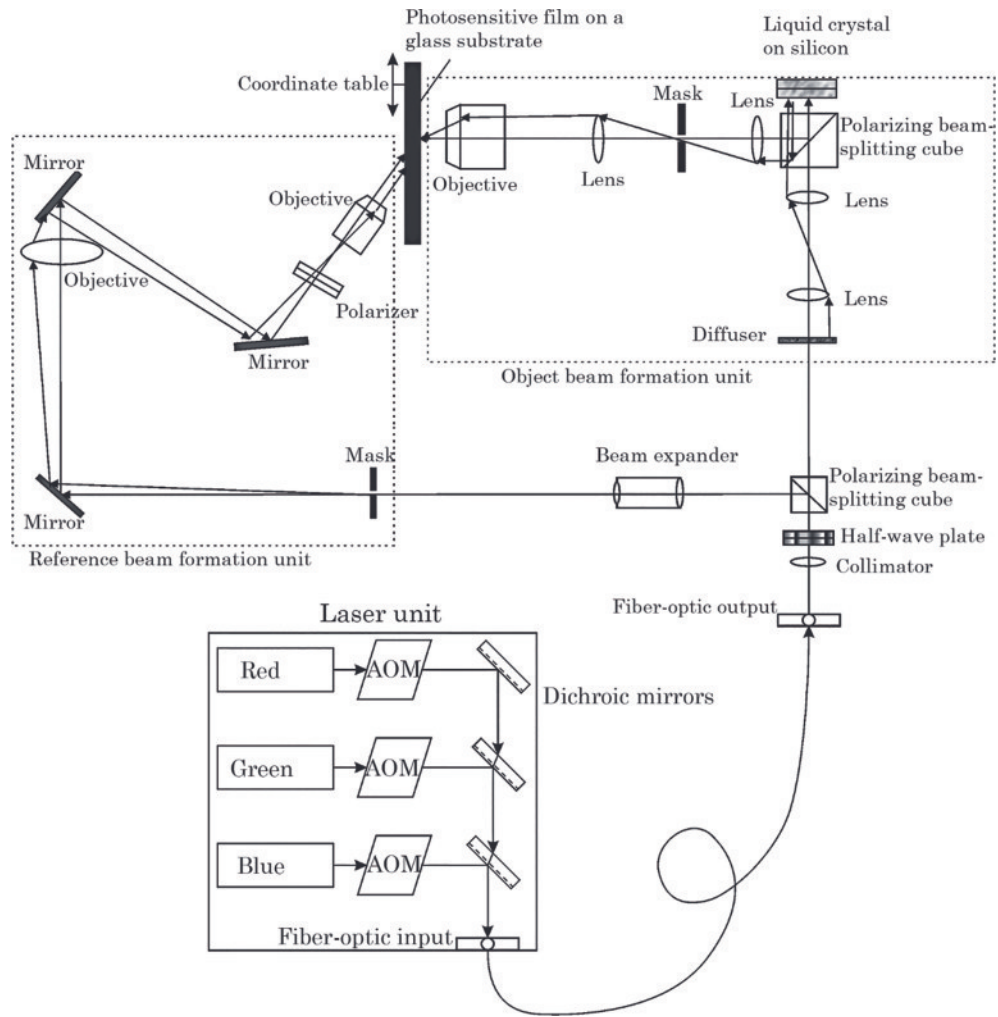


图 5 采用记录介质垂直位置顺序曝光模式记录合成全息体视图的方案^[33]

Fig. 5 System for recording synthetic holographic stereogram in the mode of sequential exposure of the vertical position of recording medium^[33]

2.3.4 显示方法的创新

为提高全息体视图的横向分辨率, Hong 等^[34]提出了全息单元交叠技术。计算机模拟分析表明, 打印全息体视图时, 减小 hogel 尺寸是有限度的, 而通过打印重叠的 hogel, 不仅可以减小 hogel 的尺寸, 还可以提高全息体视图的横向分辨率, 并使得利用体全息图的多路复用特性成为可能。2020 年 Dashdavaa 等^[35]提出了一种新颖的像素重排算法, 该算法可以在保持 hogel 尺寸恒定的同时, 提高重建图像的空间分辨率和角分辨率。Liu 等^[36]基于干涉条纹的记录机制, 研究了 hogel 空间复用对全息记录和重建的影响, 分析了空间复用模式下多次曝光对全息体视图衍射效率的影响, 提高了 EPISM 方法制作全息体视图的分辨率; 并使用空间带宽积理论, 解释了 hogel 空间复用技术可以提高全息体视图的重建分辨率, 但会降低衍射效率的原因。

为了实现全息体视图的动态更新, Tay 等^[37]提出了采用可擦除光折变聚合物材料的方法, 该材料具有高衍射效率、快速写入时间、数小时图像保持能力、快

速擦除能力以及更大显示面积的优点。该方法可每隔几分钟记录和显示新的图像, 能够连续观看几个小时而不需要刷新, 并且可以完全擦除并随时更新。

上述技术经 Blanche 等^[38]改进后, 采用角度复用技术生成彩色全息图、采用空间复用技术显示全视差图像、使用 50 Hz 纳秒脉冲激光器进行写入, 实现了每两秒刷新一次图像的全息显示, 并通过网络传输实现了 3D 临场感, 为这些技术应用于远程医疗、原型设计、广告、可更新 3D 地图和娱乐等领域提供了可能。2021 年, Blanche 等^[39]介绍了光折变材料的发展过程, 讨论了不同光折变聚合物的特点和原因, 分析了可更新 3D 显示所采取的技术选择, 并利用这种全息记录介质的独特性质, 演示了 100 hogel/s 刷新率的全彩全息图, 如图 6 所示。

彩色全息图^[40]能够再现更逼真的 3D 场景, 其颜色表征能力一直是全息打印技术的研究重点。2000 年 Lee 等^[41]开发了一种新型的点阵全息打印机, 通过更改每个光栅像素的光栅间距, 可以在每个特定的观察

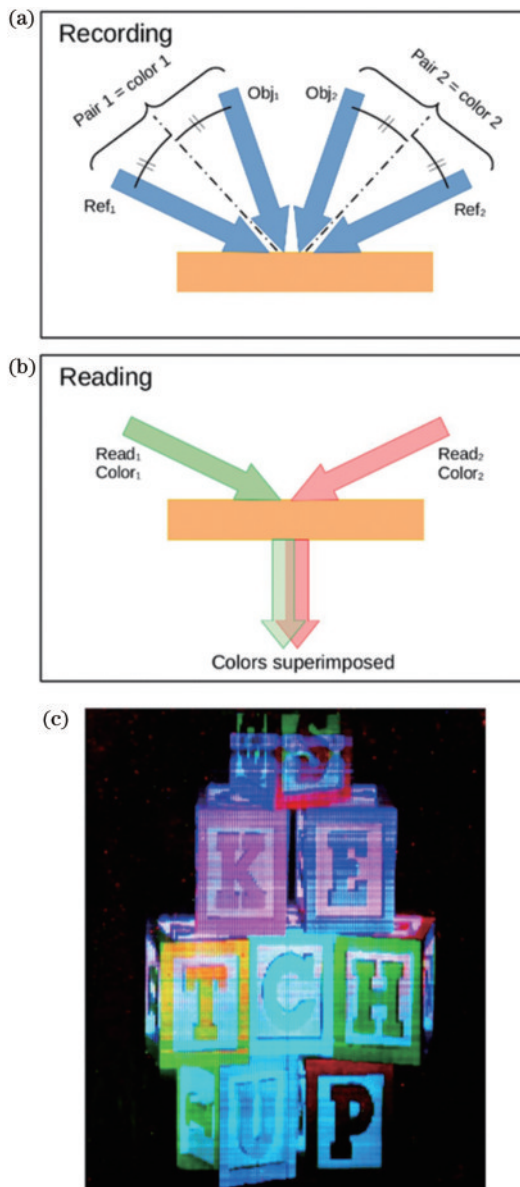


图 6 用光折变聚合物进行记录与显示^[39]。(a)记录;(b)显示;
(c)全彩色(红色、绿色、蓝色)全息体视图
Fig. 6 Recording and display with photorefractive polymers^[39].
(a) Schematic of the recording process; (b) schematic of the display procedure; (c) full-color (red, green, blue) holographic stereograms

角度应用预定的颜色,作者也分析了打印机的颜色表示范围。2012年, Yang等^[42]提出一种新的颜色管理方法,首次评估了全息体视图的颜色再现性能。2015年, Kim等^[43]详细分析了彩色全息体视图打印的多重曝光法和主颜色马赛克传递法,并提出一种基于SLM的空间划分方法,实现了彩色平滑的3D图像重建。

为了提高动态全息图的生成速度, Liu等^[44]提出了一种利用时间和透视(TP)相干性的动态全息体视图渲染技术,解决了以往全息渲染方法难以有效记录

时变三维图像的问题。与传统的串行各视点渲染(PVR)算法相比,该技术的渲染速度平均提高了378.8%,为开发用于三维显示、视觉安全和虚拟/增强现实领域的高性能动态全息体视图提供了可能。

为了将全息体视图打印技术应用于增强现实领域, Liu等^[45]提出了两种方法。一种方法是基于三维重建,首先利用VisualSFM软件生成点云数据,再利用MeshLab软件重建三维网格模型,然后将得到的真实场景与虚拟场景同时渲染,从而得到虚实融合的场景。另一种方法是基于深度图的真实场景与虚拟场景的视差图像融合算法,可在单次采样的情况下生成深度可调节的虚拟场景图像。

3 计算全息体视图

3.1 计算全息体视图的起源

1974年, Yatagai^[46]首次提出计算全息体视图方法(HS),这实际上是单步法全息体视图打印技术的计算实现。该方法的步骤:第一步,计算或拍摄一个三维场景的视差图像序列,这一步与全息体视图打印技术相同;第二步,使用计算机分别计算视差图像序列的傅里叶变换以获得频谱(获取每一幅视差图像的方向信息),这些透视投影序列的频谱作为hogel的分布,每个视差图像对应一个hogel;最后将所有hogel拼接成一个整体,并采用罗曼法^[47]将复振幅分布编码成一整幅二值全息图。视差图像转换为hogel复振幅分布的过程为

$$h(x, y)_{HS} = FT \{ \sqrt{L(x, y, u_x, u_y)} \}, \quad (1)$$

式中: $h(x, y)_{HS}$ 代表 hogel 的复振幅分布; $L(x, y, u_x, u_y)$ 代表视差图像(光场); $FT\{\cdot\}$ 代表傅里叶变换; (x, y) 是 hogel 的空间坐标; u_x 和 u_y 分别代表 x 方向和 y 方向的空间频率变量。 $L(x, y, u_x, u_y)$ 是空间频率和空间位置的函数,光场代表了空间坐标 (x, y) 位置的方向(角度)信息。式(1)表明,每个 hogel 是一幅独立的全息图,用于再现光场的方向信息。

基于光场的HS利用计算机图形学的渲染技术,可以便捷地处理遮挡剔除、着色、移动视差等一系列基于波前的计算全息方法^[48-52]不易实现的视觉效果,计算中仅使用了傅里叶变换算法,有效降低了计算量。然而,由于该方法采用傅里叶变换计算每个hogel的分布,因此观察平面需要设置于全息平面的远场区,这就造成观察的不便。此外,由于计算全息图的过程忽略了相位信息,衍射再现HS时与实际物理过程不匹配,因此距离全息图平面较远处物体的再现图像质量下降。

3.2 衍射特定方法

MIT 媒体实验室的研究人员提出了一种衍射特定的HS^[53-56],它是1991年提出的Ultragram全息体视

图打印^[8]的一种计算实现。衍射特定的 HS 与传统的 HS 类似,将全息平面分成多个 hogel,每个 hogel 同样用于再现光场的方向信息。不同点是衍射特定的 HS 使用了一种类似于查表法的计算方式:首先,使用剪切投影方法拍摄或计算三维场景的光场,其特征是三维场景始终在视差图像的中心;然后,将视差图像转换成一个衍射向量(hogel vector),它代表不同 hogel 位置的不同衍射方向的强度,每个 hogel 拥有一个独立的衍射向量,来自所有视差图像的首个像素共同组成第一个 hogel 的衍射向量,这一步也称像素重组,这与图 2 展示的重组方式相同;第三步是计算基元条纹(basic fringe),不同的基元条纹可以控制光向不同方向衍射;接下来,使用衍射向量对不同基元条纹进行调制,线性叠加为一个 hogel,如图 7 所示;最后,将所有 hogel 拼接成一个全息图。衍射特定的 HS 利用像素重组突破了观察体视图的限制,不需要将观察平面限制在远场区。此外,基元全息条纹可预先计算好,因而计算速度快。2006

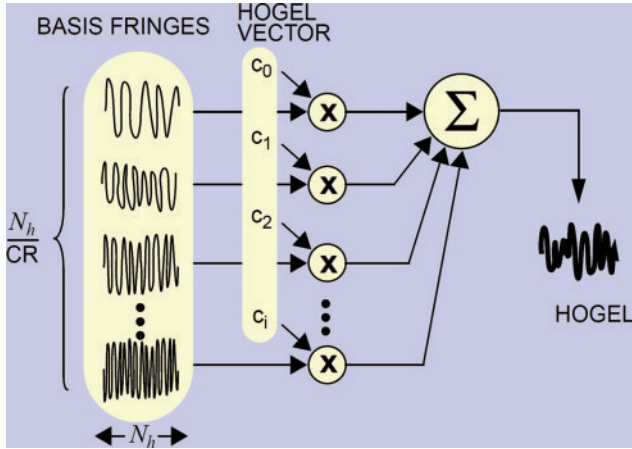


图 7 使用衍射向量和基元条纹计算 hogel^[54]

Fig. 7 Calculating hogel using diffraction vectors and basic fringes^[54]

年, Plesniak 等^[57]对衍射特定的 HS 进行改进,采用 pfring 条纹代替了传统基元条纹,允许光线的投影平面与全息图平面分离,提供了更灵活的显示结构。

3.3 相位添加方法

传统的 HS 计算过程未考虑物体的相位信息,利用不同 hogel 发出的一组不同方向的离散平面波去近似实际光场的球面波前,如图 8(a)和图 8(b)所示。这种结构不符合光学衍射再现的物理过程,导致再现图像的质量下降。1993年, Yamaguchi 等^[58]考虑到实际三维场景的深度信息,将一个与深度信息相关联的相位因子添加到每个 hogel 的计算过程中,提出了相位添加的计算全息体视图(PAS)。额外的相位因子使全息图中的 hogel 具有相关性,更好地近似实际球面波前,如图 8(c)所示,有效解决了重建图像中的分辨率降低问题。利用 PAS 方法计算 hogel 复振幅分布的过程为

$$h(x, y)_{PAS} = \text{FT} \left\{ \sqrt{L(x, y, u_x, u_y)} \exp \left[i \frac{2\pi}{\lambda} D(x, y, u_x, u_y) \right] \right\}, \quad (2)$$

式中: $D(x, y, u_x, u_y)$ 代表三维物体的深度函数。然而, PAS 没有解决 HS 中空间分辨率和角度分辨率权衡的问题^[2]。具体而言,随着 hogel 的尺寸增大,其数量会减少,导致 HS 的空间分辨率降低,但是每个 hogel 的空间频谱采样率会上升,使得 HS 的角度分辨率提升;反之, hogel 尺寸减小使得空间分辨率提高,然而频谱采样率的降低会增加每个 hogel 的计算误差。2007年, Kang 等^[59]分析了 PAS 中频谱采样率降低导致的计算误差,并提出了一种相位补偿方法,减小了 hogel 的计算误差。进一步,该课题组^[60]在 2008 年提出了准确相位添加的计算全息体视图(APAS)方法,计算时提升 hogel 尺寸,并在拼接 hogel 时将其裁剪到一个较小尺寸,其空间分辨率和角度分辨率均优于 PAS 方法。

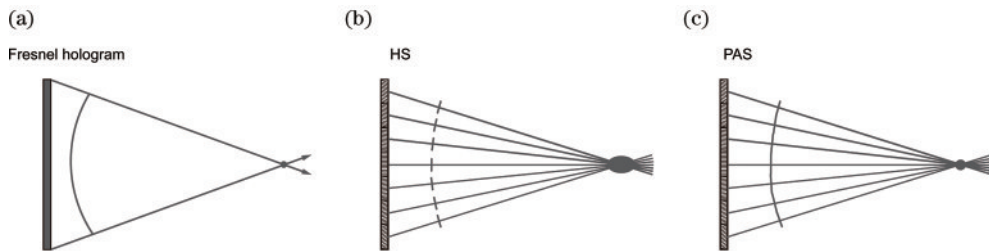


图 8 重建一个物点的示意图。(a)菲涅耳全息图;(b)HS 方法;(c)PAS 方法

Fig. 8 Schematic of reconstructing a point. (a) Fresnel hologram; (b) HS method; (c) PAS method

3.4 光线-波前转换方法

既然再现图像质量降低是基于光线的 HS 计算过程和基于衍射的全息再现过程之间的矛盾,一个解决思路是在计算时加入波的传播过程。Wakunami 等^[61]在 2011 年首次提出了光线和波前转换的计算方法,该方法在距离三维物体很近的区域放置一个虚拟的光线

采样平面,在光线采样平面上记录三维物体的光线信息,如图 9(a)所示,然后将光线采样平面上的光线信息转换为波前信息,最后通过数值模拟菲涅耳衍射传输的方式将波前信息传输到全息图平面上,如图 9(b)所示。光线和波前转换方法的基本原理是减小光线采样部分的传输距离,在需要传输的空间中采用波前方

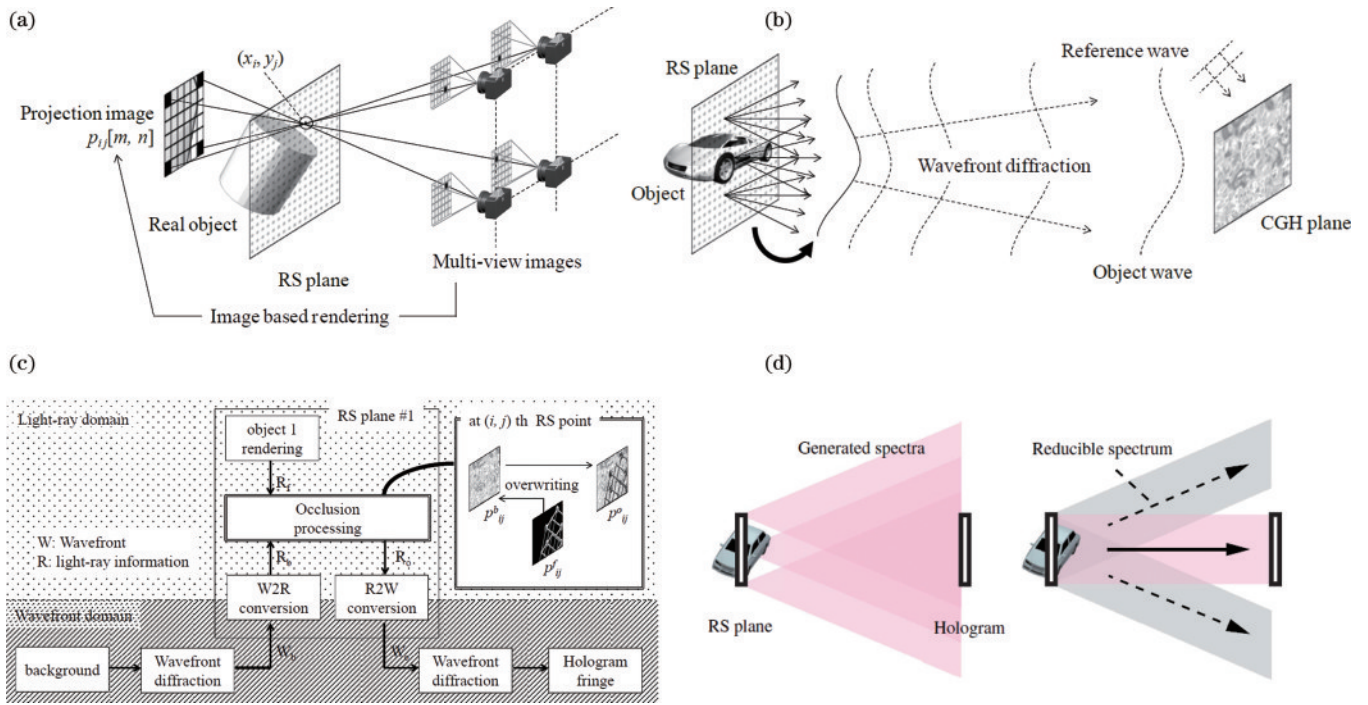


图 9 光线-波前转换方法。(a)在光线采样平面上记录三维物体的光场信息^[61]；(b)使用数值模拟菲涅耳衍射传输的方式将波前信息传输到全息图平面上^[61]；(c)考虑遮挡剔除的光线-波前转换方法的算法流程^[62]；(d)使用正交投影的光线-波前转换方法^[63]
 Fig. 9 Ray-wavefront conversion method. (a) Recording the light field of a 3D object on the ray sampling plane^[61]; (b) using numerical Fresnel diffraction to transfer wavefront to the hologram plane^[61]; (c) flowchart of the ray-wavefront conversion method considering occlusion culling^[62]; (d) orthographic ray-wavefront conversion method^[63]

法计算全息图。

作为光线和波前转换方法的拓展，Wakunami 等^[62]在 2013 年提出了考虑遮挡剔除的光线和波前转换方法，其原理流程如图 9(c)所示。第一步，在采样平面 1 记录物体的光线信息；第二步，利用数值菲涅耳衍射方式，将背景信息传输到采样平面 1 上，并将波前信息转换为光线信息；第三步，根据物体的光线信息和背景的光线信息，进行遮挡剔除处理；最后，遮挡剔除后的光线信息被转换为波前信息，并传输到全息图平面。该方法通过两次光线和波前的相互转换，非常方便地实现了多物体的遮挡剔除。2016 年，Igarashi 等^[63]在光线和波前转换方法中引入正交投影，在全息图计算过程中，预先省略对全息图平面不产生影响的无效波前，如图 9(d)所示，从而避免了传统光线和波前转换方法的计算冗余，在不牺牲全息图重建质量的情况下降低了计算量。

4 计算全息体视图的改进方法

4.1 计算全息体视图的 hogel 重叠方法

传统 HS 结构要求所有 hogel 密排在一起，它们之间互相不重叠，不留间隙，这使得 hogel 的数目和尺寸的乘积等于整幅全息图的尺寸，因此空间分辨率和角度分辨率不可兼得。如果 HS 中的每个 hogel 在尺寸

不变的情况下存在一定范围的重叠，即可在角度分辨率不变的情况下提升空间分辨率。

对于采用微透镜采集实际三维物体光场的 HS，hogel 之间缺少重叠是因为受限于光场采集的物理结构。2018 年，合肥工业大学的 Wang 等^[64]提出了基于可移动微透镜阵列的分辨率增强全息体视图，该方法使用可移动的微透镜阵列突破了物理结构的限制，使得 HS 的 hogel 可以交叠。具体步骤是：用可移动的微透镜阵列密集采样多组光场信息；对光场进行傅里叶变换，将每一组光场转换为 HS，这些 HS 之间存在相对位移，如图 10(a)所示；最后，将所有 HS 线性叠加，以合成高空间分辨率的 HS。

对于使用计算机生成三维物体的 HS，hogel 之间互相不重叠只是一种非强制的规则，因为计算全息图通常包含线性叠加运算。2019 年，Padmanaban 等^[65]提出了重叠的计算全息体视图(OLAS)，利用 hogel 重叠，使得 OLAS 同时拥有高空间分辨率和高角度分辨率的优点。OLAS 方法参考了 APAS 方法的思路，在计算 hogel 时使用较大尺寸，但是在拼接过程中不对 hogel 进行裁剪，而是允许大于目标尺寸的 hogel 进行重叠拼接，这样做的优势是不损失裁剪部分的信息。具体步骤是：首先在全息图上每个像素的空间位置对光场进行密集采样；然后利用傅里叶变换，将光场转换

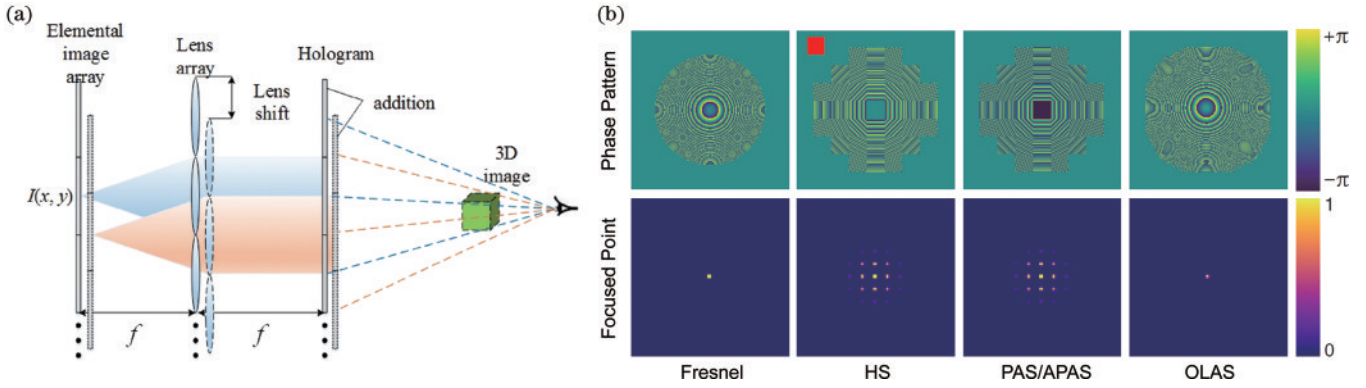


图 10 计算全息视图的 hogel 重叠方法。(a) 基于可移动微透镜阵列的分辨率增强全息视图^[64]；(b) 重叠的计算全息视图^[65]
 Fig. 10 Overlap-add hogel holographic stereogram. (a) Resolution-enhanced holographic stereogram using moving array lenslet technique^[64]; (b) overlap-add computational stereogram^[65]

为每个 hogel 的复振幅分布, 并通过一个窗口函数 $w(\cdot)$ 约束 hogel 的大小; 最后, 彼此错位仅一个像素的

hogel 线性叠加为最终的全息图。利用 OLAS 方法计算 hogel 的过程为

$$h(x, y)_{OLAS} = FT \left\{ \sqrt{L(x, y, u_x, u_y)} \exp \left[i \frac{2\pi}{\lambda} D(x, y, u_x, u_y) \right] \right\} = \iint_{-\infty}^{\infty} w(x-x', y-y') \iint_{-\infty}^{\infty} \sqrt{L(x', y', u_x, u_y)} \times \exp \left[i 2\pi (u_x x' + u_y y') + \frac{D(x', y', u_x, u_y)}{\lambda} \right] du_x du_y dx' dy', \quad (3)$$

由式(3)可以看出 OLAS 方法与 PAS 类似, 均考虑了三维物体的深度信息, 不同之处是 OLAS 方法利用窗口函数约束 hogel 的尺寸, 并允许 hogel 重叠, 因此最终结果更接近基于波前的计算全息图, 如图 10(b) 所示。

4.2 基于波前的计算全息视图

基于波前的 HS 是传统 HS 和基于波前的计算全息方法的混合方法, 这种方法采用了传统 HS 的结构, 将一幅全息图分割成多个 hogel, 在每个 hogel 位置获取光场信息和深度信息, 但是最后用数值菲涅耳衍射计算每个 hogel 的复振幅分布。因此, 基于波前的 HS 可以实现包含遮挡剔除、着色、移动视差等视觉效果的三维显示效果, 同时避免了衍射效应导致的图像质量下降, 其代价是更大的计算量。

2012 年, Ichikawa 等^[66] 提出了基于波前的点云计算全息图和 HS 相结合的方法。该方法利用光线追踪的渲染技术, 在每个 hogel 位置获取光场信息和深度信息, 然后通过为光场中的每个点作球面波前计算, 如图 11(a) 所示, 将光场和深度信息转换为每个 hogel 的复振幅分布, 最后将 hogel 拼接成一整幅全息图。全息图的重建效果如图 11(b) 所示, 表现出逼真的三维显示效果, 同时具有较高的图像质量。2015 年, 清华大学的 Zhang 等^[67] 提出完全计算的 HS。此方法与 Ichikawa 等的方法的原理类似, 在计算 hogel 的复振幅分布时都使用了点云计算全息方法, 不同之处是在获取光场信息和深度信息的过程中使用光栅化的渲染技术替代光线追踪的渲染技术, 如图 11(c) 所示, 从而更易于实现。值得一提的是, 该方法利用高分辨率衍射

光学元件演示了基于波前的 HS 极佳的三维显示效果, 如图 11(d) 所示。

2017 年, Shi 等^[68] 在球面波再现光源的条件下实现了基于波前的 HS。不同于图 11(e) 所示在平面波再现条件下获取光场信息的传统方法, 该方法在球面波再现的约束条件下渲染光场和深度信息, 提升了最终显示的视场角, 如图 11(f) 所示; 其中提出的基于图形处理器 (GPU) 的菲涅耳衍射计算框架与直接计算球面波前的框架相比, 计算 hogel 复振幅分布的速度大幅度提升。

4.3 无 hogel 结构的计算全息视图

基于 hogel 结构的传统 HS 方法需要选择一个适当的 hogel 大小, 从而不得不在空间分辨率和角度分辨率之间进行取舍。除此之外, 该方法将一整幅全息图分割成多个 hogel, 计算 HS 时需要先在不同 hogel 位置获取光场和深度信息, 独立计算每个 hogel 的复振幅分布, 最后再将它们拼接成一整幅全息图, 因而计算过程相当繁琐。

2013 年, Takaki 等^[69] 模仿传统 HS 方法和多视角集成显示的显示结构, 如图 12(a) 所示, 实现了一种无 hogel 结构的 HS。该方法中, 全息图并未在空间上得到分割, 与全息图尺寸相同的视差图像被添加一个可以会聚到不同视点的二次球面相位, 然后线性叠加以生成最终的全息图, 如图 12(b) 所示。该方法的优点是计算简便, 缺点是视差图像的空间分辨率和视点数目仍然受限于空间光调制器的分辨率。2019 年, Park 等^[70] 提出了一种利用光场数据和 Wigner 分布函数的

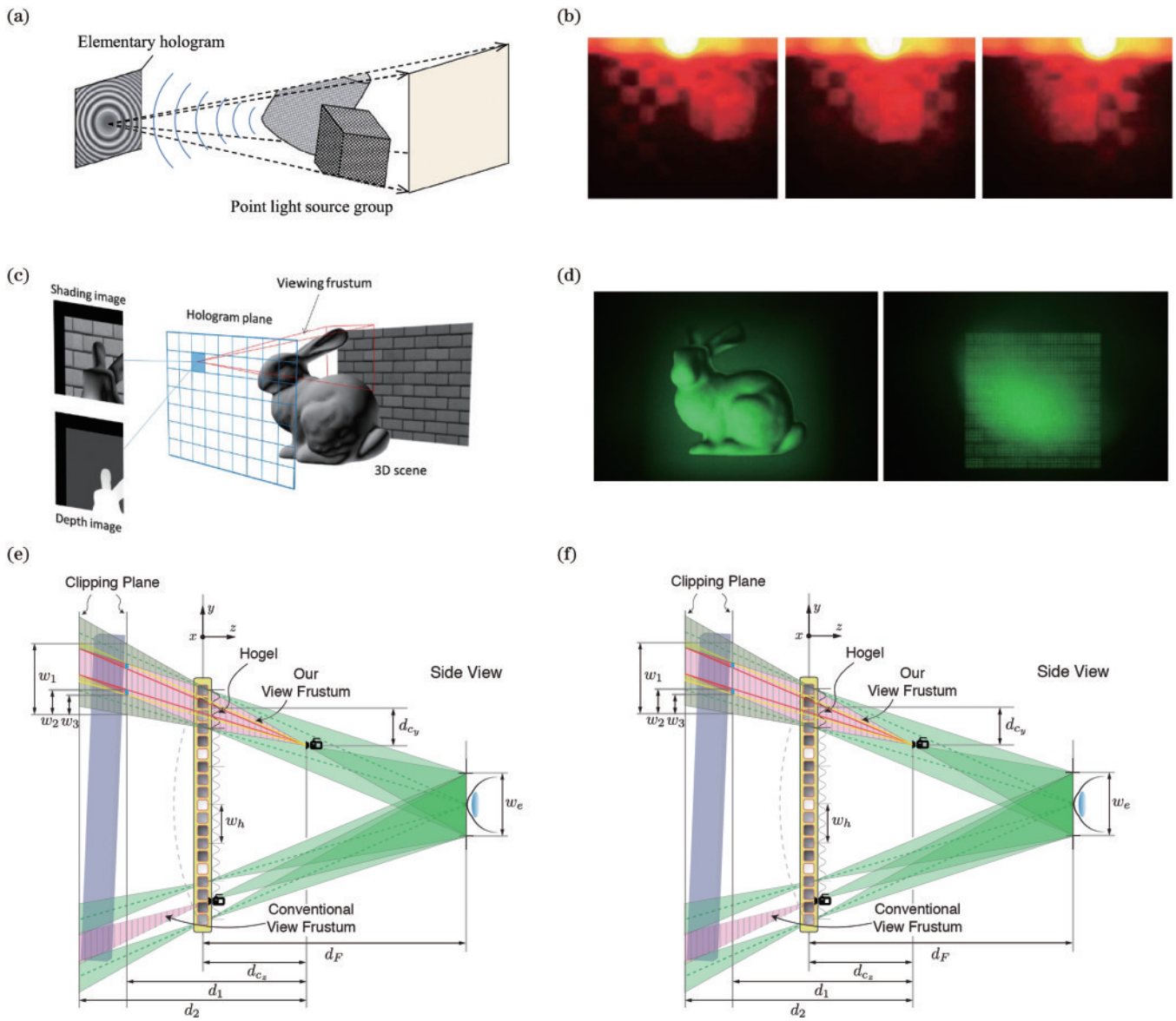


图 11 基于波前的计算全息视图。(a)光场中对每个点进行球面波计算^[66]；(b)融合了数值衍射的计算方法和光线追踪的光场渲染方法的视图重建效果^[66]；(c)使用光栅化的渲染技术获取光场^[67]；(d)高分辨率的重建效果^[67]；(e)平面波照明条件下的光场渲染^[68]；(f)球面波照明条件下的光场渲染^[68]

Fig. 11 Wavefront-based computational holographic stereogram. (a) Calculating spherical wavefront for each point in the light field^[66]; (b) viewing effects that incorporate numerical diffraction calculations and ray-tracing light-field rendering methods^[66]; (c) using rasterization rendering to obtain a light field^[67]; (d) reconstructed images of high-resolution holographic stereogram^[67]; (e) light-field rendering for plane wave illumination^[68]; (f) light-field rendering for spherical wave illumination^[68]

无 hogel 结构 HS。该方法通过全局处理光场信息来计算 HS, 如图 12(c) 所示, 解决了空间分辨率和角度分辨率无法兼顾的问题, 缺点是计算量较大, 难以实现高分辨率的全息图计算。2020 年, Park^[71] 通过独立处理光场的每个二维角频率切片, 有效减少了计算量, 报道了一种高分辨率的无 hogel 结构 HS。

Wetzstein 等^[72] 和 Wang 等^[73] 结合了压缩光场的信息形式和波的衍射传播方法, 提出了一种无 hogel 结构的 HS。这种方法首先使用优化算法将光场压缩成 3D 堆叠的层图像^[72], 然后将每一层图像用数值衍射的方法传播到全息图平面上, 再叠加成最终的全息

图, 如图 12(d) 所示, 获得了逼真的显示效果。2022 年, Choi 等^[74] 报道了基于神经网络的无 hogel 结构 HS。该方法提出了一种生成全息图的计算框架, 结合卷积神经网络(CNN)和相机校准的衍射传播模型, 以光场信息为输入生成 HS, 如图 12(e) 所示。值得一提的是, 该框架生成的全息图考虑了空间光调制器的量化参数, 很好地适用于高刷新率、量化的快速调制器件, 如基于 MEMES 的调制器和基于 DLP 的调制器。此外, 除了光场信息输入, 框架还支持 2D 和 2.5D 图像以及 3D 堆叠的层图像输入。

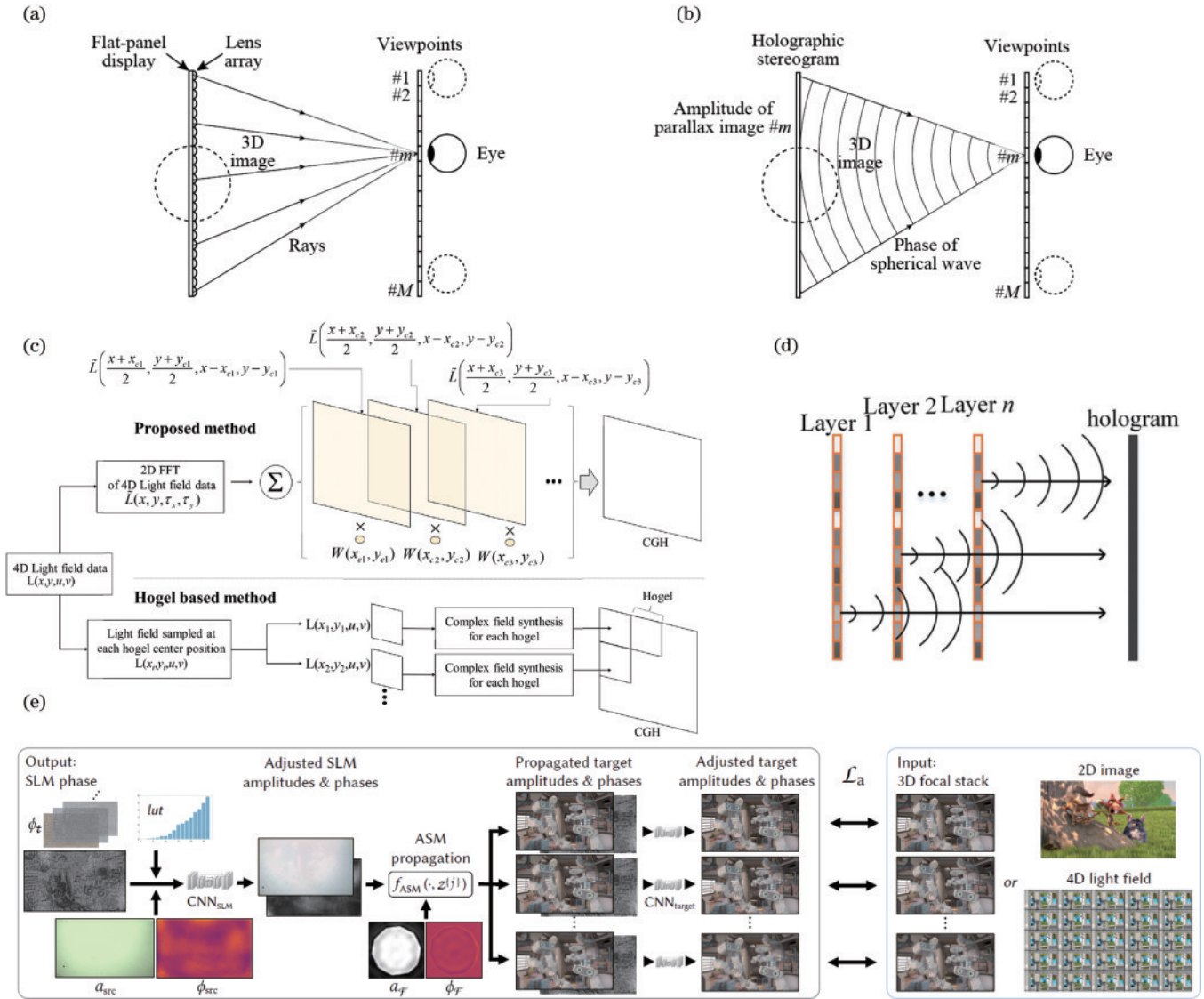


图 12 无 hogel 结构的计算全息视图。(a)传统 HS 方法和多视角集成显示的显示结构^[69]；(b)使用球面波引导光场会聚到设定的空间位置^[69]；(c)利用 Wigner 分布函数计算无 hogel 结构 HS^[70]；(d)使用 3D 堆叠的层图像计算无 hogel 结构 HS^[73]；(e)基于神经网络的无 hogel 结构 HS 的计算框架^[74]

Fig. 12 Non-hogel-based computational holographic stereogram. (a) Conventional HS method and display structure for multi-view integrated displays^[69]; (b) using spherical waves to guide the light field to converge to a specified position^[69]; (c) calculating non-hogel HS using Wigner distribution function^[70]; (d) computing non-hogel HS using 3D stacked layer images^[73]; (e) neural network-based computational framework for non-hogel HS^[74]

5 结 论

本文回顾了全息视图打印技术和计算全息视图技术的发展历程。在全息视图打印方面,主要的研究集中在提高全息图的再现质量和优化打印系统的设计上。为获得无畸变、大幅面的全息图,从传统的单步法、两步法到无穷远相机法,再到有效视角图像的分割与重组方法,采样数量大幅减少,成像质量逐步提高。为了提高打印效率,新型光学元器件、记录材料、抗振系统以及视图合成技术的应用使得在保证成像质量的基础之上进一步降低了打印成本。计算全息视图的研究目标是解决空间分辨率和角度分辨率的权衡

问题,以及实现更逼真的三维场景显示效果。针对第一个问题,陆续提出了使用 hogel 裁剪的 APAS 方法、hogel 重叠方法、无 hogel 视图方法等。解决第二个问题的主要思路是在计算时同时考虑光场和波前:在每个 hogel 的计算过程中添加相位信息,提升相邻 hogel 的相关性,使计算全息视图的显示效果逼近基于波前的计算全息图;光线-波前转换方法则是尽量避免光场信息进行衍射传输,从而提升显示效果;最直接的解决方案是将基于物理的计算全息方法与计算全息视图方法结合,同时呈现出全息视图中逼真的三维效果以及基于物理方法的计算准确度。

目前,全息视图打印技术在显示具有较大深度

范围的场景时效果不佳,这是由于曝光到 hogel 上的图像缺少代表深度的相位信息。结合计算全息体视图的思想,对曝光到 hogel 的图像添加相位信息有望解决这一问题。打印大幅面全息体视图主要有两个困难:获取大范围的真实场景需要复杂的采集系统;体视图上 hogel 数目的提升对打印系统的速度和稳定性都有较高要求。近年来快速发展的三维场景生成技术^[75]有可能解决第一个问题,该技术只需少量视差图像输入,即可完整生成三维场景,有效简化采集系统。针对第二个问题,在并行打印方法的基础上,打印速度和稳定性的提升可以通过利用高感光度材料和高性能激光器减少单个 hogel 的曝光时间实现。值得一提的是,新型材料的出现为全息体视图打印技术开辟了更多研究方向,例如:光折变材料的应用使得动态全息体视图打印技术成为可能,更快的写入和擦除速度是未来需要解决的问题;光学超表面可以为 hogel 提供深度信息,然而目前超表面的分辨率仍不如传统光致聚合物材料。制约计算全息体视图走向应用主要有两个因素:第一是动态调制器件(液晶空间光调制器和数字微镜器件)的分辨率较低、像素尺寸较大,制约了显示的视窗大小和视场角大小;第二是现有硬件无法支持高质量、实时的全息图计算^[76]。对于视场角较小的问题可以通过优化照明光源(如球面波)和添加额外的衍射光学器件解决。基于深度学习的计算全息方法有可能采用预先训练好的神经网络避免庞大的计算量。

参 考 文 献

- [1] Yamaguchi M. Light-field and holographic three-dimensional displays[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2016, 33(12): 2348-2364.
- [2] Blinder D, Bimbaum T, Ito T, et al. The state-of-the-art in computer generated holography for 3D display[J]. *Light: Advanced Manufacturing*, 2022, 3(3): 572-600.
- [3] Pole R V. 3-D imagery and holograms of objects illuminated in white light[J]. *Applied Physics Letters*, 1967, 10(1): 20-22.
- [4] Ojala T, Pietikainen M, Maenpaa T. Multiresolution gray-scale and rotation invariant texture classification with local binary patterns[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2002, 24(7): 971-987.
- [5] King M C, Noll A M, Berry D H. A new approach to computer-generated holography[J]. *Applied Optics*, 1970, 9(2): 471-475.
- [6] Benton S A, Duston-Roberge D A, Simard R. Achromatic holographic stereogram of Landsat multispectral scanner data[J]. *Optical Engineering*, 1985, 24(2): 338-340.
- [7] van Nuland E, Spierings W C, Govers N. Development of an office holoprinter V[J]. *Proceedings of SPIE*, 1996, 2652: 62-69.
- [8] 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.
- [9] Halle M W, Benton S A, Klug M A, et al. Ultragram: a generalized holographic stereogram[J]. *Proceedings of SPIE*, 1991, 1461: 142-155.
- [10] Lucente M. Diffraction-specific fringe computation for electro-holography[D]. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 1994.
- [11] 于佳. 大面积合成全息图的透视畸变及矫正方法[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2005.
Yu J. Perspective distortion of large area synthetic hologram and its correction method[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2005.
- [12] Yamaguchi M, Ohya N, Honda T. Holographic three-dimensional printer: new method[J]. *Applied Optics*, 1992, 31(2): 217-222.
- [13] Brotherton-Ratcliffe D, Rodin A, Hrynkiw L. Method of writing a composite 1-step hologram: US20050200927 [P]. 2005-09-15.
- [14] 张腾. 全视差全息体视图的光场调控特性分析和再现性能改善[D]. 北京: 陆军装甲兵学院, 2020.
Zhang T. Analysis on the manipulation performance of light field and improvement of reconstruction quality for full parallax holographic stereogram[D]. Beijing: Army Armored Forces Academy, 2020.
- [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] 樊帆, 蒋晓瑜. 全息体视图打印的三维场景采样系统综述[J]. *信息技术与信息化*, 2019(9): 13-15.
Fan F, Jiang X Y. Overview of three-dimensional scene sampling system for holographic volume view printing[J]. *Information Technology and Informatization*, 2019(9): 13-15.
- [17] Scharstein D. View synthesis using stereo vision[M]. Berlin: Springer, 2001.
- [18] Katz B, Shaked N T, Rosen J. Synthesizing computer generated holograms with reduced number of perspective projections[J]. *Optics Express*, 2007, 15(20): 13250-13255.
- [19] Fan F, Yan X P, Jiang X Y, et al. Centered-camera-based effective perspective images' segmentation and mosaicking method for full-parallax holographic stereogram printing[J]. *Applied Optics*, 2019, 58(33): 9112-9130.
- [20] Fachada S, Bonatto D, Lafruit G. High-quality holographic stereogram generation using four RGBD images[J]. *Applied Optics*, 2020, 60(4): A250-A259.
- [21] Liu X, Lou Y M, Hu J M, et al. Perspective clipping and fast rendering of light field images for holographic stereograms using RGBD data[J]. *Optics Express*, 2022, 30(21): 38194-38207.
- [22] Khuderchuluun A, Piao Y L, Erdenebat M U, et al. Simplified digital content generation based on an inverse-directed propagation algorithm for holographic stereogram printing[J]. *Applied Optics*, 2021, 60(14): 4235-4244.
- [23] Khuderchuluun A, Erdenebat M U, Amgalan T, et al.

- Digital content generation for full-color holographic stereogram printing using a single phase-only SLM[C]// Digital Holography and 3-D Imaging 2022, August 1-4, 2022, Cambridge. Washington, DC: Optica Publishing Group, 2022: W5A.47.
- [24] Tapsell J. Direct-Write Digital Holography. Development and research of a hologram printer[EB/OL]. (2009-02-03) [2023-05-06]. <https://arxiv.org/abs/0902.0551>.
- [25] Zheng G X, Mühlenbernd H, Kenney M, et al. Metasurface holograms reaching 80% efficiency[J]. Nature Nanotechnology, 2015, 10(4): 308-312.
- [26] Choi Y S, Lee S, Jung J Y, et al. Optical metasurface-based holographic stereogram[J]. Advanced Optical Materials, 2020, 8(8): 1901970.
- [27] Kim J, Seong J, Yang Y, et al. Tunable metasurfaces towards versatile metalenses and metaholograms: a review[J]. Advanced Photonics, 2022, 4(2): 024001.
- [28] 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.
- [29] Rong X W, Yu X Y, Guan C X. Multichannel holographic recording method for three-dimensional displays[J]. Applied Optics, 2011, 50(7): B77-B80.
- [30] Morozov A V, Putilin A N, Kopenkin S S, et al. 3D holographic printer: fast printing approach[J]. Optics Express, 2014, 22(3): 2193-2206.
- [31] Lee B, Kim J H, Moon K, et al. Holographic stereogram printing under the non-vibration environment [J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9117: 911704.
- [32] Gentet Y, Gentet P. CHIMERA, a new holoprinter technology combining low-power continuous lasers and fast printing[J]. Applied Optics, 2019, 58(34): G226-G230.
- [33] Smyk A F, Shurygin A V, Odinkov S B, et al. Recording of color three-dimensional holograms on photopolymer in sequential exposure mode continuous lasers[J]. Journal of Optical Technology, 2022, 89(3): 151-154.
- [34] 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.
- [35] Dashdavaa E, Khuderchuluun A, Wu H Y, et al. Efficient hogel-based hologram synthesis method for holographic stereogram printing[J]. Applied Sciences, 2020, 10(22): 8088.
- [36] Liu Y P, Zhang T, Su J, et al. Reconstruction resolution enhancement of EPISM based holographic stereogram with hogel spatial multiplexing[J]. Chinese Physics B, 2022, 31(4): 044201.
- [37] Tay S, Blanche P A, Voorakaranam R, et al. An updatable holographic three-dimensional display[J]. Nature, 2008, 451(7179): 694-698.
- [38] Blanche P A, Bablumian A, Voorakaranam R, et al. Holographic three-dimensional telepresence using large-area photorefractive polymer[J]. Nature, 2010, 468(7320): 80-83.
- [39] Blanche P A, Ka J W, Peyghambarian N. Review of organic photorefractive materials and their use for updatable 3D display[J]. Materials, 2021, 14(19): 5799.
- [40] 王迪, 侯页好, 黄倩, 等. 彩色计算全息 3D 显示技术 [J]. 中国激光, 2022, 49(19): 1909001.
Wang D, Hou Y H, Huang Q, et al. Color computer-generated holographic 3D display technology[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(19): 1909001.
- [41] Lee C K, Wu J W, Yeh S L, et al. Optical configuration and color-representation range of a variable-pitch dot matrix holographic printer[J]. Applied Optics, 2000, 39(1): 40-53.
- [42] Yang F, Murakami Y, Yamaguchi M. Digital color management in full-color holographic three-dimensional printer[J]. Applied Optics, 2012, 51(19): 4343-4352.
- [43] Kim Y, Stoykova E, Kang H, et al. Seamless full color holographic printing method based on spatial partitioning of SLM[J]. Optics Express, 2015, 23(1): 172-182.
- [44] Liu X, Lou Y M, Liu H C, et al. Dynamic holographic stereogram using temporal and perspective coherence[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2023, 169: 107733.
- [45] Liu Y P, Jing T, Lei M, et al. Depth-map-based augmented reality holographic stereogram: method and verification[J]. Optik, 2023, 276: 170643.
- [46] Yatagai T. Three-dimensional displays using computer-generated holograms[J]. Optics Communications, 1974, 12(1): 43-45.
- [47] Lohmann A W, Paris D P. Binary Fraunhofer holograms, generated by computer[J]. Applied Optics, 1967, 6(10): 1739-1748.
- [48] Maimone A, Georgiou A, Kollin J S. Holographic near-eye displays for virtual and augmented reality[J]. ACM Transactions on Graphics, 2017, 36(4): 85.
- [49] Shi L, Li B C, Kim C, et al. Towards real-time photorealistic 3D holography with deep neural networks [J]. Nature, 2021, 591(7849): 234-239.
- [50] Chang C L, Wu J, Qi Y J, et al. Simple calculation of a computer-generated hologram for lensless holographic 3D projection using a nonuniform sampled wavefront recording plane[J]. Applied Optics, 2016, 55(28): 7988-7996.
- [51] Zhao Y, Cao L C, Zhang H, et al. Accurate calculation of computer-generated holograms using angular-spectrum layer-oriented method[J]. Optics Express, 2015, 23(20): 25440-25449.
- [52] Zhang Y P, Wang F, Poon T C, et al. Fast generation of full analytical polygon-based computer-generated holograms [J]. Optics Express, 2018, 26(15): 19206-19224.
- [53] Lucente M E. Interactive computation of holograms using a look-up table[J]. Journal of Electronic Imaging, 1993, 2(1): 28-34.
- [54] Lucente M. Computational holographic bandwidth compression[J]. IBM Systems Journal, 1996, 35(3.4): 349-365.
- [55] Lucente M, Galyean T A. Rendering interactive holographic images[C]//Proceedings of the 22nd Annual

- Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, August 6-11, 1995, Los Angeles, CA, USA. New York: ACM Press, 1995: 387-394.
- [56] Lucente M E. Holographic bandwidth compression using spatial subsampling[J]. *Optical Engineering*, 1996, 35(6): 1529-1537.
- [57] Plesniak W J, Halle M W, Bove V M, Jr, et al. Reconfigurable image projection holograms[J]. *Optical Engineering*, 2006, 45(11): 115801.
- [58] Yamaguchi M, Hoshino H, Honda T, et al. Phase-added stereogram: calculation of hologram using computer graphics technique[J]. *Proceedings of SPIE*, 1993, 1914: 25-31.
- [59] Kang H, Fujii T, Yamaguchi T, et al. Compensated phase-added stereogram for real-time holographic display [J]. *Optical Engineering*, 2007, 46(9): 095802.
- [60] Kang H, Yamaguchi T, Yoshikawa H. Accurate phase-added stereogram to improve the coherent stereogram[J]. *Applied Optics*, 2008, 47(19): D44-D54.
- [61] Wakunami K, Yamaguchi M. Calculation for computer generated hologram using ray-sampling plane[J]. *Optics Express*, 2011, 19(10): 9086-9101.
- [62] Wakunami K, Yamashita H, Yamaguchi M. Occlusion culling for computer generated hologram based on ray-wavefront conversion[J]. *Optics Express*, 2013, 21(19): 21811-21822.
- [63] Igarashi S, Nakamura T, Yamaguchi M. Fast method of calculating a photorealistic hologram based on orthographic ray-wavefront conversion[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(7): 1396-1399.
- [64] Wang Z, Chen R S, Zhang X, et al. Resolution-enhanced holographic stereogram based on integral imaging using moving array lenslet technique[J]. *Applied Physics Letters*, 2018, 113(22): 221109.
- [65] Padmanaban N, Peng Y F, Wetzstein G. Holographic near-eye displays based on overlap-add stereograms[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2019, 38(6): 214.
- [66] Ichikawa T, Yamaguchi K, Sakamoto Y. Realistic expression for full-parallax computer-generated holograms with the ray-tracing method[J]. *Applied Optics*, 2012, 52(1): A201-A209.
- [67] Zhang H, Zhao Y, Cao L C, et al. Fully computed holographic stereogram based algorithm for computer-generated holograms with accurate depth cues[J]. *Optics Express*, 2015, 23(4): 3901-3913.
- [68] Shi L, Huang F C, Lopes W, et al. Near-eye light field holographic rendering with spherical waves for wide field of view interactive 3D computer graphics[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2017, 36(6): 236.
- [69] Takaki Y, Ikeda K. Simplified calculation method for computer-generated holographic stereograms from multi-view images[J]. *Optics Express*, 2013, 21(8): 9652-9663.
- [70] Park J H, Askari M. Non-hogel-based computer generated hologram from light field using complex field recovery technique from Wigner distribution function[J]. *Optics Express*, 2019, 27(3): 2562-2574.
- [71] Park J H. Efficient calculation scheme for high pixel resolution non-hogel-based computer generated hologram from light field[J]. *Optics Express*, 2020, 28(5): 6663-6683.
- [72] Wetzstein G, Lanman D, Hirsch M, et al. Tensor displays: compressive light field synthesis using multilayer displays with directional backlighting[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2012, 31(4): 80.
- [73] Wang Z, Zhu L M, Zhang X, et al. Computer-generated photorealistic hologram using ray-wavefront conversion based on the additive compressive light field approach[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(3): 615-618.
- [74] Choi S, Gopakumar M, Peng Y F, et al. Time-multiplexed neural holography: a flexible framework for holographic near-eye displays with fast heavily-quantized spatial light modulators[C]//ACM SIGGRAPH 2022 Conference Proceedings, August 7-11, 2022, Vancouver, BC, Canada. New York: ACM Press, 2022.
- [75] Mildenhall B, Srinivasan P P, Tancik M, et al. NeRF: representing scenes as neural radiance fields for view synthesis[J]. *Communications of the ACM*, 2022, 65(1): 99-106.
- [76] 刘娟, 皮大普, 王涌天. 实时全息三维显示技术研究进展[J]. *光学学报*, 2023, 43(15): 1509001.
Liu J, Pi D P, Wang Y T. Research progress of real-time holographic 3D display technology[J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(15): 1509001.