

计算全息三维实时显示的研究进展

贾甲 王涌天 刘娟 李昕 谢敬辉

(北京理工大学光电学院光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100081)

摘要 计算全息三维实时显示是目前国际光学领域的研究热点之一。综述了计算全息三维显示技术研究的现状。从计算全息三维显示的原理出发,简介了全息图计算的复杂度、再现像尺寸与视场角等参数的关系以及影响再现图像质量的主要因素。分析了各种获得高质量、大图像和宽视场角的全息三维实时显示技术方案,指出了其中存在的关键问题,并对全息三维实时显示的未来进行了展望。

关键词 全息术; 计算全息; 三维实时显示; 计算速度; 视场角

中图分类号 O438.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.050002

Progress of Dynamic 3D Display of the Computer-Generated Hologram

Jia Jia Wang Yongtian Liu Juan Li Xin Xie Jinghui

(Key Laboratory of Photoelectronic Imaging Technology and System, Ministry of Education, School of Optics and Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract Computer-generated hologram (CGH) dynamic three-dimensional (3D) display is one of the hot areas in optical science and application. The research development of the CGH dynamic 3D display is reviewed. The computational complexities, relation between reconstructed image size and viewing angle, and the influence of the main factors on quality of reconstructed image are introduced. The methods of reconstructing 3D image with high quality, big size and wide viewing angle are analyzed. Prospect of holographic dynamic 3D display is also given.

Key words holography; computer-generated hologram; three-dimensional dynamic display; computation speed; view angle

OCIS codes 090.1760; 090.2870

1 引言

三维(3D)信息的获取与显示一直是人们研究的热点。计算全息三维投影显示能够完整记录和重建三维物体的波前,提供人眼视觉系统所需全部深度信息,因而是国际上裸视真三维显示技术的研究热点。与光学全息显示相比,计算全息三维投影显示具有制作简单、效率高、成本低和便于信息的存储和传输等显著优点,不仅可以显示静态的实物,而且可以显示虚拟动态物体。但是计算全息三维投影显示通常需要借助空间光调制器(SLM)来显示三维图像,因此图像的质量也受目前 SLM 的阵列大小、像素尺寸、填充率、帧频和衍射效率等性能参数的限制。SLM 按照读出光的读出方式不同,分为反射式和透射式;按照输入控制信号的不同分为光寻址(OA)和电寻址(EA);按照调制类型分为振幅型和相位型。目前市场上的 SLM 有液晶显示(LCD),数字微镜阵列(DMD)和硅基液晶(LCOS)。其中 LCOS 是近年来发展非常迅速的一类器件,它采用有源点阵反射式液晶显示技术,是 LCD 和 CMOS 集成电路的有机结合,和 LCD 相比,LCOS 具有更高的分

收稿日期: 2011-10-10; **收到修改稿日期**: 2011-10-31; **网络出版日期**: 2012-01-12

基金项目: 国家自然科学基金(61077007)、国家 863 计划(2009AA01Z309)和教育部长江学者和创新团队发展计划项目(IRT0606)资助课题。

作者简介: 贾甲(1983-),男,博士研究生,主要从事计算全息三维显示和光信息处理等方面的研究。

E-mail: jiajia0864@126.com

导师简介: 王涌天(1957-),男,教授,博士生导师,主要从事成像和照明光学系统设计及 CAD、图像处理、虚拟现实和增强现实技术、三维显示技术等方面的研究。E-mail: wyt@bit.edu.cn

辨率、开口率和衍射效率。相位型 SLM 由于具有较高的衍射效率,最近几年得到了广泛的应用。

最早成功实现全息三维投影显示的是美国麻省理工学院媒体实验室空间光学成像实验小组,他们在 1989 年开发了以扫描声光调制器为核心的第一代全息投影显示系统^[1],其后几年先后开发了第二代和第三代全息投影显示系统,其中第三代系统可以显示尺寸为 80 mm×60 mm×80 mm、视场角为 24°的三维图像^[2]。但是由于声光调制器是一个一维装置,必须通过扫描镜来获取水平和垂直的图像,在使用时受到了限制。

美国德克萨斯州西南大学医学中心于 2003 年建立了一套利用 DMD 芯片的全息动态投影显示系统^[3]。将计算全息图加载到 DMD 上,通过数字微反射镜对入射光场的调制,实现变距离的三维投影,生成的实像利用凝胶媒质接收,虚像则可用眼睛直接观察。但由于 DMD 像素数较少,重建图像的尺寸和分辨率都较低,制约了其在全息投影显示系统中的应用。

日本千叶大学的 Shimobaba 等^[4]和日本 Hyogo 大学的 Sato 等^[5]分别于 2003 年和 2006 年利用时分法实现单片 LCD 的真彩色全息显示。但是这种方法只能再现静态的图像,动态图像的再现则需要具有更高帧频速率的 LCD。2004 年,Ito 等^[6]应用红绿蓝(RGB)三色 LED 光源合成多色光源,同样采用单片 LCD 实现了三维真彩色全息像显示。2009 年,他们又使用 RGB 三片 LCD 实现了三维真彩色全息像显示^[7]。这种方法需要再现的三原色像非常好地重合在一起,需精细校准,对实验要求比较高。

2005 年,波兰和美国的研究人员利用相位型 LCOS 实现了三维物体的全息投影显示^[8]。但是受当时 LCOS 的空间分辨率所限,重建的三维图像质量较差。

英国 Qinetiq 公司和剑桥大学高级光子和电子技术中心于 2004 年利用电寻址液晶 SLM 和光寻址的双稳态液晶 SLM 研制了一台视频显示的数字全息投影显示系统^[9,10],全息图衍射窗孔的面积达 136 mm×34 mm,像素数超过 100 M,以 30 Hz 帧速刷新,可以视频方式显示宽度大于 300 mm 的全视差三维彩色图像。但是该系统比较复杂且造价高昂。

国内多所高校及科研单位也相继开展了全息显示方面的工作,取得了一定的进展。北京理工大学在三维物体建模、数字全息图设计计算、应用纯相位调制 LCOS 投影显示^[11]、消除零级衍射^[12]、解决全息三维显示体视遮挡^[13]、增大图像尺寸^[14]、实现复振幅调制和快速算法等方面进行了深入细致的研究并取得了初步成果。安徽大学开发了一套以 DMD 为核心的数字全息光学再现装置,计算生成的全息图加载至 DMD,在激光照射下产生原物的全息像^[15]。浙江师范大学在彩色全息显示、三维场景消隐等算法上取得了一定的进展^[16,17]。中山大学实现了基于三维实景的三角形面片导向型全息编码算法^[18]。上海大学的课题组利用 RGB 序列相息图对真彩色显示问题进行了研究^[19]。

计算全息三维显示发展至今,尽管在各方面取得了进展,但有两个问题始终制约着它的进一步发展:一个是全息图的计算速度达不到实时显示的要求;另一个是受目前市场光电显示器件的限制,无法获得大尺寸和大视场角的三维图像。为了解决这些问题,科学家们仍在不懈努力。已提出了各种方案,但目前尚未见到关于这些技术方案的归纳整理和总结的文献报道。

本文从计算全息三维显示的原理出发,分析了全息图计算过程的复杂度、再现像尺寸与视场角的关系以及影响因素,重点阐述了提高计算全息三维显示图像性能的技术方法,并对这些技术存在的问题进行了分析和讨论。通过对这些技术方法进行总结,展望了进一步研究的未来趋势。

2 计算全息三维显示原理

计算全息三维显示技术是全息术与计算机显示技术的有机结合。通过计算机模拟计算出三维物体在全息面上的复振幅分布,然后将振幅或者相位加载到 SLM 上,由再现光重建出三维物体的波前。点源法是一种简单灵活的计算复振幅的方法,也是目前使用最多的方法之一。

点源法基于一个基本假设,即认为被记录的物体是理想的漫散射体,三维物体被看作是由 n 个点光源组成,每个点光源发出的漫射光均匀地照射在整个全息面上。

设被记录三维物体与全息图的空间坐标分别为 XOY 和 $X'O'Y'$,每个点源的坐标为 (x_j, y_j, z_j) ,如图 1 所示。全息图上的复振幅分布可表示为

$$H(x', y') = \sum_{j=0}^{N-1} \frac{A_j}{r_j} \exp[i(kr_j + \phi_j)], \quad (1)$$

式中 $r_j = \sqrt{(x' - x_j)^2 + (y' - y_j)^2 + z_j^2}$ 表示物体上第 j 点 (x_j, y_j, z_j) 距全息图上 $(x', y', 0)$ 像素的距离, N 为三维物体离散的点数, A_j 和 ϕ_j 分别表示第 j 个点的光强和初始相位, $k = 2\pi/\lambda$ 表示波数, λ 是记录光的波长。

由(1)式可以看出,计算全息图时三维物体上每个点需要遍历全息面上的所有像素。每次遍历,(1)式都被计算一遍。如果有 N 个点, M 个像素,那么(1)式共需要计算 $N \times M$ 次,这将非常耗时。

计算全息三维显示的另一个重要性能指标是再现三维像的大小与视场角,主要由目前市场上 SLM 阵列大小、像素尺寸以及再现光路决定。它们的关系如图 2 所示。 d 为再现像的大小,可由下式求得:

$$d = f\lambda/p, \quad (2)$$

式中 f 为透镜焦距, p 为 SLM 像素尺寸大小。要想获得较大的再现像,就需要更小的像素尺寸和更大的透镜焦距。

由图 2 的几何关系可以得出再现像视场角的表达式为

$$\Delta\theta = \arctan\left(\frac{w}{2f}\right), \quad (3)$$

式中 w 表示 SLM 阵列的大小。再现像的视场角与 SLM 阵列大小成正比,而与透镜焦距成反比。由(2)式和(3)式得出再现像的尺寸和视场角的关系为

$$\Delta\theta d = \frac{w\lambda}{2p} = \frac{M\lambda}{2}, \quad (4)$$

式中 M 为 SLM 的像素数。

由(4)式可以看出,图像大小和视场角是一对互相制约的参数,并且只与像素数 M 有关。在波长为 632.8 nm 的情况下,要想获得尺寸为 300 mm×300 mm×300 mm,水平与垂直视场角均为 30°的三维图像,根据(4)式可以计算出需要的像素数至少为 10^{12} ,因此,要想获得大尺寸和大视场角的三维图像就需要大阵列的显示设备。但是目前市场上主流的 SLM 设备商如 BNS 和 HOLOEYE 仅能提供像素数分别为 512 pixel×512 pixel 和 1920 pixel×1080 pixel 的纯相位型 SLM。

3 提高计算全息三维显示性能的技术进展

3.1 提高计算速度的技术

在基于点源法的计算全息三维显示技术中,为了精确表示一个三维物体,通常需要将其离散成大量的点,这就会增加计算全息图的计算时间。如果要再现一个动态的三维图像,就需要计算速度达到 25 frame/s,但在传统的计算方法下计算速度显然达不到这个要求,因此必须提高计算全息图的速度。在其他计算全息图的方法中同样存在这样的问题。此外,要想实现三维动态显示,还需要帧频速率较高的 SLM。

目前提高计算速度的方法一方面是使用高性能的计算机设备。Ito 等^[20,21]开发出专门用来加速计算的硬件设备 HORN 系列,其计算速度比当时普通计算机的计算速度提高了 1000 倍左右。最近,图形处理器(GPU)的高计算性能引起了人们的广泛关注,科学家们纷纷利用 GPU 来对全息图的计算进行加速。Ahrenberg 等^[22]用 GPU 计算 960 pixel×600 pixel 的全息图,10000 个点的计算时间缩短到 1 s。Shimobaba 等^[23]最近比较了目前市场上 GPU 主要生产厂商 ATI 和 NVIDIA 生产的 GPU 的计算性能及在 CUDA 和 OpenCL 两个主流设备架构下的计算能力。实验数据表明,在 OpenCL 架构下使用 ATI 生产的 GPU 计算能力更强。

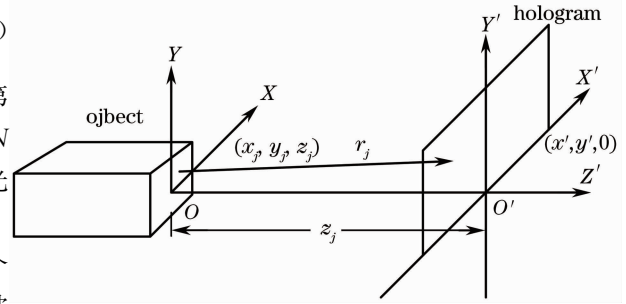


图 1 三维计算全息记录示意图

Fig. 1 Diagram of computer-generated hologram for recording a 3D object

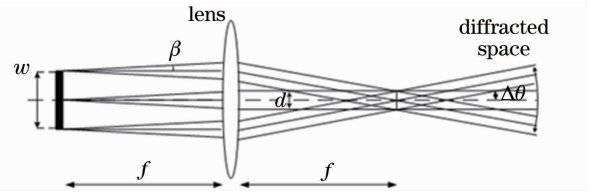


图 2 再现像大小、视场角与 SLM 阵列大小的关系

Fig. 2 Relation among the size and viewing angle of reconstructed image and the size of SLM array

利用硬件进行加速计算,给未来集成化、小型化的产品设计带来了困难,显然科技工作者希望能摆脱对硬件的依赖,因此他们通过改进算法来提高计算速度。由计算全息三维显示原理可知,计算速度主要消耗在开平方、平方等高消耗的运算符以及不同点不同像素相位值的多次计算上。Matsushima 等^[24]利用递归的方法来计算点到全息面的距离,这样用加减法来替代(1)式中的开平方,平方等耗时的运算,使速度提高了2~3倍。但是这样的速度显然还达不到实时显示的速度。Yamaguchi 等^[25~28]提出并发展了附加相位体视全息图(PAS),该方法类似于体视全息图,首先将整个全息图划分成若干个子全息块,每一块所记录的数据并不是类似于体视全息图记录的二维视差图像,而是三维图像,其在整个子全息图的相位分布用其中一个点的相位来近似。由于使用了快速傅里叶变换以及减少了相位的计算,提高了全息图的计算速度,但是由于使用均一的相位来表示所有物点在整个子全息图上的相位分布,不够精确,降低了再现像的质量。Shimobaba 等^[29]提出了一种简单的快速算法,该算法在物面及全息面之间加入一个波前记录面。计算时首先计算物点在波前记录面的复振幅分布,然后利用快速傅里叶变换求得全息图。由于波前记录面离物面很近,受到衍射极限的限制,每个物点只对波前记录面的有限范围有贡献,因此不需要计算整个记录面,这也是提高速度的关键。以上这几种算法虽然能提高速度,但都不同程度地降低了再现像的质量。

麻省理工学院的 Lucente^[30]提出查找表格(LUT)的方法,该方法首先计算大量的空间点的全息图,将其保存在硬盘或内存里,待再现三维物体时,只需查找对应已存的全息图调用叠加即可,无需在线计算,从而在不降低再现像质量的情况下提高了计算速度,但是该方法需要占用大量的存储空间。韩国的 Kim 等^[31~33]发展了该方法,降低了对内存及存储空间的要求。最近,新加坡国立大学的 Pan 等^[34]提出了 S-LUT (split lookup table)的方法,该方法先求出全息 x, y 方向的调制因子,将其存储在存储空间里,再现三维物体时,只需调用这两个方向的调制因子就能得出物体的全息图。该方法不仅减少了存储空间而且进一步提高了速度。在 GPU 中达到了每秒 20000 个点的速度。将算法与高性能计算机相结合的方法是提高计算速度的有效手段,也是未来发展的主要趋势。

3.2 增大计算全息三维显示视场角和再现像尺寸的技术

由(4)式可知,获得大视场角和大尺寸的像的方法主要是增大 SLM 的像素数。因此目前的主要手段是利用多 SLM 拼接来再现三维图像。

3.2.1 多空间光调制器拼接的方法

利用现有的 SLM 来增加像素数,第一个办法就是通过多个 SLM 拼接来实现。为了获得连续的不同视场角的图像,需要所有像素无缝紧密地排列在一起。直接将各个 SLM 并排摆放,由于 SLM 外部紧固框及外延电路的存在,各 SLM 之间的像素不可能达到无缝的拼接,因此再现的三维图像会出现跳变的现象。

Fukaya 等^[35,36]利用半透半反镜实现了多振幅型 LCD“无缝”拼接,其实验装置如图 3 所示。

将 5 个 LCD 交错放置在半透半反镜两侧,从透镜和柱面镜的像方望去就好像 5 个 LCD 并排无缝地摆放在一起。但是这种方法无法同时在水平方向和垂直方向上都进行拼接,根据人眼观察的习惯,只在水平方

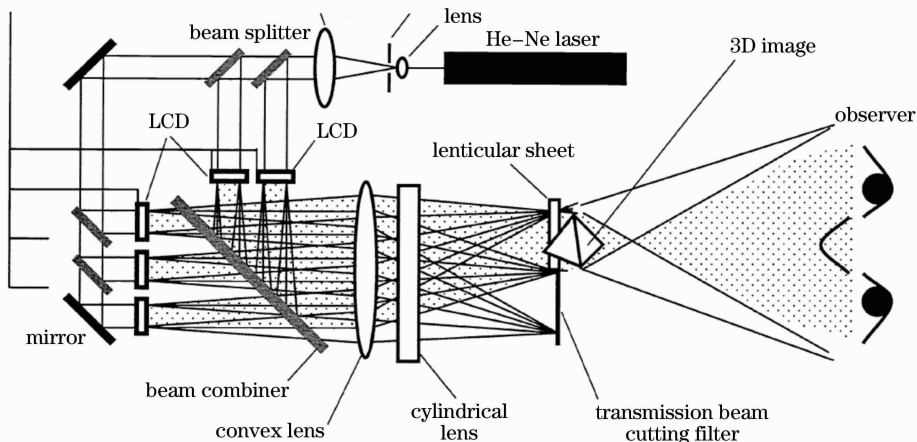


图 3 利用半透半反镜实现了 LCD“无缝”拼接示意图

Fig. 3 Diagram of the LCD slitless tiling system using beam splitter

向上进行了拼接。由于多 LCD 沿一个方向拼接,增大了视场,需要大孔径的透镜去拟合成像,这时再现的像会产生畸变。而且这种按照平面进行排列的方式,由于增大了全息面,那么在计算全息图时,全息图边缘会记录物体的高频信息,但是 SLM 的衍射能力是有限的,可能无法再现物体的这些高频信息,也就失去了拼接的意义。因此这种排列方式只能记录和再现大尺寸的三维物体,使加载到每个 SLM 的全息图只记录物体的部分信息,再现时通过缩小三维物体的尺寸来获得较大视场角。此外,该系统光能利用率较低,损失了一定的光能量。

为了克服平面排列 SLM 的缺点,Hahn 等^[37]借鉴了体视对全息图的方法,将每个振幅型 SLM 视作一个窗口,通过将多个 SLM 倾斜排列成一个圆弧来扩大视场角,其示意图和装置实物图如图 4,图 5 所示。

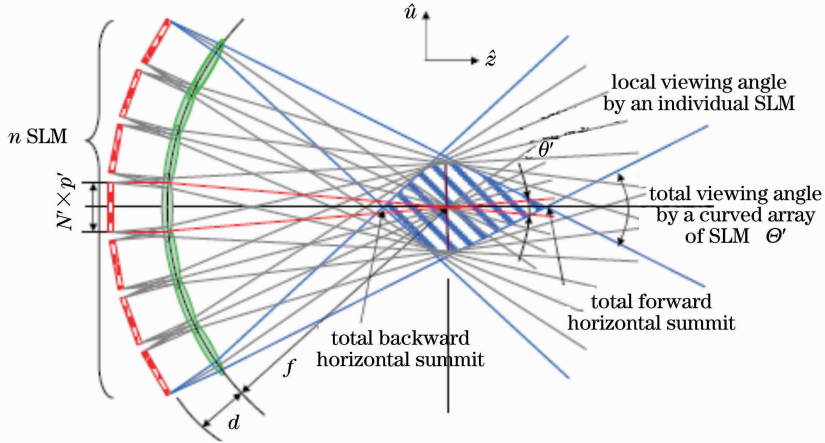


图 4 倾斜排列多个 SLM 来扩大视场角示意图

Fig. 4 Diagram of enlarging viewing angle system by curved array of SLM

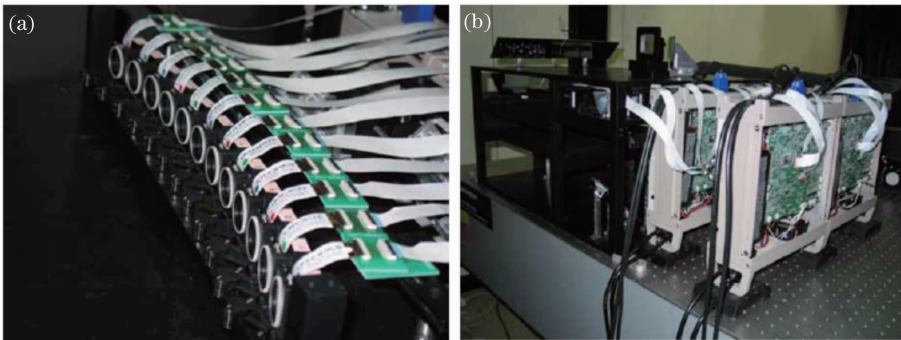


图 5 实验装置图。(a) 倾斜排列的多个 SLM; (b) 整套实验装置图

Fig. 5 Pictures of (a) the curved array of SLM and (b) the whole experimental system

每一个倾斜的 SLM 加载一幅含有三维物体某个视角信息的全息图。观察时,将每个 SLM 当作一个窗口,从不同窗口就看到了相应视角的三维图像。该装置共用 12 个 SLM 进行拼接,获得了 22.8° 的视场角。但是该系统为了实现多 SLM 的无缝拼接,应用了结构复杂的光学系统。

2011 年,土耳其的研究小组开发出弧形全息视频显示系统^[38]如图 6 所示,该系统使用多 SLM 倾斜拼接方法,利用半透半反镜消除 SLM 间的缝隙,扩大了再现三维像的视场角,获得了再现像尺寸 10 mm,视场角 24° 的三维像。该设计系统结构相对简单,易于实现。

采用多 SLM 拼接技术虽然能够扩大视场角,但系统本身都比较复杂,成本也比较高,同时对多 SLM 的无缝拼接技术要求比较高。如果要再现彩色的三维图像,将会进一步增加系统的复杂度,不易产品化。

3.2.2 单空间光调制器时分复用法

考虑到多 SLM 拼接增加系统成本及复杂度,研究者考虑利用单 SLM 通过时分复用法来扩大再现像的尺寸及视场角。该方法使用单个高频 SLM,将不同视角的图像按照时序投射到相应的观察位置,利用人眼暂留特性,就能在一定的视角范围内观察到三维图像。由此可以降低系统的复杂度和成本,但是对 SLM 的

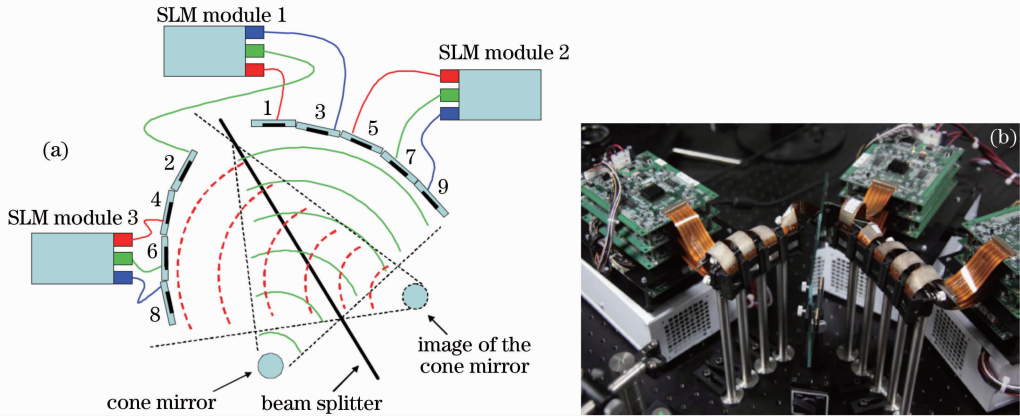


图 6 弧形全息视频显示系统。(a)示意图;(b)实验装置图

Fig. 6 Circular holographic video display system. (a) Diagram; (b) experimental setup

帧频速率要求比较高。

英国剑桥大学的 Chen 等^[39]搭建了时分复用的系统,该系统将多个全息图按照一定时序加载到单个振幅型 SLM 上,用多角度照明光按照相应的时序照射 SLM,通过后续光路将投射出的各个视角的图像拟合到一起。实验光路示意图如图 7 所示。

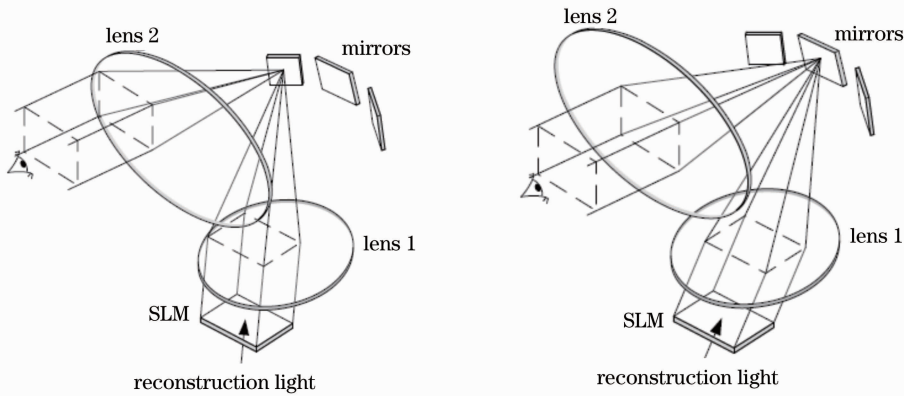


图 7 利用时分法扩大视场角示意图。(a),(b)为不同时刻的光路示意图

Fig. 7 Diagram of enlarging viewing angle system by time division. The SLM is illuminated by light from different angles at different time in (a) and (b)

透镜 1 和透镜 2 为共焦系统,将反射镜放在两个透镜共焦面上,一个反射镜反射从 SLM 投影出经由透镜 1 会聚的一个视角的图像,最后所有反射的各个视角的图像经过透镜 2 拟合在一起供人眼观察。利用该方法只能增大有限的视场角,要想获得更大的视场角就需要更高帧频的速率,同时也会增加系统的复杂度,这也是时分复用法的共同特点。

3.2.3 时分和空分复用相结合的方法

由英国 Qinetiq 公司和剑桥大学高级光子和电子技术中心研制的实时全息投影显示系统结合了上述两种方法并取得了很好的显示效果,装置示意图及再现效果如图 8 所示^[9,10]。该系统利用电寻址 SLM 分时地将子全息图通过复制光组的开关和投射作用投射到光寻址 SLM 上,利用光寻址 SLM 的大阵列、较高的分辨率及目前可以达到的较快的刷新速率(30 Hz),获得了较大尺寸、较大视角和较高分辨率的再现效果,代表了计算全息三维显示的最高水平,但是系统比较复杂且造价高昂。

3.2.4 其他方法

Takaki 等^[40]提出利用 $4f$ 系统来扩大视场角的方法,其装置示意图如图 9 所示。

首先用横向排列的 4 个点光源照射 SLM,在经过傅里叶变换透镜 1 后,其傅里叶变换图像较 SLM 直接经过傅里叶变换得到的图像在横向方面增大了 4 倍,从而增加了全息图的横向分辨率,增大了视场角,但是

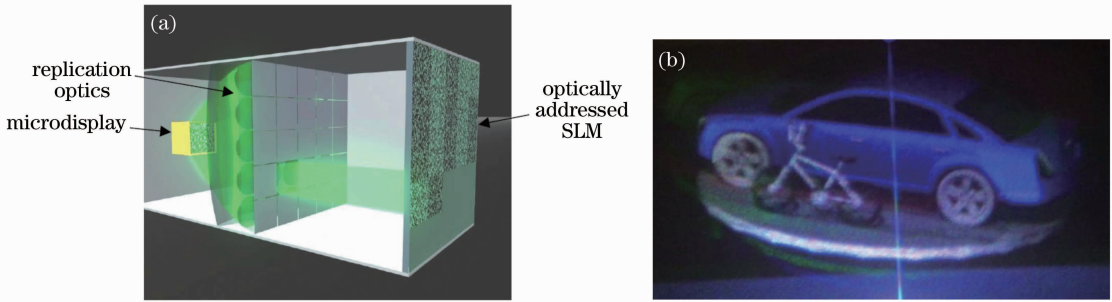


图 8 Active tiling 显示系统。(a) 系统结构；(b) 三维显示图像

Fig. 8 Active tiling system. (a) System structure; (b) reconstructed 3D image

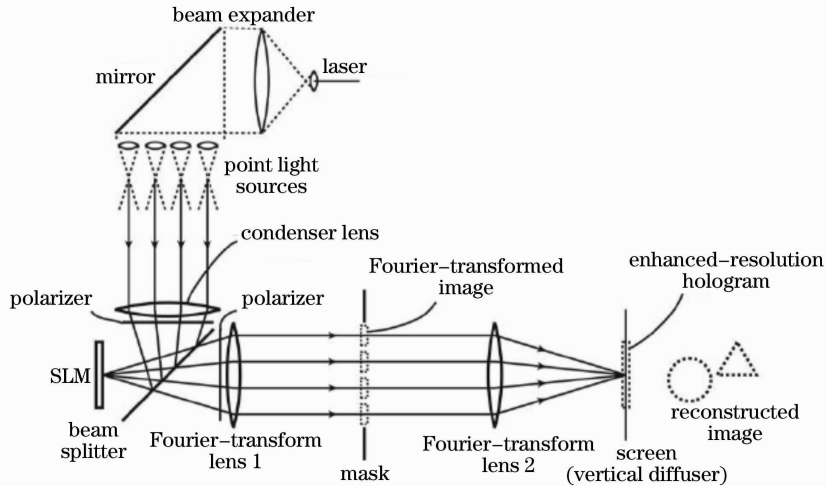


图 9 利用 $4f$ 系统增大视场角的实验装置图

Fig. 9 Experimental setup diagram of the enlarging viewing angle system by $4f$ system

却减小了垂直方向的视场角。

综上所述,目前报道的方法虽然在一定程度上增大了再现图像的尺寸和视场角,但是还没有一种方法能摆脱显示器件的限制而有效提高再现图像的三维尺寸与视场角。

4 结束语

计算全息三维显示技术是一种非常理想的真三维裸视立体显示技术。虽然在算法及实验设备等方面都取得了很大的进展,但该技术尚未得到本质上的突破,仍然无法进入实际的应用阶段。其主要原因是全息图的计算速度达不到实时显示的要求,从目前研究进展看,解决办法集中在开发出快速算法以及使用超级计算机。由于全息图计算的高度并行性,利用 GPU 计算逐渐成为主要的计算模式。另一个原因是受到目前计算全息三维显示器件的限制,无法获得大尺寸和大视场角的三维图像。在利用现有光电显示器件的前提下,解决办法是使用多 SLM 拼接的技术,但这种方法会增加系统的成本及复杂度。而利用时分复用的方法则要求高帧频的 SLM。此外,该技术还面临着相干光源、光电显示器件引起的像噪声与真彩色显示等问题,还需针对这些问题进行深入研究。如果出现可以承载计算全息三维显示投射出的实像的介质或者光电显示器件得到质的飞跃,相信在不久的将来计算全息三维显示技术将会给三维显示界带来前所未有的突破。

参 考 文 献

- 1 P. St. Hilaire, S. A. Berton, M. Lucente *et al.*. Electronic display system for computational holography[C]. *SPIE*, 1990, **1212**: 174~182
- 2 Daniel E. Smalley, Quinn Y. J. Smithwick, V. Michael Bove Jr.. Holographic video display based on guided-wave acousto-optic devices[C]. *SPIE*, 2007, **6488**: 64880L

- 3 M. Huebschman, B. Munjuluri, H. Garner. Dynamic holographic 3-D image projection[J]. *Opt. Express*, 2003, **11**(5): 437~445
- 4 Tomoyoshi Shimobaba, Tomoyoshi Ito. Color holographic reconstruction system by time division multiplexing with reference lights of laser[J]. *Opt. Rev.*, 2003, **10**(5): 339~341
- 5 Kunihiro Sato, Atsuhiko Sugita, Masakazu Morimoto *et al.*. Reconstruction of full-color images with a RGB time-sharing holographic display system[C]. *SPIE*, 2006, **6030**: 603004
- 6 Tomoyoshi Ito, Koji Okano. Color electroholography by three colored reference lights simultaneously incident upon one hologram panel[J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(18): 4320~4325
- 7 Atsushi Shiraki, Naoki Takada, Masashi Niwa *et al.*. Simplified electroholographic color reconstruction system using graphics processing unit and liquid crystal display projector[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(18): 16038~16045
- 8 Aneta Michalkiewicz, Malgorzata Kujawinskaa, Jerzy Kęrzela *et al.*. Phase manipulation and optoelectronic reconstruction of digital holograms by means of LCOS spatial light modulator[C]. *SPIE*, 2005, **5776**: 144~152
- 9 C. Slinger, C. Cameron, S. Coomber *et al.*. Recent developments in computer-generated holography: toward a practical electroholography system for interactive 3D visualization[C]. *SPIE*, 2004, **5290**: 27~41
- 10 Stanley Maurice, Mark A. G. Smith, Allan P. Smith *et al.*. 3D electronic holography display system using a 100-megapixel spatial light modulator[C]. *SPIE*, 2004, **5249**: 297~308
- 11 Hao Zhang, Jinghui Xie, Juan Liu *et al.*. Optical reconstruction 3D images by use of pure-phase computer generated holograms[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, **7**(12): 1101~1103
- 12 H. Zhang, J. Xie, J. Liu *et al.*. Elimination of zero-order beam induced by pixelated spatial light modulator for holographic projection[J]. *Appl. Opt.*, 2009, **48**(32): 5834~5841
- 13 Hao Zhang, Neil Collings, Jing Chen *et al.*. Full parallax 3D display with occlusion effect using computer generated hologram[J]. *Opt. Engng.*, 2011, **50**(7): 074003
- 14 J. Jia, Y. Wang, J. Liu *et al.*. Magnification of three-dimensional optical image without distortion in dynamic holographic projection[J]. *Opt. Engng.*, 2011, **50**(11): 115801
- 15 Tu Zhengzheng, Tang Jin, Shi Dong. Dynamic holographic stereogram display based on DMD and fractional Fourier transform[J]. *Computer Technology and Development*, 2009, **19**(8): 247~249
涂铮铮, 汤进, 史东. 基于DMD和分数傅里叶的动态全息体视图显示[J]. *计算机技术与发展*, 2009, **19**(8): 247~249
- 16 Jin Hongzhen, Lou Yimin, Wang Hui *et al.*. Integral color hologram of virtual 3D object generated by integral photography [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(5): 1304~1309
金洪震, 楼益民, 王辉等. 基于集成照相术制作虚拟三维物体彩色全息图的新方法[J]. *中国激光*, 2010, **37**(5): 1304~1309
- 17 Li Yong, Su Xianyu, Wang Hui *et al.*. Research on hidden surface of complex scenes in digital hologram[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(4): 591~594
李勇, 苏显渝, 王辉等. 复杂三维场景数字全息图隐藏面问题研究[J]. *光子学报*, 2006, **35**(4): 591~594
- 18 Yuan-Zhi Liu, Jian-Wen Dong, Yi-Ying Pu *et al.*. High-speed full analytical holographic computations for true-life scenes [J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(4): 3345~3351
- 19 Huadong Zheng, Tao Wang, Linmao Dai *et al.*. Holographic imaging of full-color real-existing three-dimensional objects with computer-generated sequential kinoforms[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2011, **9**(4): 040901
- 20 T. Ito, T. Shimobaba. One-unit system for electroholography by use of a special-purpose computational chip with a high-resolution liquid-crystal display toward a three-dimensional television[J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(9): 1788~1793
- 21 T. Ito, N. Masuda, K. Yoshimura *et al.*. Special-purpose computer HORN-5 for a real time electroholography[J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(6): 1923~1932
- 22 L. Ahrenberg, P. Benzie, M. Magnor *et al.*. Computer generated holography using parallel commodity graphics hardware [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(17): 7636~7641
- 23 Tomoyoshi Shimobaba, Tomoyoshi Ito, Nobuyuki Masuda *et al.*. Fast calculation of computer-generated-hologram on AMD HD5000 series GPU and OpenCL[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(10): 9955~9960
- 24 Kyoji Mateushima, Masahiro Takai. Recurrence formulas for fast creation of synthetic three-dimensional holograms[J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(35): 6587~6594
- 25 Masahiro Yamaguchi, Hideshi Hoshino, Toshio Honda *et al.*. Phase added stereogram; calculation of hologram using computer graphics technique[C]. *SPIE*, 1993, **1914**: 25~33

- 26 Hoonjong Kang, Tomohiko Fujii, Takeshi Yamaguchi *et al.*. Compensated phase-added stereogram for real-time holographic display[J]. *Opt. Engng.*, 2007, **46**(9): 095802
- 27 Hoonjong Kang, Takeshi Yamaguchi, Hiroshi Yoshikawa. Processing techniques for quality improvement of phase added stereogram[C]. *SPIE*, 2007, **6488**: 648818
- 28 Hoonjong Kang, Takeshi Yamaguchi, Hiroshi Yoshikawa. Accurate phase-added stereogram to improve the coherent stereogram[J]. *Appl. Opt.*, 2008, **47**(19): D44~D54
- 29 Tomoyoshi Shimobaba, Hirotaka Nakayama, Nobuyuki 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
- 30 M. Lucente. Interactive computation of holograms using a look-up table[J]. *J. Electron. Image*, 1993, **2**(1): 28~34
- 31 S. C. Kim, E. S. Kim. Fast computation of hologram patterns of a 3D object using run-length encoding and novel look-up table methods[J]. *Appl. Opt.*, 2009, **48**(6): 1030~1041
- 32 S. C. Kim, J. H. Yoon, E. S. Kim. Fast generation of three-dimensional video holograms by combined use of data compression and lookup table techniques[J]. *Appl. Opt.*, 2008, **47**(32): 5986~5995
- 33 S. C. Kim, E. S. Kim. Effective generation of digital holograms of three-dimensional objects using a novel look-up table method[J]. *Appl. Opt.*, 2008, **47**(19): D55~D62
- 34 Y. C. Pan, X. W. Xu, S. Solanki *et al.*. Fast CGH computation using S-LUT on GPU[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(21): 18543~18555
- 35 N. Fukaya, K. Maeno, O. Nishikawa *et al.*. Expansion of the image size and viewing zone in holographic display using liquid crystal devices[C]. *SPIE*, 1995, **2406**: 283~289
- 36 K. Maeno, N. Fukaya, O. Nishikawa *et al.*. Electro-holographic display using 15 mega pixels LCD[C]. *SPIE*, 1996, **2652**: 15~23
- 37 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
- 38 Fahri Yaras, Hoonjong Kang, Levent Onural. Circular holographic video display system[J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(10): 9147~9156
- 39 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*, 2009. 1~4
- 40 Y. Takaki, Y. Hayashi. Increased horizontal viewing zone angle of a hologram by resolution redistribution of a spatial light modulator[J]. *Appl. Opt.*, 2008, **47**(19): D6~D11