

彩色全息显示方法与系统概述

沈川¹ 韦穗¹ 刘凯峰^{1,2} 张芬¹ 李浩¹ 王岳¹

¹安徽大学计算智能与信号处理教育部重点实验室, 安徽合肥 230039

²安徽省现代成像与显示技术重点实验室, 安徽合肥 230039

摘要 彩色全息显示是全息视频显示技术发展的重要目标。概述了基于空间光调制器实现彩色全息显示的方法与系统构建问题。首先,介绍了彩色全息显示中三个单色全息像叠加生成彩色全息再现像的基本原理。分析了全息图生成的方法,比较了光全息图、数字全息图、计算机生成全息图的不同。其次,讨论了彩色全息显示系统构建时空间光调制器的选择以及多波长照明下的相位调制特性问题。在实际系统中,红、绿、蓝三色激光或者发光二极管都可以用作系统照明光源。然后,描述了基于时分复用、空间复用、空间划分、空间叠加方法构建的彩色全息显示系统架构,指出彩色全息重构结果受到空间光调制器像素结构和色差等问题的影响。最后,展望了彩色全息显示技术的发展方向。

关键词 全息术;彩色全息显示;计算机生成全息图;空间光调制器

中图分类号 O438.1 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP51.030005

Survey on Methods and Systems of Color Holographic Display

Shen Chuan¹ Wei Sui¹ Liu Kaifeng^{1,2} Zhang Fen¹ Li Hao¹ Wang Yue¹

¹Key Laboratory of Intelligent Computing and Signal Processing, Ministry of Education, Anhui University, Hefei, Anhui 230039, China

²Key Laboratory of Modern Imaging and Displaying Technology of Anhui Province, Hefei, Anhui 230039, China

Abstract Color holographic display is an important aim of holographic video display technology. In this paper, an overview of the issues about the methods and system design of color holographic display based on spatial light modulator (SLM) is presented. Firstly, the basic principles that three monochromatic holographic images are combined into a color image are introduced. The methods of generating holograms are analyzed and the comparison of three kinds of holograms including optical holograms, digital holograms, and computer-generated holograms (CGHs) is achieved. Secondly, the choice of SLM to design a color holographic display system and the phase modulation characteristics for multi-wavelength illumination are discussed. It is feasible to employ either red, green, and blue (RGB) lasers or light-emitting diodes (LEDs) as illumination source in practice system. Then, the configurations of color holographic display system by use of different methods including time division multiplexing, space division multiplexing, spatial division, and spatial multiplexing are described, and it is pointed out that the color holographic reconstructions are corrupted by effects arising from the discrete nature of SLM and the chromatics. Finally, the prospective development of color holographic display technology is given.

Key words holography; color holographic display; computer-generated hologram; spatial light modulator

OCIS codes 090.2870; 090.1705; 090.1760; 230.6120

1 引言

随着现代传感器、通讯、存储和计算技术的高速发展,人们对医学成像、地质勘探、娱乐、军事等方面的显

收稿日期: 2013-11-18;收到修改稿日期: 2013-11-20;网络出版日期: 2014-03-01

基金项目: 国家自然科学基金(61377006,61301296,61201396)、国家自然科学基金-广东联合基金(U1201255)、教育部博士学科点专项科研基金(20113401130001)

作者简介: 沈川(1986—),男,博士研究生,主要从事全息显示方面的研究。E-mail: shenchuan2502@163.com

导师简介: 韦穗(1946—),女,教授,博士生导师,主要从事计算视觉与三维全息显示方面的研究。

E-mail:swei@ahu.edu.cn(通信联系人)

示技术提出了更高的要求。这些要求远远超出当前二维(2D)显示的范畴,因此,真彩色三维(3D)显示已成为现代信息社会的一种必然需求。彩色全息显示作为一种具有前景的真三维显示技术,不仅能够提供几乎接近于真实世界的3D图像,还能提供所有视点、所有距离上的3D视觉,是最具吸引力的真彩色3D表现形式之一^[1-3]。光全息术诞生于1948年,主要分为波阵面记录与重现是两个独立过程^[4]。徐大雄^[5-6]在激光全息方面开展了诸多开创性的工作,提出和研制了多种高衍射效率、高分辨率全息新记录介质。尽管光全息术能够提供逼真的彩色3D体验,但是无法满足动态、实时的需求。1993年,美国麻省理工学院(MIT)媒体实验室摒弃了机械地模拟光全息物理过程的做法,根据全息图重构时衍射成像的要求来计算全息图,并且用动态空间光调制器(SLM)-声光调制器(AOM)实现了世界上第一台视频全息显示系统,实现了小尺寸彩色3D物体的显示^[7]。由此,全息术由胶片时代发展到数字时代。因为视频全息显示技术在动态、实时显示方面具有巨大的优势,所以国内外的众多研究者对视频全息显示的理论、算法和系统实现进行了大量的相关论证研究^[8-18]。

人可以辨别几千种颜色色调和亮度,相比之下只能辨别几十种灰度层次,因此,颜色是信息描述的一种重要载体。彩色全息显示作为一种近乎完美的成像技术,其重构的景象几乎与原始的景物一样,人眼分辨不出有什么区别。然而,彩色的匹配记录和显示对所有的媒体都是一个挑战,而全息术比大多数其它媒体还要困难。因此,彩色全息显示的实现方法是视频全息显示的一个重要研究目标。彩色全息显示需要解决的关键问题是带给观察者3D体验的同时提供色彩体验。目前,基于SLM构建的彩色全息显示验证系统,大多数采用三基色光源照明全息图,通过控制三基色光源的强度比和强度空间分布实现彩色全息显示^[19-22]。本文主要介绍基于空间光调制器实现彩色全息显示的基本原理,进一步探讨在构建系统的过程中涉及到的生成全息图、选择空间光调制器、设置照明光源以及系统架构等问题。根据全息显示利用衍射成像的原理,分析讨论了彩色全息显示面临的重构尺寸、视角以及由于不同波长照明光源引起的色差等问题。在总结彩色全息显示发展现状的同时,对其进一步的发展方向进行了展望。

2 彩色全息显示的实现

人眼具有色相加处理功能,其中的六七百万锥状细胞中可分为3个主要的感觉类别,分别对应红、绿、蓝(R,G,B)。国际照明委员会在1931年设计了特定波长值的单色光为主原色,分别为红700 nm,绿546.1 nm,蓝435.8 nm。当原色相加时可以产生二次色:红蓝相加时为深红色,绿蓝相加时为青色,红绿相加时为黄色。彩色全息显示也是基于颜色叠加匹配的原理,构建相应的显示系统,一般通过控制三基色光源的强度比和强度空间分布,重构显示彩色物体。

以二维图像为例,给出相应的模拟实验证明色彩叠加原理的可行性。如图1所示,原始彩色图像内容为四种颜色的字母,依次为红色A,绿色H,蓝色U,白色W。首先将其这幅彩色图像分成RGB三基色部分,然后采用Gerchberg-Saxton(GS)算法^[23]分别计算RGB三色分量图像对应的相位全息图。紧接着模拟每个相位全息图的全息再现结果,最后将三色全息再现结果通过时序叠加或是空间叠加的方式组合成彩色图像,完成对原始彩色图像的全息再现。

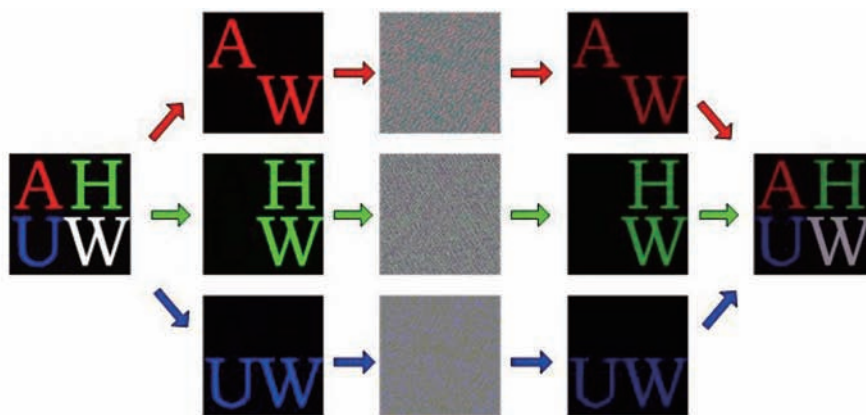


图1 彩色全息显示数值模拟示意图

Fig.1 Numerical simulation of color holographic display

2.1 全息图的生成

为了实现彩色全息显示,首先要生成全息图。经典的光全息术采用干涉的方法获得全息图。在全息图的记录过程中对于全息干板(或胶片)以及物体的稳定性提出了比较苛刻的要求,而且,受到激光照明的限制,光全息图仅可能获取到中、小尺寸的物体,无法获取到远处的物体和景物背景。

光传感器的迅速发展已经使得用数字的方法来实现全息图的获取成为可能。数字全息术是一种相干成像的技术,其中全息图被实时地用数字方法记录,采用的是数字电荷耦合器件(CCD)或互补金属氧化物半导体(CMOS),然后用计算机进行数值重构或是采用光学方法重构^[24-26]。数字记录得到全息图的方法具有实时测量的潜力,在许多情况下具有优势,因此数字全息术成为一个备受关注的研究课题,诸多学者开展了光学系统、减少散斑噪声以及波前重构算法等方面的研究^[27-31]。需要指出的是,数字全息术的最大局限在于CCD(或CMOS)的分辨率是有限的,而且该类电子装置记录的是正实数的2D阵列,而光波场是由复值表示的3D场。

计算机产生全息图(CGH)最早由Lohmann等^[32]提出。他们引入了一种纯数字实现的全息图方法并称之为迂回相位方法,此方法可以归属于基于单元(相对基于点像素)的全息图。计算机产生全息图巧妙地将计算与光学结合起来,以规避光全息术中记录阶段的相干光照明、化学处理方法以及记录物体尺寸的限制。国内,20世纪80年代出版了专著《计算机制全息图》^[33],并且作者开创性地将CGH技术用于制作凹面全息光栅及合成孔径雷达信号光学处理等方面。当然,CGH不但可以通过模拟光全息物理过程的获得,也可以根据全息图重构时衍射成像的要求采取一种面向衍射的计算方法。MIT多媒体实验室的工作正是这种在自由空间用逆传播来求解光波场的方法,可以得到更快的速率和更小的带宽^[34]。CGH作为复波场的一种数值表示方法发展到今天可以实现相当广泛的波阵面变换。例如,根据传播域可以分为菲涅耳和傅里叶型等;根据透射约束,有灰度值、二值、相位和振幅型等;同时,根据记录的手段,它们也可以分为基于点像素或基于单元的全息图。CGH的研究热点在于如何在保证重构质量的情况下减少运算量、提高计算速度,目前已经从算法改进、优化以及硬件提升等方面开展了很多相应的研究^[35-41]。近期,Tsang等^[39]提出了一种基于插值波前记录平面技术的菲涅耳全息图快速生成算法,通过采用图形处理单元(GPU),可以达到 4×10^6 个对象点40 frame/s的计算速度。在特定情况下这已经可以满足动态实时的全息图计算需求,因此计算机产生全息图的方法将是彩色全息显示编码的一种重要途径。此外,计算彩色彩虹全息术颜色复现机理^[41]以及彩色计算全息颜色的匹配问题的研究^[42]对于彩色全息显示有很好的借鉴作用。压缩全息技术结合了全息术和压缩感知理论^[43-44],可以从2D全息测量数据中重建3D层析对象,也是彩色全息显示值得关注的一个研究方向。

2.2 空间光调制器

彩色全息显示的核心器件是实现全息视频系统的核心器件空间光调制器,通过计算机控制实现对光的波阵面在空间和时间上的编程调制,通过改变波阵面的振幅、相位、偏振实现对3D景物的绘制和重构。如今正处在SLM技术百花齐放的时代,常见的全息显示系统分别基于声光调制器、微机电系统(MEMS)或是液晶SLM(LC-SLM)建立。

MIT的研究者先后建立了Mark-I,II,III,三代全息显示系统,其基本思想是采用AOM作为动态显示的手段并通过扫描调制器的图像来形成一个大的显示窗口。AOM系统需要通过声光交互将计算得到的数字条纹转换成高频模拟信号,在系统的构造过程中会面临一些问题。2013年基于AOM的全息视频显示系统取得了重要进展,Smalley等^[11]将各向异性漏模态调制器用于全息视频显示,并给出了单个通道各向异性波导得到的全息立体效果图,尺寸为35 mm×20 mm。

数字微镜器件(DMD)是基于MEMS工艺器件的典型代表,美国德克萨斯州西南大学医学中心采用DMD器件建立了全息动态显示系统^[8]。不少研究者在此基础上开展了关于DMD对全息图的调制机理与衍射原理的研究,并将DMD分辨率、微镜尺寸、间隔、旋转角度、参考光入射角以及衍射条件等因素结合到计算全息编码等方面^[45-46],这些工作对利用具有离散像素结构的动态SLM进行全息编码的理论、算法和系统实现都是一种参考。DMD由3D微刻蚀技术制造,可以制造相当复杂的光学系统,可是从全息显示的观点来看,它的像素尺寸难以变小、刷新频率不足。针对以上问题,2012年,比利时校际微电子研究中心(IMEC)报

道了基于MEMS工艺制作模块化亚波长衍射光调制器用于高清晰度的全息显示^[47],该器件中的小反射镜单元上下快速运动,使全息图以动态形式呈现,如果预期显示目标得以实现将是一个令人振奋的突破。

液晶技术具有惊人的资源和多功能特性。大多数液晶SLM采用电寻址方式,可以用于形成透射或反射装置。作为液晶SLM的一种,硅基液晶(LCOS)在基于强度调制的2D显示应用领域,与液晶显示器(LCD)相比没有突出的优势。但是在全息显示、自适应光学、光束偏转、激光材料加工的应用中,LCOS具有广泛的应用前景^[48]。LCOS工作在光反射的状态,将平板显示技术与硅微电子技术嫁接起来,该技术具有物理尺寸小、高分辨率、高填充率等诸多优势,而且反射式结构使光两次通过调制器得到双倍的效应,使得调制器变得更薄;结果使LCOS得到快4倍的响应速度。

采用不同调制类型的可编程空间光调制器显示CGH已成为全息显示系统的一个普遍选择。如上文所述,光波场是由复值表示的3D场,全息术能够通过调制光束的振幅和相位来合成一个光的波阵面。因此实现复调制是彩色全息显示中的一个重要任务。然而,在SLM平面上实现对整个复光场区域的完全控制是困难的,因为目前SLM仅能表示有限的复数值集合,其振幅调制和相位调制一般是耦合的,不可以同时独立地调节入射光的相位和振幅。针对这一问题,已经有一些解决方法。可以选择纯振幅调制器^[49]或是纯相位调制器^[50]实现复调制,也可以在显示系统中通过分光棱镜级联两片SLM的配置方案,主要方法^[51-54]有:两个SLM分别显示全息图实部和虚部;两个SLM分别用于调幅和调相。当然为了减少系统中使用SLM的数量,也可以在单片SLM上划分不同的区域^[55]实现以上调制。能在整个复平面上编码实现复调制是一种理想的情况,而近期,从简化彩色全息显示系统的角度考虑,需要牺牲一定的复调制能力。基于相位调制SLM建立系统是实现彩色全息显示的优先发展方向。虽然,失去振幅或是相位的变化都会使重构质量下降,但与振幅系统相比,相位系统能够提供更好的性能,其中一致的透射率(或反射率)可使光能的利用率最大化。

对于彩色全息显示中SLM的相位调制,理想的情况下它应该能够对所用的多波长都能得到 2π 线性相位调制能力。实际上,通常采用的液晶SLM的相位调制能力取决于入射光波长、入射角度、偏振态等因素。彩色全息显示系统需要采用多基色光源,入射光的波长发生改变,液晶SLM的调制特性曲线也不尽相同,因此,准确测量多波长情况下的相位调制特性曲线是实现彩色全息显示的前提条件。目前,相位调制特性曲线的测量方法主要包括泰曼格林干涉仪法、双缝干涉测量法以及径向剪切干涉法等^[56-57],也可以通过椭圆仪法测量相位调制的色散特性^[58]。近期出现的利用全息干涉计量原理和数字全息变焦系统进行测量的方法也是一个有益的探索^[59]。在获得相位调制特性曲线后,调整驱动电压、对光学器件进行优化配置、通过查表法调整相位偏差等对于改善全息重构质量都能够提供帮助^[21,60]。

2.3 照明光源

激光作为光源,具有亮度高、单色性好、方向性好等诸多优势。目前已有以红、绿、蓝三基色(或多基色)激光为光源的激光显示技术,可以提供高清、全色的显示效果。同时,激光作为一种相干性光源,被广泛应用于目前的全息显示系统,同样彩色全息显示可以采用多基色的激光作为光源实现。通常,彩色全息系统中的激光光源在经过扩束、滤波后,产生均匀的准直光束用于照明SLM。但是,彩色全息显示并不限于采用准直光束照明。近期,为了减少傅里叶全息投影系统中透镜的数量,Buckley^[61]采用光纤耦合激光器作为光源提供球面波照明,通过编码等效透镜至菲涅耳全息图,最终的系统仅仅采用单一透镜。Makowski等^[22]采用三色的光纤耦合激光作为系统的光源,类似于三色发散球面波照明空间光调制器,实现了彩色全息显示。Chuan等^[62]分析了会聚球面波照明条件下的全息投影技术,分别消除了菲涅耳全息投影和傅里叶全息投影中的零级衍射光的干扰。李俊昌等^[63]分析了数字全息中球面波照明下消除零级光干扰的方法。

选择多基色的激光作为光源实现彩色全息显示也存在一定的问题。首先,在相干光学的处理中,重构图像面临散斑噪声的影响。已经存在多种消除激光散斑噪声影响的研究^[64-67],但是相对来说,它们都是比较复杂的。其次,当观察者直视时,激光作为光源会面临一定的安全问题,所以对于激光的功率有着严格的限制。为了解决以上问题,很多研究者基于发光二极管(LED)建立彩色全息显示系统^[68-70]。与激光器相比,LED的成本低且易于操作。单色发光二极管具有部分相干性,可以提供一定的时间相干性和空间相干性^[71-72],其辐射光可以用作全息图的照明。刘翠萍等^[73]从色度上分析研究了发光二极管用于彩色全息图照明的可行性,并开展了相应的色度测量与评价实验。此外LED安全性良好,可以有效地满足人眼直视观察的需求。尽管由于其低相

干性,全息重建质量可能会降低,但是选择多色的LED作为光源实现彩色全息显示仍然是一种有效的途径。

3 系统构建

3.1 时分复用

实现彩色全息显示的时分复用方法一般采用三基色光源(以激光为例)分时照明单片空间光调制器进行光学重构。系统原理图如图2所示(为了方便说明,示意图中采用透射型SLM)。

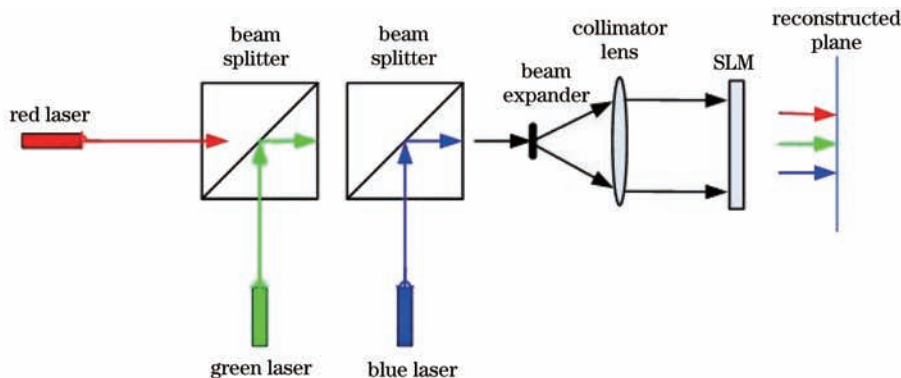


图2 基于时分复用的彩色全息显示

Fig.2 Color holographic display based on time division multiplexing

时分复用方法通常将单位时间段 T 等分成三个子时间段 t_1, t_2, t_3 , 则 $t_1 = t_2 = t_3 = T/3$, 在每个子时间段 t_1 内, 只有红色光源照明空间光调制器, 此时加载红色分量全息图到 SLM 上。在每个子时间段 t_2 内, 只有绿色光源照明空间光调制器, 此时加载绿色分量全息图到 SLM 上。在每个子时间段 t_3 内, 只有蓝色光源照明空间光调制器, 此时加载蓝色分量全息图到 SLM 上。时序工作示意图如图3所示, 依此类推, 在每个单位时间段 T 内都完成了红、绿、蓝三个单色全息再现像的显示, 当单位时间 T 足够小时, 即三色全息图切换的频率足够高时, 利用人眼的视觉暂留效应, 可以实现观察到彩色全息再现像。

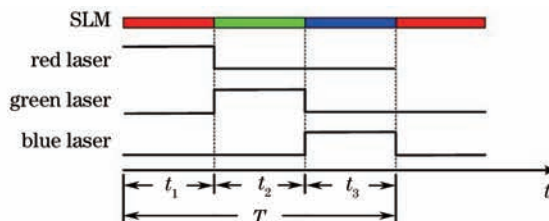


图3 激光工作和SLM加载全息图的时序示意图

Fig.3 Diagram of laser operating and sequence of hologram loaded to SLM

基于时分复用方法的彩色全息显示系统结构简单,使用器件较少,特别是仅需要一个空间光调制器。但是它需要精确地保证单色光源的工作时间与加载对应颜色分量全息图时间的同步性。对于单色分量来说在时间轴上有一定的能量损失。同时,因为需要高速切换三个单色全息图合成彩色全息重构像,系统对于空间光调制器的响应时间也提出了较高的要求。铁电液晶可以提供非常快的切换频率,是一个通用的选择。但是铁电液晶一般只能实现二进制调制,相位分阶数不足,会对衍射效率以及全息重构质量产生不利的影响。2009年, Martínez 等^[74]利用投影机中的色轮和铁电液晶实现了彩色全息显示系统,系统通过步进电机控制彩色滤光轮旋转实现三色激光的时序工作控制。2011年,王涛等^[75]构建的时分复用的彩色全息显示系统中采用了单一的半导体RGB激光器作为光源,减少了分光棱镜的使用。激光控制器控制分时照明,光路比较简洁。最终通过CCD采集全息光电再现像,实现彩色全息再现像。

3.2 空分复用

实现彩色全息显示的空分复用方法一般采用三基色光源(以激光为例)分别照明三个空间光调制器进行光学重构,并在重构平面实现三个单色全息再现像的合成。如图4所示,具体的原理为:全息再现时,将计算得到的三个单色全息图同时加载到对应的空间光调制器上,驱动电路同时驱动三个空间光调制器工作,

三色光源分别入射三个空间光调制器,最终的 RGB 三色全息再现像在空间进行配准合成,得到彩色全息再现像。2012年,王岳等^[76]建立的空分复用彩色全息显示系统借鉴了商业投影仪的结构,三个 LCOS 呈 U 形分布,通过分光棱镜, X 棱镜的共同作用,实现彩色全息显示。

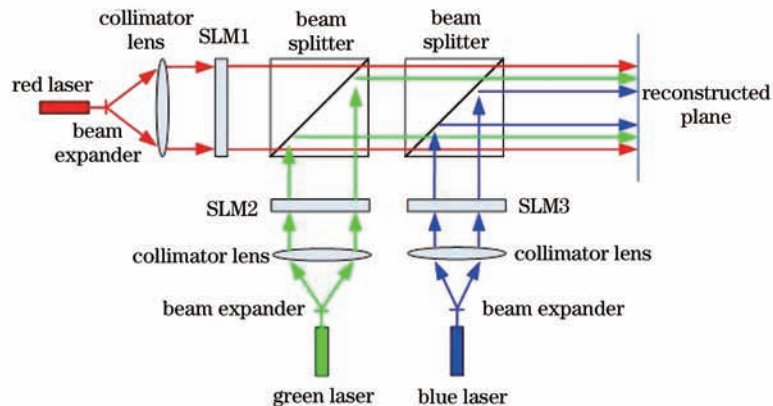


图4 基于空分复用的彩色全息显示

Fig.4 Color holographic display based on space division multiplexing

基于空分复用方法实现的系统具有更高的光学效率,并在色彩还原和分辨率等方面具有诸多优势,是彩色全息显示发展的一个重要方向。但需要指出的是这种方法构建的系统结构较复杂,采用的器件较多,如三个 SLM。而且系统存在三个单色全息再现像空间合成的精确配准问题。

3.3 空间划分

空间划分的方法仅使用单片高分辨率的 SLM,但是将 SLM 划分成三块子区域,每块子区域加载对应的红、绿、蓝三色全息图,最终利用衍射特性,在重构平面形成彩色全息再现像。空间划分的方法和时分复用的方法一样使用了较少的 SLM 器件,然而损失了红、绿、蓝三色全息图的分辨率性能指标,如果采用更高分辨率的 SLM,可以减少对全息重构质量的影响。2010年, Makowski 等^[77]基于空间划分的方法建立了彩色全息显示系统,系统原理如图 5 所示,分别采用 He-Ne 激光器、二极管抽运固态激光器以及氩激光器提供红、绿、蓝三色激光光源,三色激光束经过扩束后同时照射一片空间光调制器三块子区域,最终得到的三色全息再现像在投影屏上进行合成。其中,系统采用的空间光调制器为 Holoeye 公司的 PLutoVIS, SLM 的分辨率为 $1920 \text{ pixel} \times 1080 \text{ pixel}$, 像素间距为 8 mm 。单片 SLM 等分成三片区域,如图 5(a)所示,计算得到三色分量全息图分别加载到对应的 $1/3$ 区域。系统示意图如图 5(b)所示,利用光阑的作用,使全息再现时每束激光仅仅照射 SLM 的 $1/3$ 。后续改进的系统中^[22],在 SLM 前方的位置水平地放置三色的光纤耦合激光作为系统的光源,对应 SLM 上的三个子区域,类似于三色发散球面波照明空间光调制器,最终实现了较好的彩色全息显示效果,构建的系统结构更加紧凑且易于实现。此外,为了实现彩色双眼立体显示的效果, Choi 等^[78]采用空间划分的方法建立的系统中将 SLM 分为了六块子区域,分别对应左右眼视觉,这又进一步降低了全息图的分辨率。

3.4 空间叠加

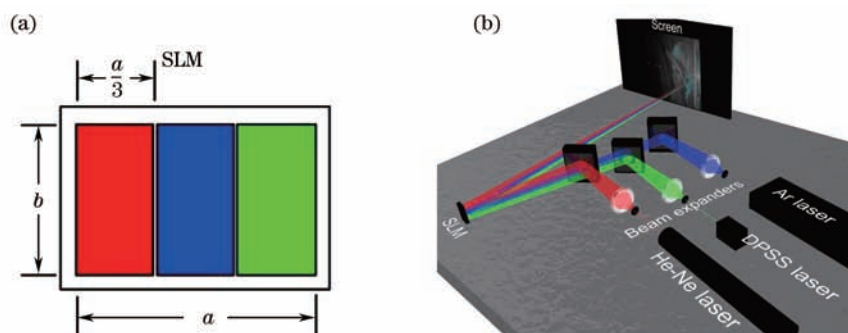


图5 基于空间划分的彩色全息显示。(a)单片 SLM 划分示意图;(b) 系统装置示意图

Fig.5 Color holographic display based on spatial division. (a) Division of the SLM; (b) scheme of the experimental setup

空间叠加的方法主要有两种。一种是在 xy 平面不同的位置形成三色全息再现像,感兴趣的彩色全息再现像由三个单色全息再现像的重叠交集部分构成。典型的系统由日本学者Ito等^[19]给出,系统如图6(a)所示,采用了一个高分辨率的反射型LCD作为空间光调制器,它的像素间距是 $10\ \mu\text{m}$,分辨率是 $1400\ \text{pixel}\times 1050\ \text{pixel}$ 。因为三色LED放置在直角三角形的顶点上,三个单色全息再现像的位置相互不同,彩色全息再现像的有效部分仅为三色分量的中间合成区域。另一种是全息投影显示二维图像时,利用不同波长照明菲涅耳全息图,三色全息再现像重构在距离SLM不同 z 处的平面,在特定的重合平面接收彩色全息再现像。典型的系统由Makowski等^[79]构建,系统原理如图6(b)所示,为了获得彩色全息图,图像的红、绿、蓝三部分被编码在距离全息图不同的三个位置,当全息图被不同波长的光照明时在不同的位置获得三幅全息再现像,在距离全息图 $100\ \text{mm}$ 平面处获取彩色全息再现像。

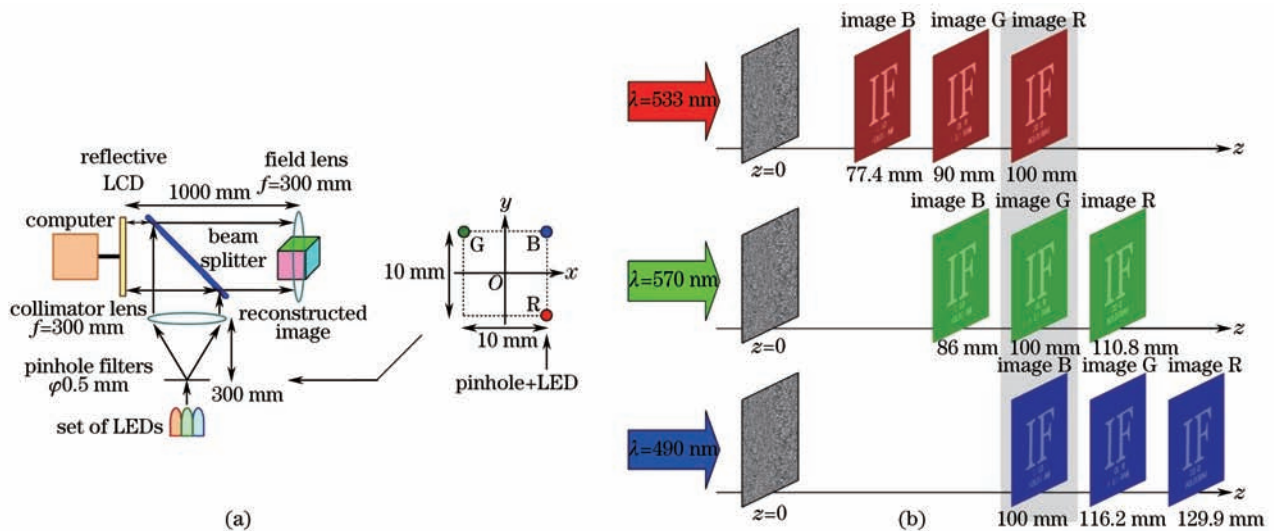


图6 基于空间叠加方法的彩色全息显示示意图。(a)同一平面;(b)不同平面

Fig.6 Schematics of color holographic display based on spatial multiplexing. (a) At the same plane; (b) at different planes

4 成像分析

4.1 像素结构问题

LC-SLM采用一个单独寻址的矩阵来控制像素对光进行调制。如图7所示,LC-SLM的像素几何结构由像素大小 d 、像素间距 Δd 所确定。像素大小与像素间距的相对比率的平方称为填充因子。通常像素结构的SLM具有有限大小的填充因子(即小于100%),当采用这类像素结构的空问光调制器进行全息显示时,再现像的重构结果会受到像素结构的影响。

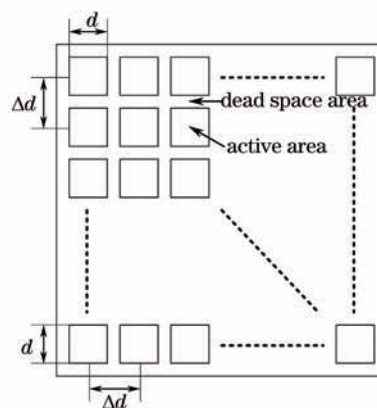


图7 SLM像素结构图

Fig.7 Pixel structure of SLM

考虑远场衍射特性,当采用准直光照明时,全息重构关系可表示为

$$U(x,y) \approx \mathcal{F}\{t(u,v)\}, \quad (1)$$

式中 $t(u,v)$ 表示 SLM 的透射率(反射率)函数, $\mathcal{F}\{\}$ 表示傅里叶变换。

最终的衍射图样中心出现的一个亮斑,称为零级光,是由像素之间非活动区域产生的光的反射或透射造成的。除此之外,最终的图样会产生显著的衍射效应,即产生多级衍射现象^[80]。像素结构造成全息图傅里叶变换的谐波复制现象,即多级衍射全息再现像。多级衍射全息再现像的能量分布受到 SLM 单个像素衍射因子的调制。零级光和多级衍射光的存在影响了全息重构的视觉感受并且降低了光能的利用率。Arrizon 等^[81]分析了具有有限填充因子的 SLM 的衍射效率问题。为了解决 SLM 像素结构引起的零级光、多级衍射光和全息图对应的多级衍射再现像对于全息重构的干扰,在全息投影应用中,目前大多数的研究立足于滤波的方法^[82-83],即采用加载等效透镜相位到全息图,达到分离重构图像与零级光位置的目的,再利用滤波器进行滤除零级光。也可以通过设置 $4f$ 系统进行频域滤波从而消除高级衍射光的影响^[84]。此类滤波的方法与电寻址 SLM 的可编程特性相结合,可以获得简单有效的结果,但是降低了光能利用率。而通过引入校正光束与零级光束相互干涉抑制零级光影响的方法提供了另一种思路^[85]。近期,利用相位压缩技术抑制零级光影响的研究工作也是在此方法的基础上开展的^[86]。此外,数字全息中也有诸多消除零级衍射的研究工作^[63,87]。

全息图用于 3D 感知,为显示一个有用的全息图,观察者的两只眼睛都必须位于系统提供的视场范围内。获取大的衍射角以及高的衍射效率是彩色全息显示的两个主要问题,根据光栅方程,目前基于单片 SLM 的全息显示系统不足以提供良好 3D 感知所需要的视场角。而根据液晶相位光栅的理论,随着光栅周期的减小,衍射角度变大,但是 1 级衍射光效率也变得越来越大^[88]。全息再现主要利用 1 级衍射实现,如果衍射效率很低将无法提供 3D 重构所需要的能量。现有的扩大全息显示系统视角的方法主要是基于多片 SLM 拼接的方法。其中多片 SLM 的拼接方式多种多样,可以是“铺砖”似的利用半透半反镜将多片 SLM 平面排列无缝地拼接^[9],也可以是多片 SLM 以扇形的结构拼接在一起扩展再现视角^[10,89]。采用多片 SLM 拼接扩大全息再现视角的方法是可行的,但是需要采用复杂繁多的光学器件构建系统,而且多片 SLM 的无缝拼接本身就是一个很大的挑战。如果彩色全息显示系统采用这种方法将进一步增加系统的复杂度,对于系统构建是不利的。因此,对于彩色全息显示而言,采用单片 SLM 构建系统将是简单而有益的。近期,Liu 等^[15]提出采用分时和空间平铺的方法,通过叠加线性相位因子构建系统,达到等效于弯曲的 SLM 阵列的目的。Wilkinson^[90]将液晶和垂直生长的碳纳米管结合起来,创造了一种可以重新配置的 3D 液晶装置结构,该阵列的像素间距约为 $1 \mu\text{m}$,接近全息显示的需要。

4.2 彩色全息显示的色差

彩色全息显示需要重构由不同波长(颜色)记录的图像,而且产生的重构图像必须精确地叠加以得到正确的色彩显示。全息显示利用衍射成像,衍射本质上与波长相关。彩色全息显示中由于波长不同引起的色差问题主要有两种,一种为倍率色差,另一种为纵向色差,分别如图 8 所示。

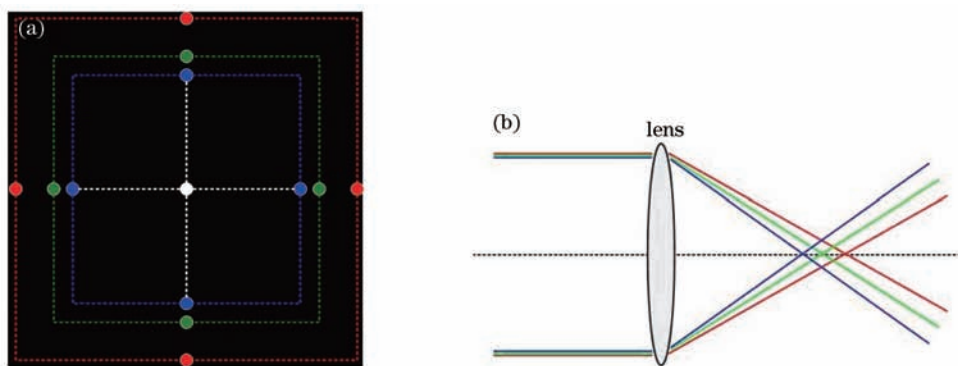


图 8 彩色全息显示色差示意图。(a)倍率色差;(b)纵向色差

Fig.8 Schematics of chromatism with color holographic display. (a) Magnification chromatism; (b) longitudinal chromatism
以 Stanley 等^[91]给出的全息图傅里叶重构几何分析为例,全息重构时,再现像的大小为

$$h_x = \frac{\lambda f}{p_x}, h_y = \frac{\lambda f}{p_y}, \quad (2)$$

式中 λ 表示光源的波长, f 表示傅里叶透镜的焦距, p_x, p_y 表示空间光调制器横向和纵向的像素间距。由(2)式可知,全息显示系统重构显示二维图像的大小与三个参数相关,若傅里叶透镜的焦距 f 和空间光调制器的像素间距 p 确定,则在采用红、绿、蓝三色激光器进行全息再现时,再现图像的大小与波长 λ 成正比例关系,即

$$h_R:h_G:h_B = \lambda_R:\lambda_G:\lambda_B. \quad (3)$$

为了使三色波长照明下全息再现像得到同样的横向放大,通常选择对原始三色图像分量、三色全息图或者最终的全息再现像进行必要的缩放操作。同样的方法也适用于基于菲涅耳重构的几何分析^[92]。

对于纵向色差而言,透镜对三基色波长产生了不同的焦距。在构建彩色全息显示系统时可以选择消色差傅里叶透镜代替普通的透镜^[76],消色差傅里叶透镜可以通过正负透镜的组合,使三基色波长近似具有相同的焦距。当然也可以利用具有抵消色散属性的衍射光学元件矫正色差。因为SLM具有可编程特性,因此,不添加任何光学元件,只是通过计算的方法编码衍射光学元件到SLM上也可以达到消除纵向色差的目的。Wang等^[93]提出的彩色全息显示系统就是通过加载一个计算的相位分布到相位全息图上,生成一个可编程的衍射光学元件,从而消除纵向色差。

5 结束语

目前构建的系统不能满足真彩色3D显示所希望的质量和um要求,彩色全息显示仍然面临诸多挑战。利用衍射成像需要滤除零级光、高阶衍射光和多级再现像,而且重构的图像被限制在一个有限的小区域中,与此同时,最大衍射角决定了重构时的可观察视场。要实现真正的彩色全息显示仍然需要更多的研究来进行改善。一方面,需要降低目前彩色全息显示中对光源相干性的要求,降低高分辨率要求,消除多级衍射以及色差影响等。另一方面,如果能够实现全息图的快速生成和有效编码,获得亚波长特征像素的复调制空间光调制器件,构建简单结构的系统,将会对彩色全息显示的实用化起到积极的推动作用。

参 考 文 献

- 1 F Yaras, H Kang, L Onural. State of the art in holographic displays: a survey [J]. J Display Technology, 2010, 6(10): 443-454.
- 2 L Onural, F Yaras, H Kang. Digital holographic three-dimensional video displays [J]. Proc IEEE, 2011, 99(4): 576-589.
- 3 Wei Sui. Introduction to Holographic Imaging [M]. Hefei: Anhui University Press, 2013.
韦 穗. 全息成像概论[M]. 合肥: 安徽大学出版社, 2013.
- 4 D Gabor. A new microscopic principle [J]. Nature, 1948, 161(4098): 777-778.
- 5 Xu Daxiong. Laser holographic 3D image information processing & transmission [J]. Telecom Engineering Technics and Standardization, 2004, 36(1): 7-9.
徐大雄. 激光全息三维图像信息处理和传输[J]. 电信工程技术与标准化, 2004, 36(1): 7-9.
- 6 Xu Daxiong. The development of modern holographic display technology [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2009, 46(8): 16-18.
徐大雄. 现代全息显示技术之发展[J]. 激光与光电子学进展, 2009, 46(8): 16-18.
- 7 M E Lucente, P St-Hilaire, S A Benton, *et al.*. New approaches to holographic video [C]. SPIE, 1993, 1732: 377-386.
- 8 M Huebschman, B Munjuluri, H Garner. Dynamic holographic 3-D image projection [J]. Opt Express, 2003, 11(5): 437-445.
- 9 M Stanley, M A Smith, A P Smith, *et al.*. 3D electronic holography display system using a 100-megapixel spatial light modulator [C]. SPIE, 2004, 5249: 297-308.
- 10 T Kozacki, M Kujawińska, G Finke, *et al.*. Extended viewing angle holographic display system with tilted SLMs in a circular configuration [J]. Appl Opt, 2012, 51(11): 1771-1780.
- 11 D E Smalley, Q Y J Smithwick, V M Bove, *et al.*. Anisotropic leaky-mode modulator for holographic video displays [J]. Nature, 2013, 498(7454): 313-317.
- 12 Wang Dapeng, Wei Sui. Characterization of a digital micromirror device for computer generated holographic video [J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(1): 50-55.
王大鹏, 韦 穗. 数字微镜器件在视频全息中的应用[J]. 光学学报, 2008, 28(1): 50-55.
- 13 Huadong Zheng, Yingjie Yu, Cuixia Dai. A novel three-dimensional holographic display system based on LC-R2500 spatial light modulator [J]. Optik, 2009, 120(9): 431-436.
- 14 H Zhang, N Collings, J Chen, *et al.*. Full parallax three-dimensional display with occlusion effect using computer

- generated hologram [J]. *Opt Eng*, 2011, 50(7): 074003.
- 15 Y Z Liu, X N Pang, S Jiang, *et al.*. Viewing-angle enlargement in holographic augmented reality using time division and spatial tiling [J]. *Opt Express*, 2013, 21(10): 12068–12076.
- 16 Y Shi, H Wang, Q Wu. Color transmission analysis of color computer-generated holography [J]. *Appl Opt*, 2012, 51(20): 4768–4774.
- 17 Ma Jianshe, Xia Feipeng, Su Ping, *et al.*. Survey on key techniques and systems of digital holographic 3D display [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(5): 1141–1152.
马建设, 夏飞鹏, 苏萍, 等. 数字全息三维显示关键技术与系统综述[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(5): 1141–1152.
- 18 Jia Jia, Wang Yongtian, Liu Juan, *et al.*. Progress of dynamic 3D display of the computer-generated hologram [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(5): 050002.
贾甲, 王涌天, 刘娟, 等. 计算全息三维实时显示的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(5): 050002.
- 19 T Ito, K. Okano. Color electroholography by three colored reference lights simultaneously incident upon one hologram panel [J]. *Opt Express*, 2004, 12(18): 4320–4325.
- 20 F Yaras, H Kang, L Onural. Real-time multiple SLM color holographic display using multiple GPU acceleration[C]. *Digital Holography and Three-Dimensional Imaging*, 2009. DWA4.
- 21 Wang Tao. Full Color Holographic Display Based on Liquid Crystal Spatial Light Modulator [D]. Shanghai: Shanghai University, 2011.
王涛. 基于液晶空间光调制器的彩色全息显示研究[D]. 上海: 上海大学, 2011.
- 22 M Makowski, I Ducin, K Kakarenko, *et al.*. Simple holographic projection in color [J]. *Opt Express*, 2012, 20(22): 25130–25136.
- 23 R Gerchberg, W Saxton. A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures [J]. *Optik*, 1972, 35(2): 237–246.
- 24 U Schnars, W P O Jüptner. Digital recording and numerical reconstruction of holograms [J]. *Measurement Science and Technology*, 2002, 13(9): R85.
- 25 J Zhao, H Jiang, J Di. Recording and reconstruction of a color holographic image by using digital lensless Fourier transform holography [J]. *Opt Express*, 2008, 16(4): 2514–2519.
- 26 M Paturzo, A Pelagotti, A Finizio, *et al.*. Optical reconstruction of digital holograms recorded at 10.6 μm : route for 3D imaging at long infrared wavelengths [J]. *Opt Lett*, 2010, 35(12): 2112–2114.
- 27 J I Garcia-Sucerquia, J A H Ramirez, R Castaneda, *et al.*. Reduction of speckle noise in digital holography [C]. *SPIE*, 2004, 5622: 1359–1364.
- 28 J P Liu, C C Lee, Y H Lo, *et al.*. Vertical-bandwidth-limited digital holography [J]. *Opt Lett*, 2012, 37(13): 2574–2576.
- 29 Li Junchang. Introduction of digital color holographic wavefront reconstruction algorithm [J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(5): 0501001.
李俊昌. 彩色数字全息波前重建算法概论[J]. *中国激光*, 2011, 38(5): 0501001.
- 30 Lou Yuli, Li Junchang, Gui Jinbin, *et al.*. Analysis of influence caused by lens' chromatic aberration in color digital holographic system [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(4): 0409001.
楼宇丽, 李俊昌, 桂进斌, 等. 彩色数字全息系统中透镜色差影响的研究[J]. *中国激光*, 2012, 39(4): 0409001.
- 31 Cai Xiaoou, Ni Xiaojing. Study on reduction of speckle noise in reconstructed image of digital hologram [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(5): 050901.
蔡晓鸥, 倪小静. 数字全息再现像散斑噪声消除的研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(5): 050901.
- 32 A W Lohmann, D P Paris. Binary Fraunhofer holograms, generated by computer [J]. *Appl Opt*, 1967, 6(10): 1739–1748.
- 33 Yu Zuliang, Jing Guofan. *Computer Generated Holograms* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1984.
虞祖良, 金国藩. *计算机制全息图*[M]. 北京: 清华大学出版社, 1984.
- 34 M Lucente. *Diffraction-Specific Fringe Computation for Electro-Holography* [D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 1994.
- 35 H Kang, T Yamaguchi, H Yoshikawa, *et al.*. Acceleration method of computing a compensated phase-added stereogram on a graphic processing unit [J]. *Appl Opt*, 2008, 47(31): 5784–5789.
- 36 A Georgiou, T D Wilkinson, N Collings, *et al.*. An algorithm for computing spot-generating holograms [J]. *J Opt A*, 2008, 10(1): 015306.

- 37 T Shimobaba, H Nakayama, N Masuda, *et al.*. Rapid calculation algorithm of Fresnel computer-generated-hologram using look-up table and wavefront-recording plane methods for three-dimensional display [J]. *Opt Express*, 2010, 18(19): 19504-19509.
- 38 M Bayraktar, M Özcan. Method to calculate the far field of three-dimensional objects for computer-generated holography [J]. *Appl Opt*, 2010, 49(24): 4647-4654.
- 39 P Tsang, W K Cheung, T C Poon, *et al.*. Holographic video at 40 frames per second for 4-million object points [J]. *Opt Express*, 2011, 19(16): 15205-15211.
- 40 J Weng, T Shimobaba, N Okada, *et al.*. Generation of real-time large computer generated hologram using wavefront recording method [J]. *Opt Express*, 2012, 20(4): 4018-4023.
- 41 Shi Yile, Wang Hui, Wu Qiong, *et al.*. Color reproduction mechanism analysis of computer-generated color rainbow holography [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(9): 0909004.
施逸乐, 王 辉, 吴 琼, 等. 计算彩色彩虹全息术颜色复现机理分析[J]. *中国激光*, 2012, 39(9): 0909004.
- 42 Shi Yile, Wang Hui, Wu Qiong, *et al.*. Color matching of color computer-generated holography [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, 42(1): 104-109.
施逸乐, 王 辉, 吴 琼, 等. 彩色计算全息颜色匹配的研究[J]. *光子学报*, 2013, 42(1): 104-109.
- 43 D J Brady, K Choi, D L Marks, *et al.*. Compressive holography[J]. *Opt Express*, 2009, 17(15): 13040-13049.
- 44 J Hahn, S Lim, K Choi, *et al.*. Video-rate compressive holographic microscopic tomography [J]. *Opt Express*, 2011, 19(8): 7289-7298.
- 45 Han Chao, Wei Sui, Quan Xilong, *et al.*. Holographic display of digital micromirror device [J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(1): 190-194.
韩 超, 韦 穗, 权希龙, 等. 数字微镜器件的全息显示[J]. *中国激光*, 2010, 37(1): 190-194.
- 46 Xu Fuyang, Li Yong, Gao Zhiqiang. Blazing characteristics of DMD and its applications in holographic display [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, 40(3): 332-335.
许富洋, 李 勇, 高志强. 数字微镜器件闪耀特性及其在全息显示中的应用[J]. *光子学报*, 2011, 40(3): 332-335.
- 47 R Stahl, V Rochus, X Rottenberg, *et al.*. Modular sub-wavelength diffractive light modulator for high-definition holographic displays [C]. *J Phys: Conference Series*, 2013, 415(1): 012057.
- 48 N Collings, T Davey, J Christmas, *et al.*. The applications and technology of phase-only liquid crystal on silicon devices [J]. *J Display Technology*, 2011, 7(3): 112-119.
- 49 J A Davis, K O Valadéz, D M Cottrell. Encoding amplitude and phase information onto a binary phase-only spatial light modulator [J]. *Appl Opt*, 2003, 42(11): 2003-2008.
- 50 Chen Jun, Zhao Xing, Fang Zhiliang. Complex amplitude modulation using a phase-only spatial light modulator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(s1): s100205.
陈 君, 赵 星, 方志良. 基于纯相位空间光调制器的复振幅调制研究[J]. *光学学报*, 2011, 31(s1): s100205.
- 51 R Tudela, E Martin-Badosa, I Labastida, *et al.*. Full complex Fresnel holograms displayed on liquid crystal devices [J]. *J Opt A*, 2003, 5(5): S189.
- 52 J P Liu, W Y Hsieh, T C Poon, *et al.*. Complex Fresnel hologram display using a single SLM [J]. *Appl Opt*, 2011, 50(34): H128-H135.
- 53 M Makowski, A Siemion, I Ducin, *et al.*. Complex light modulation for lensless image projection [J]. *Chin Opt Lett*, 2011, 9(12): 120008.
- 54 A Siemion, M Sypek, J Suszek, *et al.*. Diffuserless holographic projection working on twin spatial light modulators [J]. *Opt Lett*, 2012, 37(24): 5064-5066.
- 55 A Jesacher, C Maurer, A Schwaighofer, *et al.*. Near-perfect hologram reconstruction with a spatial light modulator [J]. *Opt Express*, 2008, 16(4): 2597-2603.
- 56 Ge Aiming, Sui Zhan, Xu Keshou. 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, 徐克璠. 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.
- 57 Zhang Hongxin, Zhang Jian, Wu Liying. Phase modulation of liquid crystal spatial light modulator measured a Twyman-Green interferometer [J]. *Chinese J Lasers*, 2008, 35(9): 1360-1364.
张洪鑫, 张 健, 吴丽莹. 泰曼-格林干涉仪测量液晶空间光调制器的相位调制特性[J]. *中国激光*, 2008, 35(9): 1360-1364.

- 58 Li Dayu, Mu Quanquan, Hu Lifa, *et al.*. The investigation of phase dispersive characteristics about phase-only liquid crystal spatial light modulator [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, 36(6): 1065–1067.
李大禹, 穆全全, 胡立发, 等. 液晶空间光调制器相位调制的色散特性研究[J]. *光子学报*, 2007, 36(6): 1065–1067.
- 59 Lin Chao, Qian Xiaofan, Lin Bin, *et al.*. Measuring phase modulation characteristics of liquid crystal spatial light modulator based on digital holographic zoom system [J]. *J Optoelectronics·Laser*, 2012, 23(10): 1880–1884.
林超, 钱晓凡, 李斌, 等. 数字全息变焦系统测量液晶空间光调制器相位调制特性[J]. *光电子·激光*, 2012, 23(10): 1880–1884.
- 60 Zheng Huadong, Yu Yingjie, Dai Linmao, *et al.*. Correction method for phase-modulation deviation of liquid crystal spatial light modulator in full-color holographic display [J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, 59(9): 6145–6151.
郑华东, 于瀛洁, 代林茂, 等. 彩色全息显示中液晶空间光调制器位相调制偏差的矫正方法[J]. *物理学报*, 2010, 59(9): 6145–6151.
- 61 E Buckley. Holographic projector using one lens [J]. *Opt Lett*, 2010, 35(20): 3399–3401.
- 62 S Chuan, Z Cheng, C Hong, *et al.*. Holographic projection using converging spherical wave illumination [C]. 2013 Seventh International Conference on Image and Graphics (ICIG), 2013. 761–765.
- 63 Li Junchang, Fan Zebin, Tankanm Patrice, *et al.*. The study of color digital holography free from the zero-order diffraction interruption [J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60(3): 034204.
李俊昌, 樊则宾, Tankanm Patrice, 等. 无零级衍射干扰的彩色数字全息研究[J]. *物理学报*, 2011, 60(3): 034204.
- 64 H J Gerritsen, W J Hannan, E G Ramberg. Elimination of speckle noise in holograms with redundancy [J]. *Appl Opt*, 1968, 7(11): 2301–2311.
- 65 M Matsumura. Speckle noise reduction by random phase shifters [J]. *Appl Opt*, 1975, 14(3): 660–665.
- 66 J Amako, H Miura, T Sonehara. Speckle-noise reduction on kinoform reconstruction using a phase-only spatial light modulator [J]. *Appl Opt*, 1995, 34(17): 3165–3171.
- 67 L Golan, S Shoham. Speckle elimination using shift-averaging in high-rate holographic projection [J]. *Opt Express*, 2009, 17(3): 1330–1339.
- 68 T Ito, T Shimobaba, H Godo, *et al.*. Holographic reconstruction with a 10- μm pixel-pitch reflective liquid-crystal display by use of a light-emitting diode reference light [J]. *Opt Lett*, 2002, 27(16): 1406–1408.
- 69 F Yaraş, H Kang, L Onural. Real-time phase-only color holographic video display system using LED illumination [J]. *Appl Opt*, 2009, 48(34): H48–H53.
- 70 M Oikawa, T Shimobaba, T Yoda, *et al.*. Time-division color electroholography using one-chip RGB LED and synchronizing controller [J]. *Opt Express*, 2011, 19(13): 12008–12013.
- 71 Qin Yi, Zhong Jingang. Theoretical and experimental research of digital holography with partially coherent light based on light-emitting diode [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(8): 2236–2241.
秦怡, 钟金钢. 基于发光二极管的弱相干光数字全息理论与实验研究[J]. *光学学报*, 2010, 30(8): 2236–2241.
- 72 Lin Huichuan, Tao Hua, He Meng, *et al.*. Spatial coherence of high-power single-color LED [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(3): 0323003.
林惠川, 陶华, 贺盟, 等. 大功率单色LED的空间相干特性[J]. *光学学报*, 2012, 32(3): 0323003.
- 73 Liu Cuiping, Yu Jia, Li Xuyan, *et al.*. Colorimetric research on LED displaying color holograms [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, 41(2): 218–221.
刘翠萍, 于佳, 黎旭艳, 等. LED用于彩色全息图照明的色度研究[J]. *光子学报*, 2012, 41(2): 218–221.
- 74 J L Martínez, A Martínez-García, I Moreno. Wavelength-compensated color Fourier diffractive optical elements using a ferroelectric liquid crystal on silicon display and a color-filter wheel [J]. *Appl Opt*, 2009, 48(5): 911–918.
- 75 Wang Tao, Yu Yingjie, Zheng Huadong. Removal of magnification chromatism in optoelectronic full color holography [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(6): 1414–1420.
王涛, 于瀛洁, 郑华东. 彩色全息光电再现倍率色差的消除[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(6): 1414–1420.
- 76 Wang Yue, Shen Chuan, Zhang Cheng, *et al.*. Research on color holographic display with space division multiplexing based on liquid crystal on silicon [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(12): 1209001.
王岳, 沈川, 张成, 等. 基于硅基液晶的空分复用彩色全息显示研究[J]. *中国激光*, 2012, 39(12): 1209001.
- 77 M Makowski, I Ducin, M Sypek, *et al.*. Color image projection based on Fourier holograms [J]. *Opt Lett*, 2010, 35(8): 1227–1229.
- 78 K Choi, H Kim, B Lee. Full-color autostereoscopic 3D display system using color-dispersion-compensated synthetic phase holograms [J]. *Opt Express*, 2004, 12(21): 5229–5236.

- 79 M Makowski, M Sypek, I Ducin, *et al.*. Experimental evaluation of a full-color compact lensless holographic display [J]. *Opt Express*, 2009, 17(23): 20840–20846.
- 80 Shen Chuan, Zhang Cheng, Liu Kaifeng, *et al.*. Research on issues about reconstructed holographic image based on a pixelated spatial light modulator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(3): 0309001.
沈川, 张成, 刘凯峰, 等. 基于像素结构空间光调制器的全息再现像问题研究[J]. *光学学报*, 2012, 32(3): 0309001.
- 81 V Arrizon, E Carreon, M Testorf. Implementation of Fourier array illuminators using pixelated SLM: efficiency limitations [J]. *Opt Commun*, 1999, 160(4): 207–213.
- 82 Hao Zhang, Jinghui Xie, Juan Liu, *et al.*. Elimination of a zero-order beam induced by a pixelated spatial light modulator for holographic projection [J]. *Appl Opt*, 2009, 48(30): 5834–5841.
- 83 Shen Chuan, Cheng Hong, Liu Kaifeng, *et al.*. Elimination of zero-order beam in Fresnel holographic projection [J]. *J Optoelectronics·Laser*, 2013, 24(7): 1385–1391.
沈川, 程鸿, 刘凯峰, 等. 菲涅耳全息投影中零级光的消除[J]. *光电子·激光*, 2013, 24(7): 1385–1391.
- 84 M Agour, E Kolenovic, C Falldorf, *et al.*. Suppression of higher diffraction orders and intensity improvement of optically reconstructed holograms from a spatial light modulator [J]. *J Opt A*, 2009, 11(10): 105405.
- 85 D Palima, V R Daria. Holographic projection of arbitrary light patterns with a suppressed zero-order beam [J]. *Appl Opt*, 2007, 46(20): 4197–4201.
- 86 S Y Wu, J Liang, M F Becker. Suppression of the zero-order diffraction beam from computer-generated holograms produced by a DLP spatial light modulator[C]. *SPIE*, 2012, 8254: 82540C.
- 87 Liu Wenwen, Dai Yiquan, Kang Xin, *et al.*. Zero-order image elimination in digital hologram based on finite impulse response filter [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(5): 856–859.
刘雯雯, 戴宜全, 康新, 等. 基于有限脉冲响应滤波器的数字全息零级像消除[J]. *光学学报*, 2008, 28(5): 856–859.
- 88 A Michalkiewicz, M Kujawinska, T Kozacki, *et al.*. Holographic three-dimensional displays with liquid crystal on silicon spatial light modulator [C]. *SPIE*, 2004, 5531: 85–94.
- 89 J Hahn, H Kim, Y Lim, *et al.*. Wide viewing angle dynamic holographic stereogram with a curved array of spatial light modulators [J]. *Opt Express*, 2008, 16(16): 12372–12386.
- 90 T Wilkinson. Holographic 3D Displays Using Nanotubes [OL]. *SPIE Newsroom*, 2009, DOI: 10.1117/2.1200910.1833, <http://spie.org/x37820.xml>, 2009–10–26.
- 91 M Stanley, P B Conway, S D Coomber, *et al.*. Novel electro-optic modulator system for the production of dynamic images from giga-pixel computer-generated holograms [C]. *SPIE*, 2000, 3956: 13–22.
- 92 P Ferraro, S De Nicola, G Coppola, *et al.*. Controlling image size as a function of distance and wavelength in Fresnel-transform reconstruction of digital holograms [J]. *Opt Lett*, 2004, 29 (8): 854–856.
- 93 T Wang, Y Yu, H Zheng. Method for removing longitudinal chromatism in full color holographic projection system [J]. *Opt Eng*, 2011, 50(9): 091302.