

合成全息体视图技术研究进展

刘云鹏, 刘新蕾, 王晨卿, 荆涛, 汪熙, 屈强, 蒋晓瑜, 闫兴鹏*

陆军装甲兵学院信息通信系, 北京 100072

摘要 合成全息体视图技术是三维显示领域的研究热点, 被广泛应用于军事、经济等各个行业。基于国内外合成全息体视图技术的发展现状, 综述了该技术的基本写入方法、像质提升方法以及性能改善方法。介绍了基本写入方法的发展历程及研究现状, 归纳了其实现方法, 并对现阶段几种主要方法的综合性能进行了简要评价。围绕合成全息体视图技术的成像质量与综合性能两个方面, 总结了近年来改进合成全息体视图技术的较新进展, 最后得出结论并进行了展望。

关键词 全息; 合成全息体视图; 三维显示; 研究现状

中图分类号 O438.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0200002

Research Progress of Synthetic Holographic Stereogram Technique

Liu Yunpeng, Liu Xinlei, Wang Chenqing, Jing Tao, Wang Xi, Qu Qiang,
Jiang Xiaoyu, Yan Xingpeng*

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

Abstract Synthetic holographic stereogram technology is a research hotspot in the field of three-dimensional display, which is widely used in military, economics, and other industries. Based on the development of synthetic holographic stereogram technology at home and abroad, we summarize the basic writing methods, image quality improvement methods, and performance improvement methods. We introduce the development process and research status of basic writing methods, summarize their implementation methods, and evaluate the comprehensive performance of several main methods at this stage. Focusing on the imaging quality and comprehensive performance of synthetic holographic stereogram technology, we summarize the recent progress in improving synthetic holographic stereogram technology. Finally, the conclusion and prospect are given.

Key words holography; synthetic holographic stereogram; three-dimensional display; research status

1 引 言

合成全息体视图技术是一种三维立体显示技术, 该技术结合光学全息原理^[1]与人眼的双目视差效应^[2], 用离散的波前近似复现原光场的三维信息。合成全息体视图可视为多个全息单元构成的二维阵列。全息写入时, 将带有视差信息的图像序列用光学全息的方法进行逐个曝光, 在相应的区域内形成干涉条纹, 从而形成全息单元。全息再现时, 每个全

息单元都可视为独立存在的子全息图, 它们会向空间复现出带有原图像信息的物光波前, 观察者在所有全息单元联合复现的条件下进行观察, 其双眼便可接收到带有视差的二维光场信息。人眼的双目视差效应弥补了二维图像缺失的相位信息, 也就是原光场的深度信息, 从而形成三维显示效果。

正确的写入方法是保证再现像满足人眼视觉需求的关键。1967年, Pole^[3]利用多幅二维图像制作

收稿日期: 2021-01-29; 修回日期: 2021-02-21; 录用日期: 2021-03-03

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

通信作者: *yanxp02@gmail.com

了反射式全息体视图,实现了场景的三维显示,但是由于用来采样的透镜阵列工艺欠佳,相邻透镜的间隙较大,成像质量严重退化。1969年,DeBitetto^[4]首次提出了水平视差合成全息体视图的单步曝光方法(简称单步法),他利用可水平移动的长条形光阑限制光线的传播,将采样得到的水平视差图像序列按顺序依次写入到光阑暴露出的区域(全息单元)中,实现了三维场景的再现。单步法中,相邻全息单元中的缝隙被大大减小,较好地解决了 Pole 研究中成像不佳的问题。但是,观察再现像时,人眼必须位于记录介质平面上,即紧贴全息图表面观察,当远离该位置观察时,再现像会出现透视畸变甚至消失。1970年,King 等^[5]为了在白光下复现单步法的像,提出了合成全息体视图的两步转移曝光方法(简称两步法)。在打印出水平视差全息图后,利用原参考光的共轭光照射主全息图,获得三维场景的赝实像,而后通过对赝实像进行二次翻拍,获得了可在白光下再现的转移全息图。两步法将观察平面限定在二次翻拍时的主全息图所在的平面上,使观察更加方

便;但是这种方法操作复杂,难度较大,不易实现。

合成全息体视图技术的诞生与发展为实现大幅面、广视角场景的全息三维显示提供了可行方法。国内外研究学者对该技术进行了大量有效的研究,取得了较为丰硕的成果,并已经应用于军事、经济等重要领域。

2 合成全息体视图的基本写入方法

单步法与两步法的出现为后续研究提供了可行思路,图 1 展示了单步法与两步法的实现原理。近年来,随着科技手段迎来数字化进程,计算机性能得到显著提升,高质量的空间光调制器(SLM)得到不断改进,合成全息体视图的写入方法也从光学方案的设计转变为由采样图像生成曝光图像的方法。为获得无畸变的高质量再现像,Halle^[6]使用无穷远相机对三维场景进行拍摄采样,并对两步法进行模拟,通过对采样图像的像素进行分割重组处理,获得了能够直接用于曝光的图像。该方法被多

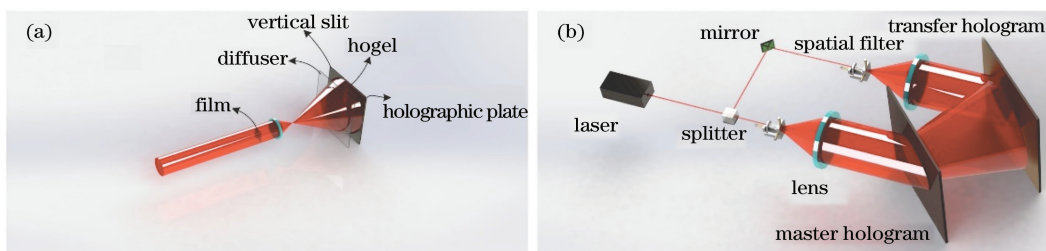


图 1 单步法与两步法实现原理。(a)单步法;(b)两步法

Fig. 1 Principles of one-step method and two-step method. (a) One-step method; (b) two-step method

次改进,并始终用于制作高质量全息体视图。中国海洋大学王金城团队结合现实条件对该方法进行了改进,实现了大幅面全息体视图的打印,其原理如图 2 所示^[7-8]。Yamaguchi 等^[9]提出 Lippmann 法,该方法加载到显示器上的图像不是由相机采样得到,而是利用计算机与图像处理技术获得。基于光线追踪原理,由物点向全息单元中心进行投影,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,进而获得了与全息单元对应的曝光图像。Bjerkhagen 等^[10]提出直写数字全息(DWDH)法,该方法考虑空间中多平面之间像素的精确对应关系,根据光线追踪原理获得了能够直接用于曝光的图像。2017年,本课题组提出了一种基于有效视差图像分割与重组(EPISM)的单步全视差全息体视图打印方法^[11],该方法根据光的传播规律和人眼的视锥效应,利用有效视角图像的分割和重组算法得到

曝光图像。

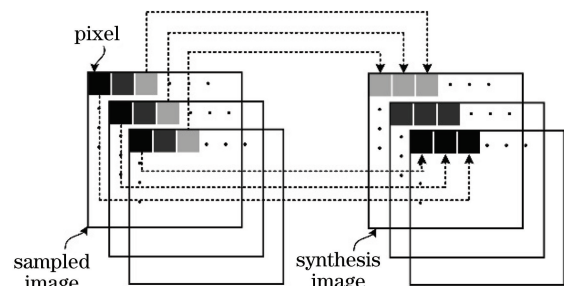


图 2 无穷远相机法图像处理示意图

Fig. 2 Image processing diagram of infinity camera method

以上几种写入方法都可实现三维场景的高质量显示,但就各个算法的原理而言,各个算法的优缺点较为明显。无穷远相机法将人眼观察位置与全息图平面分离,并实现了再现像时的无畸变显示,该方法不仅实现简单,且对于合成全息体视图的相关理论

分析而言较为重要。但是无穷远相机法的采样设定需要将相机放在足够远处,人眼观察再现像时也要距离全息图足够远,这显然是一种近似方法,因此不可避免地会出现再现误差。另外,由于再现图像的分辨率等于全息单元的数目,无穷远相机法制作的全息图的再现像分辨率并不高,特别是小幅面的全息图;Lippmann 单步全息法的制作过程中需要三维场景的点云数据,并考虑物点之间的遮挡关系,这会充分表现出原三维场景的各种细节,有利于场景的高度还原。但正因如此,该方法所需曝光图像的生成过程较为复杂;DWDH 法在获得曝光图像的过程中找到了像素与全息单元的精准对应关系,这使得再现像的表现力增强。但对于高分辨率的图像而言,其数据源计算量较大;EPISM 方法的再现像分辨率由原始视角图像的分辨率决定,并且无需考虑三维场景中物点间的遮挡关系,全息单元尺寸是任意的,与像素之间不存在匹配限制关系,因此相对于上述三种方法,EPISM 方法的再现像质量更高,运算速度更快。

3 合成全息体视图的像质提升方法

3.1 分辨率提升

合成全息体视图由全息单元对三维场景进行波前重构,全息单元的尺寸是影响再现像分辨率的重要因素。

Hong 等^[12]通过计算机仿真分析了全息单元尺寸对分辨率的影响机理,分析表明不能通过无限减小全息单元尺寸的方法提高分辨率。该课题组提出了全息单元交叠打印的方法,在打印过程中位移平台的步长小于全息单元尺寸,这可实现再现像的高分辨率显示。这种方法能够在不减小全息单元尺寸的情况下,打印出具有更高分辨率再现像的全息图。全息单元交叠打印方法的原理及效果如图 3 所示。传统方法中,全息单元尺寸与步长相同,如图 3(a)所示。交叠打印时,打印步长小于全息单元尺寸,如图 3(b)所示。通过对比图 3(c)和(d)可以发现,交叠打印得到的像更加平滑。

在合成全息体视图技术中,三维物体景深对再现像分辨率的影响被广泛研究。Dai 等^[13-16]对基于集成成像的全息体视图进行了广泛研究,先后提出了多种提高分辨率的有效方法。文献^[17]中讨论了景深对成像分辨率的影响,并将多平面技术^[18-19]用于基于集成成像的全息体视图数据源的获取,实现了不同场景深度处再现像的清晰显示。本课题组借

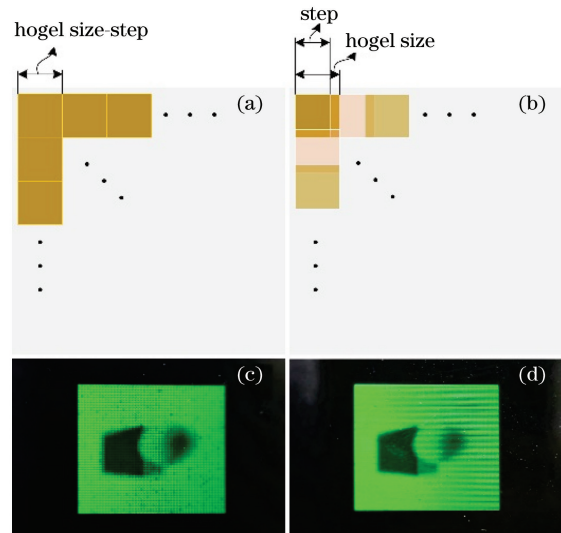


图 3 交叠法原理及效果。(a)传统打印:步长与全息单元尺寸相同;(b)交叠法打印:步长小于全息单元尺寸;(c)传统方法效果;(d)交叠法效果

Fig. 3 Principles and effects of overlapping method. (a) Conventional printing: the step is the same as the size of hogel; (b) overlapping printing: the step is smaller than the size of hogel; (c) effect of conventional method; (d) effect of overlapping method

鉴此方法,将 EPISM 全息体视图的参考平面由单个拓展到多个,用多参考平面法对三维场景进行采样,并用像素替换法对合成视差图像进行了重组,通过将得到的重组图像用于合成全息体视图的打印,可以减小 EPISM 法的再现误差,提高再现像的分辨率^[20]。图 4 为多参考平面法的采样设置以及优化效果,通过对比传统 EPISM 方法与多参考面 EPISM 方法的再现像,可以发现当光场聚焦于特定位置处时,成像更加清晰。

3.2 畸变消除

合成全息体视图的畸变问题是指在写入与再现过程中,图像与原场景的透视关系有明显偏差。

研究表明:当观察传统两步法制作的全息体视图再现像时,人眼所在位置的移动会导致图像发生畸变甚至消失,前文所述的 Halle 等^[6,21]提出的方法正是以解决透视畸变为目的。为解决大幅面全息体视图再现时的人眼移动会产生透视畸变的问题,Halle 等提出了无穷远相机法与透视分割法,其本质都是对采样图像进行分割重组,这时可以认为人眼观察的再现像是由多个像素块拼接而成的。这两种方法的原理简单,易于实现。

在全息单元写入时,曝光系统中不理想透镜的

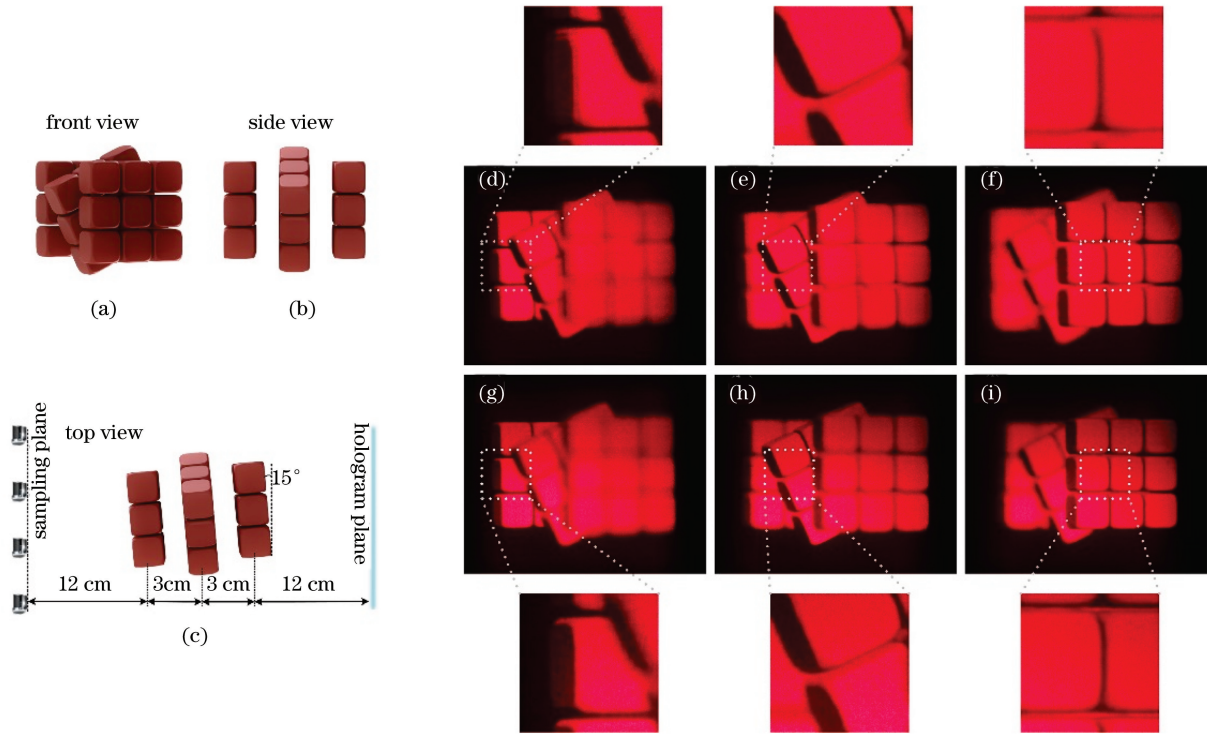


图 4 多参考平面法的采样设置及优化效果。类魔方物体的(a)正面视角图和(b)侧面视角图;(c)生成合成视差图像的几何结构;(d)~(f)传统 EPISM 方法的再现像,分别聚焦于物体后侧、中间和前侧;(g)~(i)多参考面 EPISM 方法的再现像,分别聚焦于物体后侧、中间和前侧

Fig. 4 Sampling setups and optimization effects of multi reference plane method. (a) Front view and (b) side view of magic-like object; (c) geometrical structure for generation of synthetic perspective image; (d)–(f) reconstruction images of traditional EPISM method, focused on back, middle, and front of object, respectively; (g)–(i) reconstruction images of EPISM method with multiple reference planes, focused on back, middle, and front of object, respectively

应用会导致再现像的径向畸变,影响视觉感受。Park 等^[22]对全息视差合成全息体视图进行了数值重构,并将径向畸变问题考虑在内,主动在曝光图像中加入一定的畸变因子 k ,而后用结构相似度与峰值信噪比(PSNR)两种指标,对无畸变图像的数值重构结果与带有畸变因子的数值重构结果进行了像质的对比评价。该方法能够在实施曝光前预测畸变程度,为通过图像的预处理消除畸变提供依据。图 5 展示了加入畸变因子前后的图像对比以及两种指标的评价结果。

3.3 噪声抑制

合成全息体视图的成像噪声主要来源于两方面:1)机械振动等带来的环境噪声;2)散射器导致相干光干涉的散斑噪声。

采用连续激光器作为合成全息体视图的相干光源时,即使微小的抖动也会造成干涉图案变差。为了抑制环境噪声^[23]的不良影响, Lee 等研究了在非专业光学平台环境下,连续激光器的振动噪声对全息体视图曝光的影响,通过对胶片运输平台施加反

作用力补偿,并应用振动隔离算法降低了 70% 的振动噪声,完成了全息单元尺寸为 1 mm 的合成全息体视图打印。图 6 展示了 Lee 团队制作的全息体视图打印系统。

进行合成全息体视图曝光时通常使用激光作为光源,并设置散射器将图像信息均匀地传播到全息单元内,当高度相干的激光被散射时,一部分光会在全息单元处相遇干涉,形成影响成像质量的散斑噪声^[24]。Utsugi 等^[25]分析讨论了移动散射器方法对散斑抑制的局限性,为了解决前述方法无法抑制全息图平面高频噪声的问题,提出了多次曝光法。该方法的原理是:对每一个全息单元进行多次曝光,并且每次曝光后改变散射器位置,这样,全息单元多次记录的散斑互不相关,进而使散斑噪声成倍减小。但是受记录介质灵敏度的限制,曝光次数不能无限减小,因此引入了具有随机相位序列的数字散射器,数字散射器结合多次曝光方法,可进一步减小高频散斑噪声。

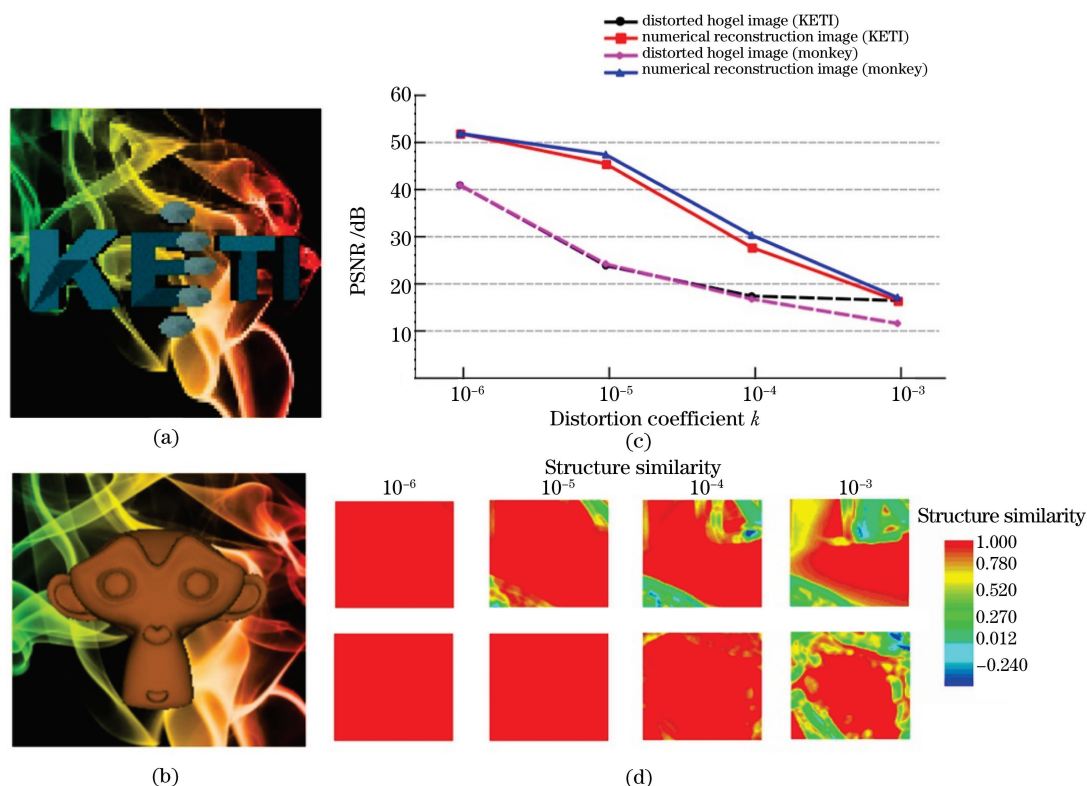


图 5 Park 等所作的工作。(a)KETI 模型;(b)猴子模型;两种模型加入畸变因子图像前后的(c)峰值信噪比和(d)结构相似度
Fig. 5 Work of Park et al. (a) KETI model; (b) monkey model; (c) PSNR and (d) structure similarity of two models before and after adding distortion factor

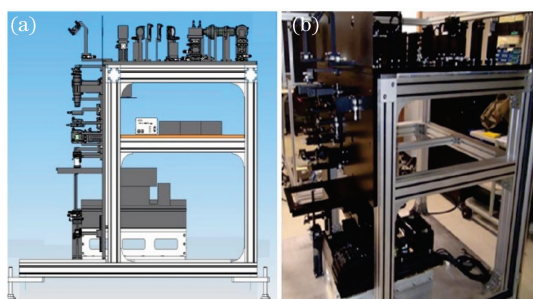


图 6 Lee 团队制作的全息体视图打印系统。
(a)原理图;(b)实物图

Fig. 6 Synthetic holographic stereogram printing system from Lee's group. (a) Schematic diagram; (b) physical diagram

4 合成全息体视图的性能改善方法

4.1 光场数据的高效采集

光场数据的采集是实现合成全息体视图显示的第一步,以全视差的光场数据采集为例,光场数据的采集多用透镜阵列或运动相机^[26-27]实现,这两种方式简单实用,可以满足小幅面场景的少量采集需求,但是不适用于对于较大幅面场景的大量数据

采集。为了解决这一问题,近年来,视图合成技术^[28]开始被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^[29]使用特定卷积核生成了两幅图像对应的垂直边缘图像,而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。这种方法有两点不足:1)不适用于复杂场景;2)只能合成已知的两视点之间的视图,不能对未采集区域进行预测生成。Gilles 等^[30]提出了一种“多视角+深度(MVD)”的场景数据获取方法,首先获取不同视角图像和相应的深度图,然后利用 MVD 数据将原三维场景重建为分层点云,进而成功渲染了新视点图像。最近,Fachada 等^[31]利用基于深度图像的渲染(DIBR)算法^[32],在只输入 4 幅 RGBD 图像(三通道彩色图像及其对应的深度图像)的条件下,获得了高质量的虚拟视点图像,这大大减少了实际采样量,并且同步实现了真实场景与计算机三维模型的数据采集,最终打印的全息图效果良好。图 7 表明该方法的图像合成效果与相应视点处的采样图像只有细微差异(图中圈出位置)。

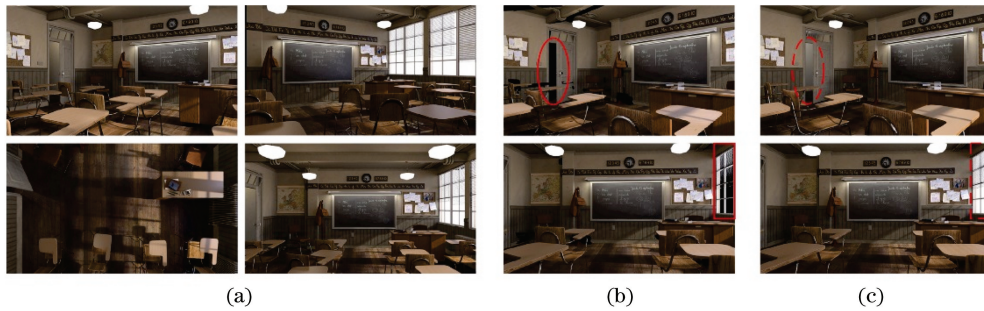


图 7 Fachada 的研究成果。(a)输入的 4 幅 RGBD 图像;(b)合成效果;(c)合成视点的原图

Fig. 7 Research achievements of Fachada. (a) Input 4 RGBD images; (b) synthetic effect; (c) original image of composite viewpoint

4.2 全息单元的快速写入

全息单元的写入速度主要由全息单元的数量、记录介质的感光灵敏度以及全息图平面光束的功率密度决定。

为了实现全视差全息体视图全息单元的高速写入, Yamaguchi 等^[33]提出了平行曝光法,通过在液晶显示器上显示 4×3 图像阵列,同时利用 4×3 凹透镜阵列中继图像信息,将 12 幅图像同时写入对应的全息单元中。Rong 等^[34]通过将图像分为三通道并将其加载在 SLM 上进行同时曝光写入,在不降低成像质量的同时,实现了全息单元的快速写入。以上两种方法并没有减少全息单元的数量,但总体写入速度得到大幅提升。Morozov 等^[35]提出了基于空间复用与时间复用的打印技术。打印 10 cm^2 的全息图时,传统方法需 250 min;采用空间复用打印技术可以在成像质量略微变差的情况下将打印时间缩短到 67 min;采用时间复用打印技术,可以在成像质量不受影响的情况下,将打印时间缩短到 32 min,从而大幅提高全息体视图的打印效率。

通常情况下,写入单幅全息单元所需要的曝光时间 t 可表示为

$$t = E / (P_o + P_r), \quad (1)$$

式中: E 表示记录介质的感光灵敏度; P_o 与 P_r 分别表示物光与参考光在全息图平面处的能量密度,两者由激光器参数、光学元件性质决定。传统散射型曝光系统的能量利用率较低(不足 1%)^[36],有团队使用折射型镜头组与衍射型全息光学元件作为曝光全息单元的关键光学元件,将光能集中到全息单元区域,从而提高了全息图平面处的能量密度,大大节省了曝光时间,提升了打印效率。Gentet 等^[37-38]使用红、绿、蓝三色的 20 mW 低功率连续激光器作为光源,新型超高灵敏度($600 \mu\text{J}/\text{cm}^2$)卤化银全息乳剂作为记录介质,结合 120° 曝光镜头实现了合成全

息体视图的真彩色高质量显示,曝光尺寸为 0.5 mm 的全息单元的打印效率可达 25 Hz。中国海洋大学王金城团队用自制全息光学元件进行了曝光系统的优化设计,得到的衍射效率可达 30%~40%,该方法用功率为 70 mW 的氦氖激光器曝光 1 mm 全息单元仅需 3 s,物参能量比接近 1:1^[39-40]。

4.3 高性能光学器件的应用

合成全息体视图的曝光打印依赖于光学系统,光学元件的使用及优化直接影响着最终的成像质量。近年来,脉冲激光器、高性能 SLM 等逐渐应用于光学系统中,并且有着较好的应用体验。

相比于连续激光器,脉冲激光器^[41]对微小的振动并不敏感,曝光过程中静台时间可忽略,其既可以提高打印效率,又可以抑制环境噪声。英国 Geola 公司的 Ratcliffe 等^[42]介绍了一种基于脉冲 RGB 激光器的数字全息打印系统,实验证明其曝光效率明显优于连续激光器且对环境噪声不敏感,该系统使商业操作切实可行。加拿大 XYZ Imaging 公司使用 Geola 公司生产的第二代脉冲 RGB 激光器打印合成全息体视图,在卤化银胶片上实现 30 个/s 的全息单元曝光速度。美国 Zebra Imaging 全息成像公司对合成全息体视图进行了商业化研究^[43],利用脉冲激光器成功制作了可凸出显示的彩色全息三维地图。图 8 展示了 XYZ Imaging 公司的数字全息打印系统和 Zebra Imaging 公司的全息三维地图。

为提高光通过透射式 SLM 后的能量利用率,同时增强其图像的表现力,反射式 SLM^[44-46]逐渐被应用于曝光系统中。Tapsell^[47]将硅基液晶(LCOS)引入 DWDH 法^[10]的曝光系统中,得到的填充因子高达 92%,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、细节表现力更好。中国海洋大学王金城团队研究了数字微反射器(DMD)在数字合成全息系统中

的光学反射衍射特性,并从微结构角度进行了细致分析^[48]。分析结果表明 DMD 的使用有利于提升曝光系统中的物光利用率,该团队后续的全息体视图打印利用 DMD 加载图像并结合自制全息光学元件^[39-40],获得了良好的再现性能。

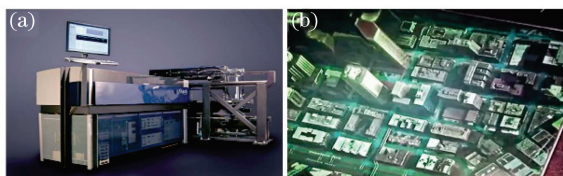


图 8 脉冲激光器应用实例。(a)XYZ Imaging 公司的数字全息打印系统;(b)Zebra Imaging 公司的全息三维地图
Fig. 8 Application examples of pulsed laser. (a) Digital holographic printing system from XYZ Imaging corporation; (b) holographic 3D map from Zebra Imaging corporation

5 结论及展望

合成全息图技术是近年来国内外三维显示领域的研究热点,大量研究在总结当前该技术存在问题的同时,提出了有效可行的解决方法。回顾了合成全息体视图的发展历程,简要介绍了合成全息体视图技术的基本写入方法,并对近年来该领域的研究现状进行了综述,相关研究成果可以应用于相关领域中。

现阶段,合成全息体视图技术仍停留在小物体或计算机三维模型的写入与再现,仍然难以做到超大幅面场景的全息显示。限制这一技术发展的原因在于针对大幅面场景的规则采样较为困难,且该技术对大型全息记录介质的显影、定影、脱水、漂白等处理也较为不便。因此,将新型技术引入合成全息体视图技术中,研究新的、更加符合实际的数据获取方法,研制干涉性能强、衍射效率高、工艺处理简单的真彩色记录介质,以提升合成全息体视图技术的综合性能将是下一步的主要发展方向。

近年来,各种科技的不断突破为合成全息体视图技术的进步提供了新思路。人工智能、深度学习、机器视觉等技术可以为合成全息体视图的数据获取提供新的方法;新材料、电子集成技术的深入研究有利于全息记录介质及光学元件的研制。不久的将来,合成全息体视图技术将在科学研究与生产生活中得到更为广泛的应用。

参 考 文 献

- [1] Gabor D. A new microscopic principle[J]. Nature, 1948, 161(4098): 777-778.
- [2] Qian N. Binocular disparity and the perception of depth[J]. Neuron, 1997, 18(3): 359-368.
- [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] DeBitetto D J. Holographic panoramic stereograms synthesized from white light recordings[J]. Applied Optics, 1969, 8(8): 1740-1741.
- [5] King M C, Noll A M, Berry D H, et al. A new approach to computer-generated holography[J]. Applied Optics, 1970, 9(2): 471-475.
- [6] Halle M W. The generalized holographic stereogram [D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 1991.
- [7] Guo C H, Yu J, Wang J C, et al. Laser direct writing of full-parallax synthetic hologram[J]. Acta Photonica Sinica, 2010, 39(3): 518-522.
郭春华, 于佳, 王金城, 等. 全视差合成全息图的激光直写拍摄[J]. 光子学报, 2010, 39(3): 518-522.
- [8] 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.
- [9] Yamaguchi M, Ohyama N, Honda T, et al. Holographic three-dimensional printer: new method [J]. Applied Optics, 1992, 31(2): 217-222.
- [10] Bjelkhagen H, Ratcliffe D B. Ultra-realistic imaging [M]. Boca Raton: CRC Press, 2016.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] Dai P, Lü G, Wang Z, et al. Resolution-enhanced holographic stereogram based on integral imaging using a moving array lenslet technique and an aperture array filter[J]. Applied Optics, 2019, 58(30): 8207-8212.
- [14] Zhang X, Lü G, Wang Z, et al. Resolution-enhanced holographic stereogram based on integral imaging

- using an intermediate-view synthesis technique [J]. Optics Communications, 2020, 457: 124656.
- [15] Dai P, Lü G, Wang Z, et al. Resolution-enhanced holographic stereogram based on integral imaging using a moving array lenslet technique and an aperture array filter [J]. Applied Optics, 2019, 58 (30): 8207-8212.
- [16] Wang Z, Lü G, Feng Q B, et al. Enhanced resolution of holographic stereograms by moving or diffusing a virtual pinhole array [J]. Optics Express, 2020, 28(15): 22755-22766.
- [17] Wang Z, Lü G Q, Feng Q B, et al. Resolution priority holographic stereogram based on integral imaging with enhanced depth range [J]. Optics Express, 2019, 27(3): 2689-2702.
- [18] Kim Y, Choi H, Kim J, et al. Depth-enhanced integral imaging display system with electrically variable image planes using polymer-dispersed liquid-crystal layers [J]. Applied Optics, 2007, 46 (18): 3766-3773.
- [19] Shen X, Wang Y J, Chen H S, et al. Extended depth-of-focus 3D micro integral imaging display using a bifocal liquid crystal lens [J]. Optics Letters, 2015, 40(4): 538-541.
- [20] Zhang T, Yan X P, Wang C Q, et al. EPISM holographic stereogram with multi-reference planes [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47 (9): 0909001.
张腾, 闫兴鹏, 王晨卿, 等. 多参考平面的 EPISM 全息体视图 [J]. 中国激光, 2020, 47(9): 0909001.
- [21] Halle M W, Benton S A, Klug M A, et al. Ultragram: a generalized holographic stereogram [J]. Proceedings of SPIE, 1991, 1461:142-155.
- [22] 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.
- [23] Wang J, Kang G, Wu A, et al. Investigation of the extraordinary null reconstruction phenomenon in polarization volume hologram [J]. Optics Express, 2016, 24(2): 1641-1647.
- [24] Mäkinen J, Sahin E, Gotchev A, et al. Speckle reduction method for image-based coherent stereogram generation [J]. Optics Express, 2018, 26 (5): 5381-5394.
- [25] Utsugi T, Yamaguchi M. Reduction of the recorded speckle noise in holographic 3D printer [J]. Optics Express, 2013, 21(1): 662-674.
- [26] Balram N. Light field imaging and display systems [C]//3D Image Acquisition and Display: Technology, Perception and Applications 2017, June 26-29, 2017, San Francisco, California United States. Washington D.C.: OSA, 2017: DTu2F.1.
- [27] Dai Q H, Suo J L, Ji X Y, et al. Computational photography: computational capture of plenoptic visual information [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2016.
戴琼海, 索津莉, 季向阳, 等. 计算摄影学: 全光视觉信息的计算采集 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2016.
- [28] Scharstein D. View synthesis using stereo vision [M]. Heidelberg: Springer, 1999.
- [29] Katz B, Shaked N T, Rosen J, et al. Synthesizing computer generated holograms with reduced number of perspective projections [J]. Optics Express, 2007, 15(20): 13250-13255.
- [30] Gilles A, Gioia P, Cozot R, et al. Computer generated hologram from multiview-plus-depth data considering specular reflections [C] // 2016 IEEE International Conference on Multimedia & Expo Workshops (ICMEW), July 11-15, 2016, Seattle, WA, USA. New York: IEEE Press, 2016: 1-6.
- [31] Fachada S, Bonatto D, Lafruit G, et al. High-quality holographic stereogram generation using four RGBD images [J]. Applied Optics, 2021, 60 (4): A250-A259.
- [32] Fehn C. Depth-image-based rendering (DIBR), compression, and transmission for a new approach on 3D-TV [J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5291: 93-104.
- [33] 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.
- [34] Rong X W, Yu X Y, Guan C X, et al. Multichannel holographic recording method for three-dimensional displays [J]. Applied Optics, 2011, 50(7): B77-B80.
- [35] 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.
- [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] 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.
- [38] Gentet P, Gentet Y, Lee S H, et al. Ultimate 04 the new reference for ultra-realistic color holography [C] // 2017 International Conference on Emerging Trends & Innovation in ICT (ICEI), February 3-5, 2017, Pune. New York: IEEE Press, 2017: 162-166.
- [39] Xiao Q J. The technique of mosaic and laser direct writing for rainbow digital stereogram [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2008: 35-37.
肖秋菊. 激光直写拼接彩虹全息图制作方法 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2008: 35-37.
- [40] Guo C H. Investigation of full-parallax holographic stereogram using the one-step laser writing method [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2010: 14-33.
郭春华. 激光直写制作全视差合成全息图的技术研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2010: 14-33.
- [41] Bakanas R, Jankauskaitė V, Bulanovs A, et al. Comparison of diffraction patterns exposed by pulsed and CW lasers on positive-tone photoresist [J]. Applied Optics, 2017, 56(8): 2241-2249.
- [42] Ratcliffe D C B, Zacharovas S J, Bakanas R J, et al. Digital holographic printing using pulsed RGB lasers [J]. Optical Engineering, 2011, 50(9): 091307.
- [43] Sánchez A M, Prieto D V. Computer graphic method for direct correspondence image acquisition used in full parallax holographic stereograms [J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9970: 99700F.
- [44] Tong Y, Pivnenko M, Chu D P, et al. Improvements of phase linearity and phase flicker of phase-only LCoS devices for holographic applications [J]. Applied Optics, 2019, 58(34): G248-G255.
- [45] Ge A M, Sui Z, Xu K S, et al. Characteristics of phase-only modulation using a reflective liquid crystal on silicon device [J]. Acta Physica Sinica, 2003, 52(10): 2481-2485.
葛爱明, 隋展, 徐克瑞, 等. 反射型 LCOS 器件纯相位调制特性的研究 [J]. 物理学报, 2003, 52(10): 2481-2485.
- [46] Su J, Yan X P, Huang Y Q, et al. Resolution matching in laser direct printing of a computer-generated hologram [J]. Journal of the Optical Society of America B, 2017, 34(5): B1-B8.
- [47] Tapsell J. Direct-write digital holography. Development and research of a hologram printer [EB/OL]. (2009-02-03) [2021-01-20]. <https://arxiv.org/abs/0902.0551>.
- [48] Guo H Q, Wang Z Q, Wang J C, et al. Research of the DMD in a digital synthetic holography system [J]. Journal of Optoelectronics·laser, 2004, 15(1): 9-12.
郭欢庆, 王肇圻, 王金城, 等. 数字合成全息系统中空间光调制器 DMD 的研究 [J]. 光电子·激光, 2004, 15(1): 9-12.