

文章编号:1001-5078(2022)06-0787-09

· 综述与评论 ·

激光全息技术在现代展览展示中的应用

刘 泉¹, 杨洪鑫¹, 林洪沂², 温志伟², 宋 硕²

(1. 厦门理工学院文化产业与旅游学院, 福建 厦门 361024; 2. 厦门理工学院光电与通信工程学院, 福建 厦门 361024)

摘要:全息技术通过精确“裁剪”光场,可以模拟具有运动视差和深度线索的真实立体场景,为观众提供裸眼立体视觉的增值体验。激光全息技术与展览展示相结合,可广泛应用于展览中心、博物馆、博览会、科技馆、图书馆、档案馆、城市规划馆等展示场所。全新的展览方式,带给观众前所未有的视觉冲击,也为会展行业开辟了新的营销思路。本文分析了交互式、全彩、宽视角等激光全息技术在展览展示中的应用,总结归纳其性能参数。在此基础上,进一步分析激光全息技术所采用的关键技术(全息技术与展览展示的结合、光源选择、散斑抑制、关键器件研发、外围环境条件等)以及未来研究和方向。

关键词:激光全息技术;展览展示;空间光调制器;互动式全息;全彩全息

中图分类号:TN 249 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2022.06.001

Application of laser holographic technology in modern exhibitions and shows

LIU Xiao¹, YANG Hong-xin¹, LIN Hong-yi², WEN Zhi-wei², SONG Shuo²

(1. School of Cultural Industries and Tourism, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China;

2. School of Optoelectronic and Communication Engineering, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China)

Abstract: Laser holographic technology can provide a 3D visual experience to multiple users without requiring special glasses. By precisely tailoring light fields, holographic technology could resemble realistic 3D scenes with motion parallax and depth cues. The combination of laser holographic technology and exhibition displays can be applied widely in exhibition centers, museums, expositions, libraries, archives centers, urban planning hall and other exhibition places. This brand-new mode of exhibition will bring an unprecedented visual impact for the audience and novel marketing ideas for the MICE industry. In this paper, the application of interactive holographic technology, color holographic technology and wide viewing angle holographic technology in exhibitions are analyzed. The performance parameters and the key technologies used in laser holography, including combination of holographic technology and exhibition, selection of light source, speckle suppression, research and development of key devices, peripheral environmental conditions, etc. are further analyzed, as well as the future research and development directions.

Keywords: laser holographic technology; exhibitions and shows; spatial light modulator; interactive holography; full color holography

基金项目:国家社会科学基金项目(No. 16CGL021);福建省自然科学基金(No. 2021J011217)资助。

作者简介:刘 泉(1982-),女,博士,副教授,硕士生导师,主要从事会展信息技术应用的研究。E-mail: xiaanneliu@163.com

通讯作者:林洪沂(1982-),男,博士,副教授,硕士生导师,主要从事激光技术的研究。E-mail: linyi0714@163.com

收稿日期:2021-08-03

1 引言

随着新兴信息技术的迅猛发展,文化和艺术的创作、生产和传播方式的不断变化,人们对视觉效果的要求越来越高。在会展行业的不断发展和转型升级过程中,基于传统声光电技术的展览展示已无法充分满足观众需求,而借助信息通信技术、光学技术、计算机技术、景观设计、艺术展示的现代展览展示得到了快速发展^[1-2]。以激光全息技术为代表的高科技展示技术逐渐在展览展示中发挥重要的作用^[3]。全息技术通过精确“裁剪”光场,实现模拟具有运动视差和深度线索的真实立体场景,为用户提供裸眼立体视觉的增值体验^[4]。借助激光全息技术,人们不仅突破了传统展览展示技术的时空局限,无需借助外部设备也能看到三维幻像,甚至还能徒手与三维图像进行互动,实现前所未有的沉浸式互动体验^[2]。

激光全息技术具有互动性、即时性、沉浸性、故事性、技术性等优势。随着半导体激光光源、计算机运算速度、储存介质、空间光调制器等器件全面升级,未来激光全息技术价格成本呈现逐步下降的趋势,全息技术在各行业的普及与应用逐渐深入。从会展行业来看,全息技术已广泛应用于文物展览、舞台表演^[5]、艺术展示、商业展览等多种展览展示场合,以及展览中心、博物馆、博览会、科技馆、图书馆、档案馆、城市规划馆等会展场馆。

2 激光全息技术的基本原理

激光全息包括记录和再现两个过程。全息记录是利用激光的干涉特性,使三维物体表面的漫反射光和参考光发生干涉现象,形成明暗相间的干涉条纹,然后储存在光敏介质(CCD 摄像机、胶片、光折变晶体^[6]、光折变聚合物^[7]、光致变色材料^[8]等)中。这样静态或动态物体的全部光信息,即振幅信息(光强和强度信息)、相位信息(即深度信息)都会被记录下来^[9]。全息再现是利用激光的衍射特性,采用一束特定的激光束照射储存介质,使其发生衍射效应,提取出振幅和相位信息,重现与原物体相同的三维图像。激光全息技术突破了传统的声光电的限制,可以形成对比度、清晰度、纵深度、临场感、立体感都很高的立体图像^[10]。

随着计算机和显示技术的发展,传统的全息记录过程可以通过计算仿真来实现,即计算全息技术。计算全息技术首先通过数值计算获得复振幅波前的

数学描述,然后将其编码成与显示介质相匹配的全息函数。在全息再现时,通过相干光照射显示介质,构建出物光信息。计算全息技术的优点有:1)简化记录过程,避免了实际的复杂的干涉过程,可以获得虚拟的干涉图像;2)摆脱传统光敏介质的限制,计算所得的数学全息图函数容易被储存、复制和传输;3)在光学处理和调控领域引入了计算和数字技术,推动了波前模式调控和全息技术的发展^[11];4)计算全息更适合与展览展示相结合,获得大视角、交互式、动态、彩色立体全息技术,提高展览展示水平。

3 现代激光全息技术

在现代会展业的发展过程中,显示技术的每一次变革和创新,都为展览展示提供了新的技术手段和表现方式。交互式、全彩、大视场等激光全息技术可以提供更为真实、震撼、自然、立体的艺术展示效果。

3.1 交互式全息技术

交互式全息技术将全息技术与手势控制技术相结合,实现了观众和立体全息图像之间的交互以及人机交互,在博物馆展品展示、商品展览、沉浸式艺术展等相关领域有广泛的应用^[12]。

以博物馆为例,博物馆中的文物年代久远,珍贵脆弱,保护性要求较高。观众们也只能在固定地点观看这些文物。部分文物由于体积或重量过大,无法移动来全方位展示。有时,受展览空间限制或场馆临时修复等影响,一些无法供观众亲临参观。因此,有必要引入多样化技术手段,增加可展出的文物种类和数量,提升文物展示效果^[13]。为了顺应这一趋势,谷歌推出了艺术与文化项目,该项目允许用户通过网络界面,轻松浏览来自 70 多个国家上千家博物馆的艺术品。此外,越来越多的知名文化遗产机构(如卢浮宫博物馆、华盛顿史密森国家自然历史博物馆、纽约大都会博物馆和那不勒斯国家考古博物馆)开始参与到数字文化遗产的管理活动中,推出基于网络的虚拟展览^[14]。2016 年 7 月,意大利学者将空间交互技术应用于博物馆展览(见图 1),通过手势动作以无接触的方式实现抓取、滑动、放大、旋转全息立体图像(见图 2),在那不勒斯国家考古博物馆举办的“Oltre il Visibile. I Campi Flegrei”文物展览中具体实践应用,引起强烈反响^[15]。

3.2 彩色全息技术

作为最具潜力和应用前景的真彩立体显示技术

之一,彩色全息技术为观众提供近似完美的全彩立体图像,其应用反映了激光技术发展的必然趋势。色彩是描述物体重要光学信息的一个关键参数。彩色全息技术的关键在于实现立体显示的同时,重构出与原始物体相同的彩色立体图像并呈现给观众^[16]。彩色全息技术是利用颜色(红绿蓝三基色)叠加原理,构造出相应的显示系统,并通过控制光源的强度比和空间分布,重构彩色立体图像。彩色全息的核心构件是空间光调制器,通过计算机实现对光波阵面的时间和空间上的编程调制,改变光的振幅、相位和偏振来实现全彩景物的绘制与重构(见图3)^[17]。

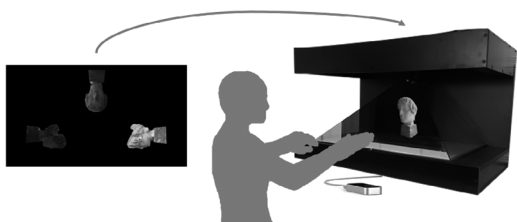


图1 交互式全息投影系统的主要组成部分^[15]

Fig.1 The main components of of interactive holographic system^[15]

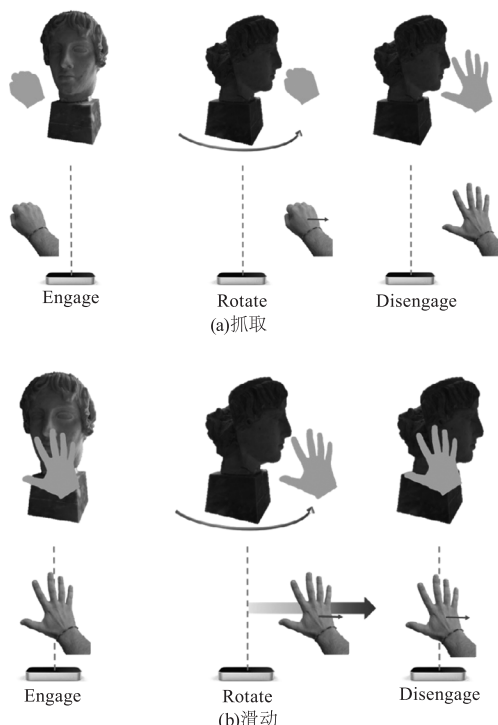


图2 交互式全息旋转技术滑动^[15]

Fig.2 The rotation techniques of interactive holographic technology^[15]

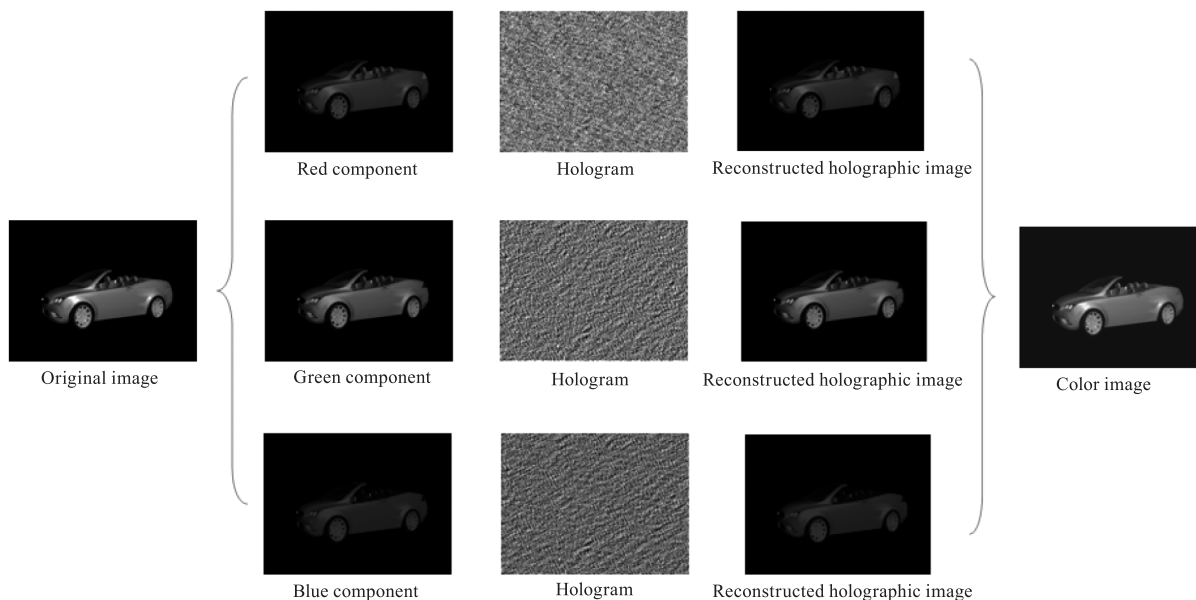


图3 基于三基色的彩色全息^[17]

Fig.3 Color holography based on three primary colors^[17]

2019年,杜克大学开发出一种新的多彩全息技术。该技术无需借助较大尺寸的光学元件,即可增强传统光学设备、智能手机、穿戴式设备的立体显示能力^[18]。研究人员采用 $300\ \mu\text{m} \times 300\ \mu\text{m}$ 二维全息波导结构的光栅波导耦合器(Grating Coupler)对图像编码,当红绿蓝三基色光照射该耦合器时,计算仿真可得到一幅全彩全息图(见图4)。此全息图可

以通过增强现实装置,直接投射到人眼瞳孔中,形成彩色立体图像。彩色全息技术的难点在于将三种颜色合成,并精确“分解”出不同颜色,近而形成全彩图像;优势是无需分束镜、棱镜等分光元件,仅利用波导耦合器件将全息系统集成到便携式设备上,为增强现实显示或其他全息显示方式提供了一种更为简单、灵活、紧凑的一种技术方案。彩色全息技术也

可以与已有的液晶显示技术进行合成,实现动态全息成像。

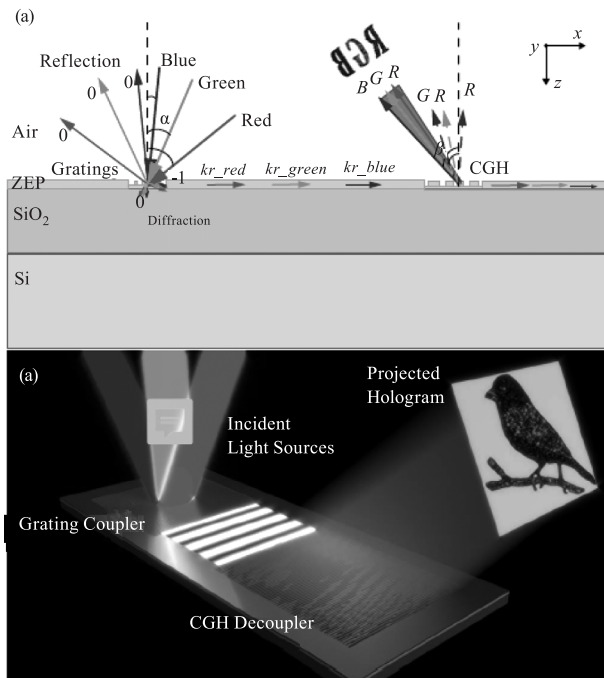


图 4 基于光栅波导耦合器的彩色全息显示系统^[18]

Fig. 4 Full-colour holography based on grating waveguide coupler^[18]

2020 年,湖南大学采用超构表面器件和单片集

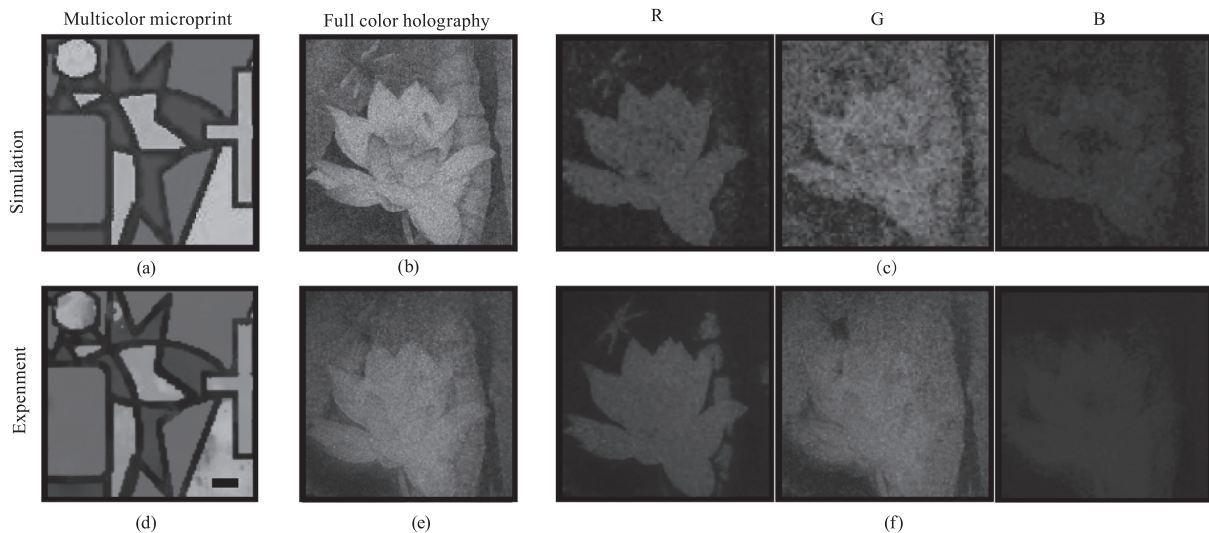


图 5 集成超表面器件全彩立体全息显示^[19]

Fig. 5 Full-colour 3D holography demonstration with 3D-integrated metasurfaces device^[19]

计算全息技术的重要指标是成像大小和视场角,由光空间调制器的阵列大小、像素和光路决定,若要获得大尺寸、大视场的图像就需要大阵列的显示设备^[21]。当入射光为 632.8 nm 时,若要获得 $30 \times 30 \times 30 \text{ cm}^3$ 、视场角水平垂直方向均为 30° 的三维图像,则像素至少为 1.2×10^{15} ,显然现阶段很难实现。目前美国 Meadowlark 公司仅能提供 $1920 \times$

成滤光微阵列实现了低串扰、大视场角、偏振不敏感的全色彩色全息(见图 5)^[19]。超构表面器件通过调整亚波长结构尺寸、形状与排列,来获得光波前的任意调控,其性能超过传统的折射元件,例如通过各向异性结构或者特定排布,平面超构器件可获得多光谱多路复用。

对于大多数全息技术来讲,相位重建不准确与视觉辐辏调节冲突,均会造成图像串扰,引起人眼视觉疲劳,这些问题是阻碍裸眼立体显示实际应用的主要障碍。针对上述问题,该团队采用变周期和变取向的超构表面光栅来调制光场相位的新技术,通过重构会聚光场视点,实现了无视觉疲劳、宽视场、全彩的三维显示。该系统简单紧凑,现已实现近动态显示(见图 6),未来将应用于展览展示及便携式电子产品、立体电视、桌面显示器等设备^[20]。

3.3 宽视角全息技术

计算全息技术发展至今,虽然取得了一定进展,但仍面临诸多挑战。如目前采用单光调制器再现全息图像的大小和视场角相对较小,在展览展示中无法满足大量观众多角度观察的需要,因此,增加视场角也是全息技术发展的重要方向之一^[21]。

1152 pixel 纯振幅、 $1920 \times 1200 \text{ pixel}$ 的纯相位液晶空间光调制器。

目前,增加视场角和再现图像大小的方法主要有:多块空间调制器拼接法^[22]、单块光调制器时分复用^[23]、时分复用和空分复用两者结合法^[24]、采用特殊光学器件法等^[26]。

2012 年,波兰学者提出了一种在水平和垂直方

向都具有扩展视角的广角全息显示系统^[25]。该显示器由分布在圆上的六个空间光调制器和一个用于时空复用的附加光调制器构成(见图7)。六个空间光调制器采用 Wigner 分布函数优化设计,呈现出最优化排布,附加空间光调制器与六个空间光调制器同步被放置在图像空间中。该系统实现了水平方向 35.22°、垂直 3.3°的大视场全息显示,数据的有效空间带宽积从 1240 万像素提高到 5000 万像素。波兰学者同时开发并实现了基于三块 Nvidia 显卡的软

件解决方案,实现了快速同步显示。当直接观察单个调制器时,观察者只能看到重建视图的一小部分,且无法看到物体的整个高度。若要看清图像的其他部分,则需要更改观察位置,如图7(b)所示。当采用无缝拼接时,六张照片用一个角步长(6°)拍摄,每一张对应于一对虚拟光调制器;这样可以增加垂直方向上的单目视场角,并在水平方向上获得较宽且连续的视角,观察者可以查看整个立体重建图像,获得轻松、舒适的观感体验,如图7(c)所示。

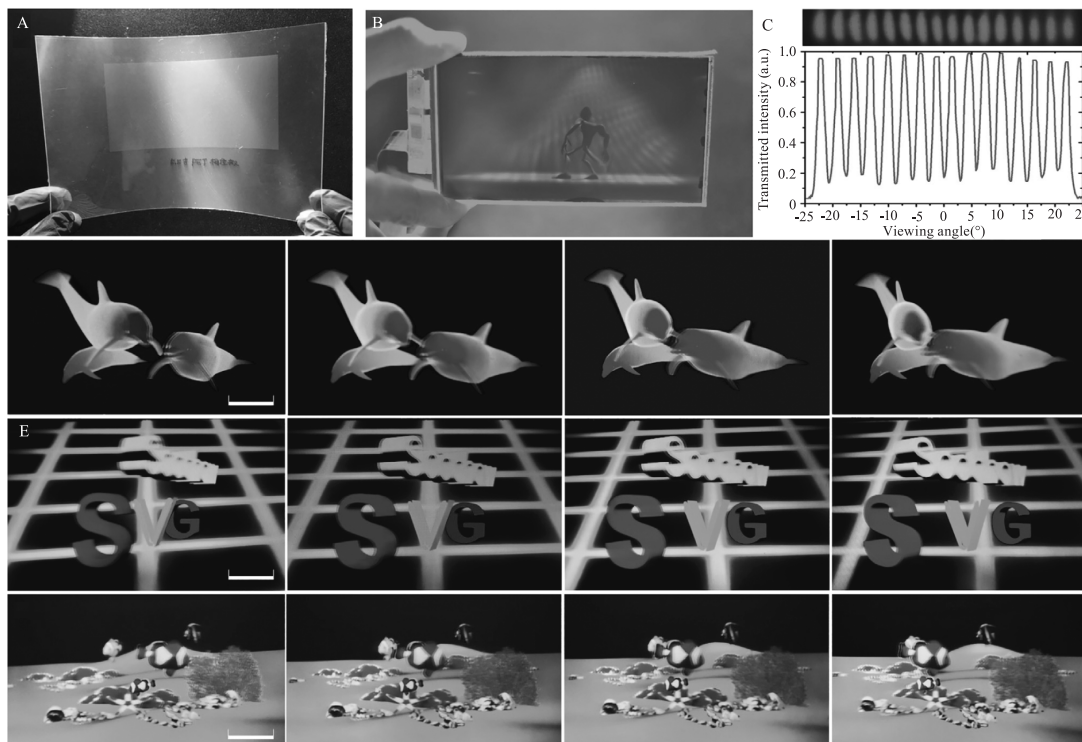
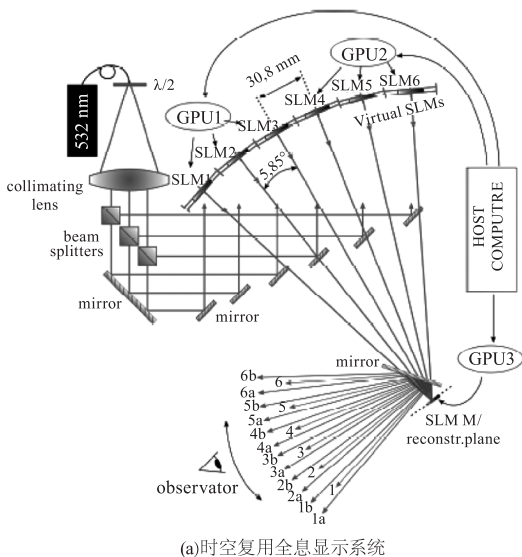
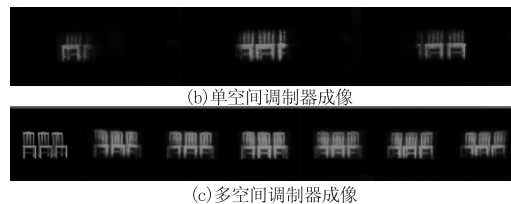


图6 动态彩色全息取样原型^[20]

Fig. 6 Typical prototypes of dynamic color holography^[20]



(a)时空复用全息显示系统



(b)单空间调制器成像

(c)多空间调制器成像

图7 广角全息显示系统

Fig. 7 Wide-angle holographic display system

2014年,日本科研人员 Sasaki 也提出了一种使用 16(4×4)块 4k×2k 反射型空间光调制器和时分复用技术来增加全息显示图像大小的新方法^[26]。采用传统的方法产生的图像可扩展性有一个上限,该上限由图像读出部分的路径长度决定。而在该系统中,新设计的光学系统使得图像读出部分的路径长度仅为先前的一半,有效的减小了图像读出的空

间,可以获得更大的彩色全息图像(见图 8,图像设计值(图 8a),NICT 位于全息图平面后 113 mm 处,汽车的左前轮位于 118 mm 处,左后轮位于 143 mm 处,维纳斯雕像位于 120 mm 处。从正前方(图 8(b)),右 2.8 度(图 8(c))和左 2.8 度(图 8(d))拍摄的照片^[26])。光学系统由偏振分束器、半波片和偏振器三部分组成。该实验装置采用红绿蓝三基色(633、532、473 nm)激光光源的时分复用技术,获得了全视差全彩静态全息图片和动态刷新频率 20 f/s 的全息全彩视频再现,图像的对角线大小为 85 mm(长 74 mm、宽 42 mm),观察视场角水平方向 5.6°和垂直方向 2.8°。

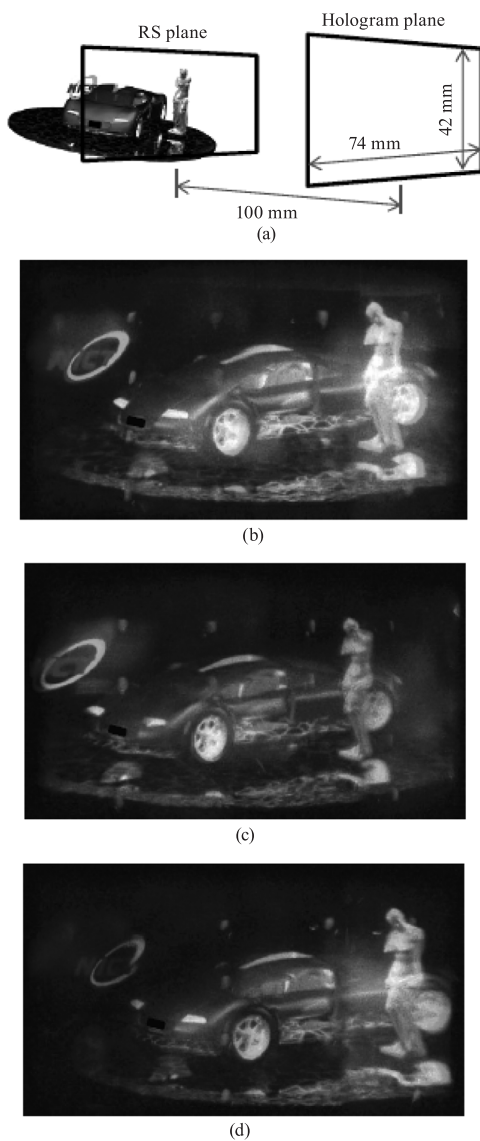


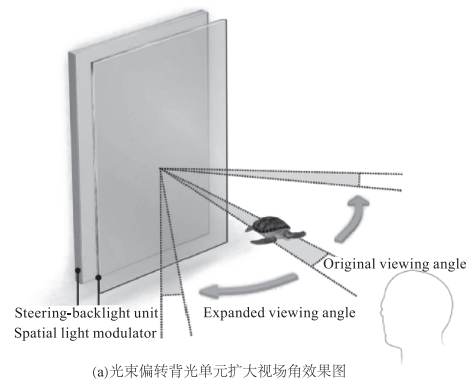
图 8 Sasaki 的全息实验结果

Fig. 8 Sasaki's experimental results

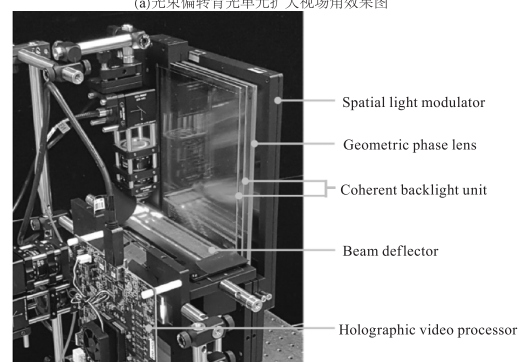
展览展示领域采用多块空间调制器拼接,虽然可以增加视场角,但是对多块空间调制器的无缝拼接技术要求较高,系统结构比较复杂,成本和技术要

求较高,整体稳定性较差,因此,也限制了在某些低预算会展活动中的应用。

2020 年,韩国科研人员开发了一款新颖的 4 k 高分辨率、大视场角、交互式动态全息超薄显示屏^[27]。在光调制器前设置一个特殊的光束偏转背光单元(steering-back light unit),有效的扩大了视场角(见图 9),获得了迄今为止最大视角的动态全息视频。其光束偏转背光单元包括一个相干背光元件和光束偏转元件,偏转元件可以将入射的相干光调整到所需要的角度。薄面板全息视频显示器的实验装置如图 9 所示:三色半导体激光器用做相干光源,当三色激光通过光束偏转元件和相干背光单元后,合成相干白光,产生的白光通过焦距为 1 m 的几何相位透镜导入到空间调制器上。一个 10.1 in 超高清清晰度商用液晶显示器被用纯振幅光调制器,系统总厚度小于 10 厘米。传统的 10.1 in 4 k 平面液晶显示器,视角仅为 0.6°,而采用此光束偏转背光单元,视场角增加了近 30 倍,而且全息视频处理器能够以每秒 30 帧的速度计算高质量全息图,实现了全息动态显示。此技术实用性较强,未来可以集成在移动设备中,为移动设备播放全息视频铺平了道路。



(a) 光束偏转背光单元扩大视场角效果图



(b) 动态全息超薄显示屏,包括光束偏转元件、相干背光单元、几何相位透镜、空间光调制器四部分

图 9 光束偏转背光单元扩大视场角效果图及动态全息超薄显示屏

Fig. 9 The schematic diagram of expanding effective SBP by using steering-backlight unit, and dynamic holographic ultra-thin display

4 关键技术分析及发展

4.1 全息技术与展览展示的完美结合

实现全息技术与展览展示的完美结合是全息技术应用于会展业的理想目标。如何实现全息技术的完美展示,既让全息技术有机融入到展览展示,又不喧宾夺主,使观众完全被全息技术吸引而忽略产品本身,是技术人员需要考虑的关键问题^[5,13]。激光全息在展览展示中的应用目标是:观众在欣赏展览展示技术创新的同时,从多角度体会到更多的艺术美感,享受技术创新带来的视觉享受^[13]。科技工作者需要根据展览展示活动应用的不同场景,大胆创新,设计出适宜的全息系统。

4.2 光源的选择

激光作为相干光源,具有单色性好、亮度高、方向性好的优点,被广泛的应用于全息显示系统中,可以提供清晰、对比度高的显示效果。但是采用激光光源时,也会存在一定的问题。如人眼安全问题,激光全息对激光功率有严格的要求,需要考虑观众直视全息图时,对人眼安全的影响。

早期蓝光主要采用488 nm的氩离子激光器^[28],随后采用473、456 nm的蓝光全固态激光器^[26],目前随着GaN半导体激光器的发展,目前常用445 nm、450 nm、465 nm、467 nm、490 nm等半导体激光器^[29];而红光激光器,早期主要采用632.8 nm氦氖气体激光器、671 nm全固态激光器^[30],随后逐渐被615、630、635、638 nm等半导体激光所取代^[31];而绿光激光器主要采用532 nm的全固态激光器或经近红外倍频(如554 nm)的绿光半导体激光器^[32-33],目前直接输出红蓝半导体激光器已经成熟,而直接输出绿光的半导体激光器还不够成熟。2014年,德国Katrin Paschke指出,在一些激光全息中,绿光输出功率需要到瓦级,相干长度要大于50 m,且可以实现直接调制,目前倍频的半导体激光器是最佳的选择^[34]。Katrin Paschke报道了基于分布布拉格反射型锥形半导体激光器腔外PPMgLN倍频的单频531.6 nm绿激光器,其线宽仅为13 pm,输出功率1.1 W。三基色半导体激光器性能可靠、节能、环保、体积小、寿命长,更适合用于激光全息。

4.3 散斑抑制

当激光用作照明光源时,总会出现散斑噪声,这会导致显示图像质量下降^[35]。同样采用激光重构

全息图时,散斑噪声也会影响全息图的成像质量。常用消除激光散斑的方法有三种:降低时间相干性、降低空间相干性、多个图像动态叠加^[36]。Michal Makowski采用十种不同的初始相位分布,计算了同一物体的十个分离的全息函数,并获得了固定随机相位图的横向移动全息图^[28]。此时,在信号信息相同的情况下,每一个图像在重构中具有不同的随机散斑噪声分布,然后通过光调制器合成,十个重构相位图实现快速时间顺序切换,获得时间积分,这样积分叠加可以有效的减少散斑噪声。这种时间相位积分的方法保留了物体的清晰度和空间分辨率,具有最低的计算复杂度,并且不需要额外的光学元件,结构简单,但缺点是需要非常高的帧速率设备,受限于动态全息技术。

4.4 关键器件的创新与发展

随着高速计算机、储存介质、空间光调制器等器件不断创新的发展,未来激光全息技术价格成本将会进一步降低,性能也会随之提高。用于展览展示领域的交互式、动态全息需要超快的信息采集能力、强大的立体空间显示能力和高准确度的手势辨别能力^[15]。研究人员可以通过改进算法、采用专用图形处理器、开发可编程列阵等方法来优化计算;而获得大尺寸、大视角和高分辨率的全息图像,则需要性能优良(阵列尺寸大、像素面积小、填充率高、衍射效率大等)的空间光调制器或新颖的光束偏转背光单元^[12,27]。

在交互式全息技术中,高准确度的手势辨别能力可以实现观众准确、舒适、自然、方便快捷的实时交互。在会展实际活动中,手势辨别会受到外界环境(如光线、背景、其他运动物体、肤色、其他观众手势)的影响,因此,要积极提高手势辨别的准确度和丰富手势动作命令^[12]。

未来,人工智能、深度学习、机器视觉为全息数据采集提供了新的技术手段,而新材料和电子集成也为记录介质和光学元件的研发提供新的可能。

4.5 外围环境条件

全息视觉效果的质量主要受全息图像本身的质量(包括全息记录和全息再现)和无视觉、几何或发光干扰的外围环境两个因素的影响。全息系统受到所使用的会展场馆条件的制约,因此其环境条件需要严格控制。会展场馆的内部环境设施一旦搭建完

成,不易被修改,因此,会增加辅助材料的方式减少对全息系统的干扰影响^[13]。如全息系统内部空间加置内部遮罩、黑色和非反射的内部覆盖物,或在外部灯光设备上加置过滤片,均能有效抑制外界干扰光的影响。另外,全息系统周围的部分区域保持黑暗也可以有效地避免镜像、灯光或内部反射,提高全息再现像的质量。吴曼提出可以从展览空间、光环境、色彩空间三个方面设计展览馆内的环境,构建三维虚拟环境,取得了良好的效果^[9]。

5 结 论

随着激光技术和会展业的融合发展,激光全息技术在展览展示领域将会有更广阔的应用前景。本文总结了交互式、全彩、宽视角等激光全息技术等展览展示中的应用,并分析了激光全息技术所采用的关键技术以及未来研究和发展方向。激光全息技术有助于我国会展业转型升级和可持续发展,也为疫情常态化背景下会展活动的顺利开展提供了技术支持和服务保障。

参考文献:

- [1] Jim Houston, William Beck. Design considerations for cinema exhibition using RGB laser illumination[J]. SMPTE Motion Imaging Journal, 2015, 124(4): 26-41.
- [2] Fabio Bruno, Stefano Bruno, Giovanna De Sensi, et al. From 3D reconstruction to virtual reality: a complete methodology for digital archaeological exhibition[J]. Journal of Cultural Heritage, 2010, 11(1): 42-49.
- [3] Shao Xiaopeng, Liu Fei, Li Wei, et al. Latest progress in computational imaging technology and application[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(2): 020000. (in Chinese)
邵晓鹏, 刘飞, 李伟, 等. 计算成像技术及应用最新进展[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(2): 020000.
- [4] Nan Liang. The application of the holographic laser projection in the entertaining performance [C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Advanced Materials for Science and Engineering(ICAMSE), 2016, 629-631.
- [5] Alexander Sotnikov, Irina Nikolaevna Sobolevskaya, Sergey Alexandrovich Kirillov, et al. The use of 3D visualization technology web-collections for the formation of virtual exhibitions [C]//Conference of 21th Scientific Conference "Scientific Services & Internet", 2019, 621-626.
- [6] D G Papazoglou, M Loulakis, G Siganakis, et al. Holographic read-write projector of video images [J]. Optics Express, 2002, 10: 280-285.
- [7] P -A Blanche, A Bablumian, R Voorakaranam, et al. Holographic three-dimensional telepresence using large-area photorefractive polymer[J]. Nature, 2010, 468: 80-83.
- [8] Norihito Ishii, Tetsuya Kato, Jiro Abe. A real-time dynamic holographic material using a fast photochromic molecule [J]. Scientific Reports, 2012, 2: 819.
- [9] Wu Man. Based on laser holographic projection technology exhibition pavilion environment design research [J]. Laser Journal, 2017, 38(5): 58-61. (in Chinese)
吴曼. 基于激光全息投影技术的展览馆内环境的设计研究[J]. 激光杂志, 2017, 38(5): 58-61.
- [10] Zeng Chao, Gao Hongyue, Liu Jicheng, et al. Latest developments of dynamic holographic three-dimensional display [J]. Acta Physics Sinica, 2015, 64(12): 124215. (in Chinese)
曾超, 高洪跃, 刘吉成, 等. 动态全息三维显示研究最新进展[J]. 物理学报, 2015, 64(12): 124215.
- [11] 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. (in Chinese)
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.
- [12] Wang Guoqing, Gui Jinbin, Jiang Zhixiang, et al. Progress of interactive holographic display [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(8): 080004. (in Chinese)
王国庆, 桂进斌, 姜智翔, 等. 交互式全息显示进展 [J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(8): 080004.
- [13] Eva Pietroni, Enzo d'Annibale, Alfonsina Pagano. The use of holographic showcases inside the museum's context. Towards an advanced museology creating a dramaturgy around the exhibited objects [C]//Proceedings of the 23rd International Conference on Cultural Heritage and New Technologies, 2018, CHNT 23.
- [14] Stella Sylaiou, Katerina Mania, Athanasios Karoulis, et al. Exploring the relationship between presence and enjoyment in a virtual museum [J]. International Journal of Human-Computer Studies, 2010, 68(5): 243-253.
- [15] Giuseppe Caggianese, Luigi Gallo, Pietro Neroni. Evaluation of spatial interaction techniques for virtual heritage applications: a case study of an interactive holographic projection [J]. Future Generation Computer Systems,

- 2018, 81: 516 – 527.
- [16] Shen Chuan, Wei Sui, Liu Kaifeng, et al. Survey on methods and systems of color holographic display[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(3): 030005. (in Chinese)
沈川, 韦穗, 刘凯峰, 等. 彩色全息显示方法与系统概述[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(3): 030005.
- [17] Hongyue Gao, Jicheng Liu, Tingchung Poon. Real-time dynamic color holographic display using a super fast-response liquid crystal thin film[J]. *SID DIGEST*, 2013, 44: 1321 – 1324.
- [18] Zhiqin Huang, Daniel L Marks, David R Smith. Out-of-plane computer-generated multicolor waveguide holography[J]. *Optica*, 2019, 6(2): 119 – 124.
- [19] Yueqiang Hu, Xuhao Luo, Yiqin Chen, et al. 3D-integrated metasurfaces for full-colour holography[J]. *Light: Science & Applications*, 2019, 8: 86.
- [20] Wenqiang Wan, Wen Qiao, Donglin Pu, et al. Holographic sampling display based on metagratings[J]. *iScience*, 2020, 23: 100773.
- [21] Zheng Yiwei, Wang Di, Li Yilong, et al. holographic display technology with large viewing angle based on liquid crystal spatial light modulator[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2021, 36(6): 789 – 796. (in Chinese)
郑义微, 王迪, 李移隆, 等. 基于液晶空间光调制器的大视角全息显示技术[J]. *液晶与显示*, 2021, 36(6): 789 – 796.
- [22] Naoki Fukaya, Keiichi Maeno, Osamu Nishikawa, et al. Expansion of the image size and viewing zone in holographic display using liquid crystal devices[J]. *SPIE*, 1995, 2406: 283 – 289.
- [23] Rick H-Y Chen, Timothy D. Wilkinson. Field of view expansion for 3-D holographic display using a single spatial light modulator with scanning reconstruction light[C]// *IEEE 3DTV-Conference; the True Vision-Capture, Transmission and Display of 3D Video (3DTV-CON)*, 2009, 14.
- [24] Christopher W Slinger, Colin D Cameron, Stuart D Coomber, et al. Recent developments in computer-generated holography: toward a practical electroholography system for interactive 3D visualization[J]. *SPIE*, 2004, 5920: 2741.
- [25] Tomasz Kozacki, Grzegorz Finke, Piotr Garbat, et al. Wide angle holographic display system with spatiotemporal multiplexing[J]. *Optics Express*, 2012, 20(25): 27473 – 27481.
- [26] Hisayuki Sasaki, Kenji Yamamoto, Koki Wakunami, et al. Large size three-dimensional video by electronic holography using multiple spatial light modulators[J]. *Scientific Reports*, 2014, 4: 6177.
- [27] Jungkwon An, Kanghee Won, Young Kim, et al. Slim-panel holographic video display[J]. *Nature Communications*, 2020, 11: 5568.
- [28] Michal Makowski, Izabela Ducin, Maciej Sypek, et al. Color image projection based on Fourier holograms[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(8): 1227 – 1229.
- [29] Yueqiang Hu, Ling Li, Yujie Wang, et al. Trichromatic and tripolarization-channel holography with noninterleaved dielectric metasurface[J]. *Nano Letters*, 2020, 20(2): 994 – 1002.
- [30] Michal Makowski, Izabela Ducin, Karol Kakarenko, et al. Simple holographic projection in color[J]. *Optics Express*, 2012, 20(22): 25130 – 25136.
- [31] Norbert Leister, Armin Schwerdtner, Gerald Fütterer, et al. Full-color interactive holographic projection system for large 3D scene reconstruction[J]. *Proc. of SPIE 2008*, 6911: 69110V.
- [32] Kamran Qaderi, Daniel E. Smalley. Leaky-mode waveguide modulators with high deflection angle for use in holographic video displays[J]. *Optics Express*, 2016, 24(18): 20831 – 20841.
- [33] Lin Hongyi, Sun Dong, Liu Hong, et al. Research progress of green lasers based on extra-cavity frequency doubling in PPMgLN[J]. *Laser & Infrared*, 2019, 49(11): 1282 – 1291. (in Chinese)
林洪沂, 孙栋, 刘虹, 等. PPMgLN 腔外倍频绿光激光器研究进展[J]. *激光与红外*, 2019, 49(11): 1282 – 1291.
- [34] Katrin Paschke, Christian Fiebig, Gunnar Blume, et al. Miniaturized highly brilliant diode laser modules for future display applications[J]. *Optical Review*, 2014, 21(1): 75 – 78.
- [35] Weidong Qu, Huarong Gu, Qiaofeng Tan. Holographic projection with higher image quality[J]. *Optics Express*, 2016, 24(17): 19179 – 19184.
- [36] Liu Xiao, Wen Zhiwei, Song Shuo, et al. Speckle-reduced green and yellow-green Nd: YVO₄ (YAG)/PPMgLN lasers for cinema exhibition industry[J]. *Optik*, 2021, 243: 167427.