

文章编号 2095-1531(2015)02-0227-07

## 空间光调制器曲面拼接实现全息 三维显示视角拓展

曾震湘, 郑华东, 卢小仟, 高洪跃, 于瀛洁\*  
(上海大学 精密机械工程系应用 光学与检测实验室, 上海 200072)

**摘要:** 本文对多空间光调制器不同拼接方式拓展全息三维再现像视角的方法进行了分析, 基于多片空间光调制器拼接拓展视角的思想, 利用平面反射镜、分光镜和两片透射式空间光调制器设计了曲面拼接系统, 进行了全息三维再现像的视角拓展实验研究。用该系统对四棱锥物体的层析菲涅尔衍射全息图进行再现, 结果表明, 总视角由基于单片空间光调制器的  $1.7^\circ$  增大到  $3.2^\circ$ , 即拓展到约 1.9 倍, 分光镜能够消除两片空间光调制器间的间隙, 实现无缝拼接。该方法同样适用于更多空间光调制器的曲面拼接中, 可以有效地拓展全息再现像的视场角大小。

**关键词:** 全息显示; 空间光调制器; 曲面拼接; 视角拓展

中图分类号: O438.1 文献标识码: A doi: 10.3788/CO.20150802.0227

## Viewing angle enlargement in holographic 3D display by spatial light modulators tiling in curved configuration

ZENG Zhen-xiang, ZHENG Hua-dong, LU Xiao-qian, GAO Hong-yue, YU Ying-jie\*

(Laboratory of Applied Optics and Metrology, Department of Precision Mechanical  
Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

\* Corresponding author, E-mail: yingjieyu@staff.shu.edu.cn

**Abstract:** In this paper, we analyzed the principles of tiling SLMs to enlarge the viewing angle of holographic 3D reconstructions. Based on the idea of tiling multi-SLMs, we designed a holographic 3D display system using planar mirrors, beam splitters and two transmission-type SLMs tiled in curved configuration to enlarge the viewing angle of reconstructed image. We calculated computer-generated holograms of a pyramid using slice-based Fresnel diffraction algorithm, and reconstructed it with self-setup holographic display system. The results indicate that, in contrast to  $1.7^\circ$  of viewing angle obtained by a single SLM, the viewing angle of holographic reconstructed images is enlarged to  $3.2^\circ$  with 2 tiling transmission-type SLMs by about 1.9 times. The

收稿日期: 2014-12-11; 修订日期: 2015-02-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 61235002, No. 61101176, No. 11474194), 上海市高等院校青年教师培养  
资助项目 (No. ZZSD12014), 上海市教委创新团队资助项目

beam splitter can remove the gap of two SLMs' active areas to realize seamless tiling. This method is also applicable to tile more SLMs in curved configuration and can effectively enlarge the viewing angle of holographic display.

**Key words:** holographic display; spatial light modulators; tiling in curve configuration; viewing angle enlargement

## 1 引言

近年来,三维显示技术越来越受到人们的重视<sup>[1-4]</sup>。全息三维显示技术能够完整地记录和重建三维物体的波前,提供人眼视觉系统所需的全部信息,因而成为国内外真三维显示技术的研究热点<sup>[5-7]</sup>。由于能够灵活地对光波波前进行调制,空间光调制器(SLM)被广泛应用于全息光电显示中,但成像的质量也受目前SLM的像素尺寸、阵列大小、填充率和帧频等性能参数的限制,其中之一表现为再现像的可视角度较小,无法达到理想的三维显示效果。

为了增大基于SLM的全息三维显示再现像的视角,国内外研究者们不懈努力,已经提出了许多视角拓展方法,主要分为以下几类:(1)多SLM空间拼接的方法。如J. Hahn等人<sup>[8]</sup>将12片SLM排列成一个曲线式阵列获得了 $22.8^\circ$ 的再现像视角;F. Yaras等人<sup>[9]</sup>利用半透半反镜将9个倾斜的反射式SLM无缝拼接到一起获得了视角为 $24^\circ$ 的动态三维再现像;T. Kozacki等人<sup>[10-11]</sup>提出了基于6片反射式SLM增大视角的全息显示系统;浙江师范大学的王辉教授等人<sup>[12]</sup>采用3片透射式SLM平面拼接扩大了全息再现像的可视角度,这类方法能够有效地扩大再现像视角,但多SLM拼接系统的成本较高,且对多SLM的无缝拼接技术要求比较高;(2)单SLM时分复用的方法。如英国剑桥大学的R. Chen等人<sup>[13]</sup>利用反射镜组将时序再现的子全息像拼接到一起达到增大视角的目的;中山大学的Y. Z. Liu等人<sup>[14]</sup>提出基于水平4f系统的等效曲面SLM阵列(ECSA)全息显示系统将单个SLM的再现像视角增大到3.6倍,这类方法通过单个的SLM也能获得较大的视

场角,但对SLM的帧频率要求比较高,不利于实现动态显示,且不同时刻再现像的拟合光路复杂,易造成再现像的闪烁;(3)时分和空间复用相结合的方法。如英国M. Stanley等人<sup>[15]</sup>提出了基于SLM多通道组合技术的Active Tiling TM(AT)全息3D立体显示系统;T. Kozacki等人<sup>[16]</sup>提出一种利用6+1片反射式SLM时空复用方法扩大再现像视角的方法;中山大学D. D. Teng等人<sup>[17]</sup>采用时分和空分复用相结合的方法用2片SLM来拓展再现像水平视角,这类方法能够显著的增大再现像视角,但多SLM组合的结构复杂,成本高,且不利于实现动态显示;(4)基于4F系统。如Y. Takaki等人<sup>[18-19]</sup>提出利用4f系统实现SLM分辨率重组的方法来扩大视角,该方法能增大水平方向的视角,但会损失垂直方向的视角;(5)基于扫描的方法。如Y. Takaki等人<sup>[20-21]</sup>结合4f系统开发了一个以高帧频DMD为核心的扫描全息三维显示系统,该方法能够获得大尺寸、宽视角的再现像,但要求高帧频的SLM,且机械扫描装置会影响成像精度。

综上所述,基于多SLM空间拼接的方法能够有效地增大再现像视角,且不会损失SLM的帧频率,不会影响成像质量。本文首先分析了基于多SLM空间拼接的全息三维显示视角拓展方法的基本原理,然后利用平面反射镜和分光镜设计了适用于透射式SLM曲面拼接的全息三维显示实验系统,进行全息三维再现像的视角拓展方法研究。

## 2 基于多SLM的全息三维显示视角拓展原理

全息再现像的视角大小是评判全息光电显

示系统的一个重要指标,而视场角的大小与 SLM 的像素尺寸大小密切相关。图 1 为单个 SLM 被准直光照射后,其最大衍射角  $\theta_{d,max}$  与全息再现像视场角  $\theta$  的关系,即:

$$\theta = 2\theta_{d,max} = 2\arcsin(\lambda/2p), \quad (1)$$

式中,  $\lambda$  为入射光的波长,  $p$  为 SLM 的像素尺寸大小。以像素尺寸为  $8 \mu\text{m}$  的 SLM 为例,在波长为  $532 \text{ nm}$  的绿光照射下,其最大衍射角约为  $1.9^\circ$ ,因此全息再现像的视场角大小约为  $3.8^\circ$ 。可以看到,由于受到目前工艺的限制,制得更小像素尺寸的 SLM 比较困难,因而不能得到更大的衍射角,致使单台 SLM 的全息再现像的视场角较小。

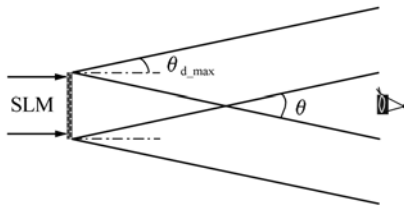


图 1 单个 SLM 再现时的视角大小  
Fig. 1 Viewing angle of single SLM

为了获得更大的再现像视场角,除了提高 SLM 的工艺水平,制造具有更小像素尺寸的 SLM 外,还可以通过多 SLM 空间拼接的方法来实现,通过拼接得到更大的全息面,采集到更多的三维物体信息。拼接的方式有两种,一种是平面拼接方式(如图 2(a)所示),即将多片 SLM 排列成平面形状;一种是曲面拼接方式(如图 2(b)所示),即将多片 SLM 排列成曲面形状。

平面拼接方式中,多片 SLM 无缝拼接到一起<sup>[12]</sup>,能够有效增大全息面的尺寸,根据计算全息的原理,全息图越大,接收到三维物体的信息越多,再现像的立体感就会越强。但是,再现时需要用大孔径的透镜进行拟合成像,容易导致再现像的畸变;另外,由于增大了全息面,全息图的边缘会记录物体的高频信息,但是 SLM 的衍射能力是有限的,容易导致这些高频信息无法再现;而不用透镜拟合成像时,虽然能够再现三维物体,但是由于 SLM 的像素尺寸不变,并不能增大再现像的视场角,如图 2(a)所示。

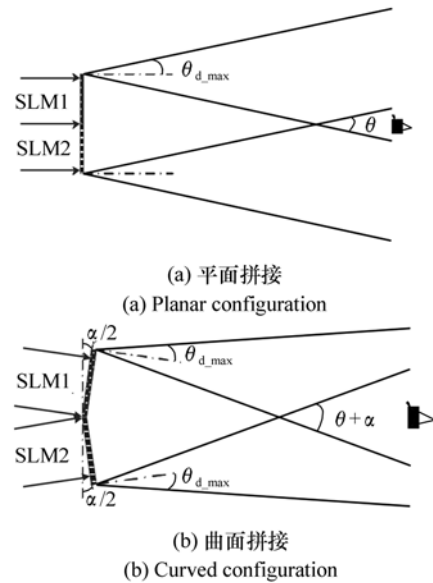


图 2 多 SLMs 的拼接方式  
Fig. 2 Tiling of multiple SLMs

曲面拼接方式中,不同的 SLM 再现三维物体不同侧面的视角信息,然后通过设计光路将再现像精确的无缝拼接到一起,可以有效地增大三维再现像的视场角。如图 2(b)所示,将两片再现像视场角为  $\theta$  的 SLM 以夹角  $\alpha$  ( $\alpha < \theta$ , 以保证再现像不会出现盲点)无缝拼接到一起,可以将再现像的视场角增大到  $\theta + \alpha$ 。随着曲面排列 SLM 数量的增加,可以进一步增大全息再现像的视场角 ( $\theta + (N - 1)\alpha$ ,  $N$  表示 SLM 的台数)。

### 3 系统设计及实验

本文利用平面反射镜和分光镜设计了基于两片透射式 SLM 曲面拼接的全息三维显示系统,进行再现像视角拓展的实验研究。光路设计如图 3 所示,光源发出的激光经扩束准直后由分光镜 BS1 分成两束,一束经反射镜 M2 垂直照射到 SLM1 上,另一束经反射镜 M3 垂直照射到 SLM2 上,通过分光镜 BS2 的合束作用来消除两片 SLM 之间的间隙,实现无缝拼接。两片 SLM 均倾斜  $\alpha/2$  的角度,根据前文所述,最后得到的全息再现像的视场角为  $\theta + \alpha$ 。本实验中所用的光源为  $\lambda = 532 \text{ nm}$  的绿光,SLM 为上海瑞立柯信息技术有限公司

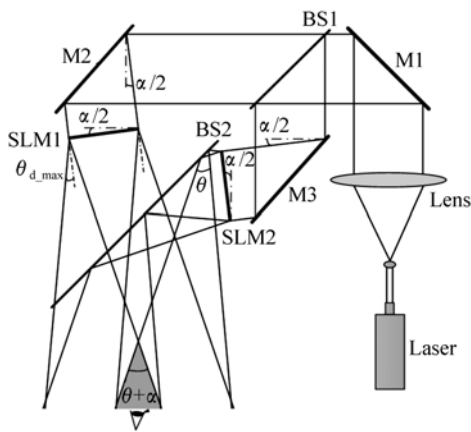


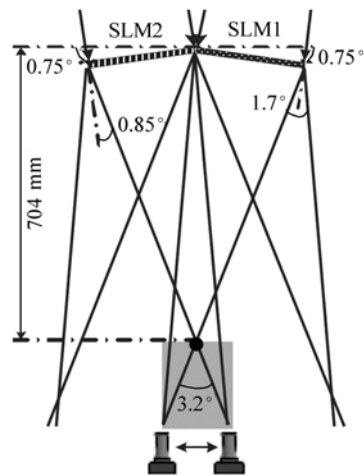
图3 2片SLMs曲面拼接光路原理图

Fig. 3 Schematic of tiling 2 SLMs in curved configuration

公司生产的 RSLM1024V 型透射式液晶 SLM, 分辨率为  $1024 \times 768$ , 像素尺寸为  $18 \mu\text{m}$ , 最大衍射角  $\theta_{d\_max}$  约为  $0.85^\circ$ , 单片 SLM 能获得的再现像视场角  $\theta = 1.7^\circ$ 。为了在观测全息三维再现像时不出现视角盲点, 取  $\alpha = 1.5^\circ$ , 因此, 总的再现像视场角可以增大到  $3.2^\circ$ 。

本文再现了一个丝状的物体以方便测量该全息三维显示系统的实际再现像视场角。测量原理图如图 4(a) 所示(图中 SLM2 为实际光路中 SLM2 的等效), 该丝状物体的再现距离为  $704 \text{ mm}$  (图中圆点位置), 通过相机(Canon EOS 60D)横向移动来观测能连续捕捉到丝状物体再现像的范围, 从而判断再现像的视场角。实验中相机到再现像的距离为  $235 \text{ mm}$ , 相机能连续捕捉到再现像的横向移动距离为  $13 \text{ mm}$ (图 4(b)~4(d)为相机在最左、中间和最右 3 个视点捕捉到的丝状物体), 因此测得的全息再现像视场角为  $3.17^\circ$ , 与前文提到的理论再现像视场角  $3.2^\circ$  基本一致。

图 5 为设计的基于两片透射式 SLM 曲面拼接的全息三维显示实验系统。两片 SLM 的无缝拼接可以通过调整 SLM 的空间位置来实现, 由人眼观察进行判断, 即利用分光镜 BS2 的镜像作用观察两片 SLM 工作区域的边界是否无缝的接合在一起。实验中, 将一个电脑建模的四棱锥物体(其表面标识有“上”“大”两字)通过层析菲涅尔



(a) 测量原理图(圆点为丝状物体再现图)

(a) Schematic of measurement (dot is the reconstruction of threadlike)



(b) 相机在最左观察点捕捉到的再现像

(b) Image captured by camera in the left-most viewpoint



(c) 相机在中间观察点捕捉到的再现像

(c) Image captured by camera in the middle viewpoint



(d) 相机在最右观察点捕捉到的再现像

(d) Image captured by camera in the right-most viewpoint

图4 视角测量实验

Fig. 4 Viewing angle measurement

计算全息算法<sup>[22]</sup>编码成全息图, 用本文所设计的全息三维显示系统进行再现, 再现距离为  $704 \text{ mm}$ 。在全息图计算的过程中, 为了使再现像在观测时能有比较明显的效果, 采集四棱锥两个视角间隔较大的视角信息代替了视角间隔为  $\alpha = 1.5^\circ$  的两个视角信息, 同时为了方便观测再现像, 在成像位置放置了一个开有小窗口的纸板。在观

测过程中,同样采用图4(a)所示的相机横向移动的方式,图6(a)~图6(c)分别为相机在移动过程中拍摄到的左侧、中间和右侧3个观察点的四棱锥再现像。可以看到,在左侧观察点中四棱锥的左表面要大于右表面,在右侧观察点中四棱锥的右表面要大于左表面,而在中间观察点中再现像左右两个表面大小基本一致,但存在串扰现象,这是由于计算全息图所采集的四棱锥侧面信息不连续导致的。实验结果表明,通过本文所设计的基于两片透射式 SLM 曲面拼接的全息三维显示系统,能够观测到全息再现像的不同视角信息,实现了全息三维显示的视场角拓展。

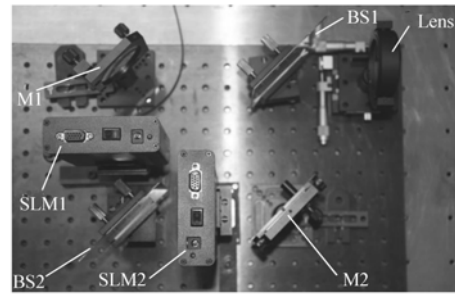


图5 利用2片透射式 SLM 曲面拼接的全息三维显示系统

Fig. 5 3D Holographic display system with 2 transmissive SLMs tiling in curved configuration



图6 相机在不同视点拍摄到的四棱锥再现像

Fig. 6 Reconstructed pyramids captured from different viewpoints by camera

## 4 结 论

本文对多 SLM 不同拼接方式拓展再现像视角的基本原理进行了分析,利用平面反射镜和分光镜设计了基于两片透射式 SLM 曲面拼接的全息三维显示系统,并用该系统对四棱锥物体的层

析菲涅尔计算全息图进行再现。实验结果表明,通过两片透射式 SLM 曲面拼接的方式,再现像的视角由基于单片 SLM 的  $1.7^\circ$  增大到  $3.2^\circ$ ,即拓展到约 1.9 倍,分光镜 BS2 能够消除两片空间光调制器间的间隙,实现无缝拼接。随着 SLM 数量的增加,通过本文的多 SLM 空间拼接方法就能够获得更大的再现像视场角。

### 参考文献:

- [1] GENG J. Three-dimensional display technologies[J]. *Advances in Optics and Photonics*,2013,5(4):456-535.
- [2] XIAO X, JAVIDI B, MANUEL M-C, *et al.*. Advances in three-dimensional integral imaging: sensing, display, and applications[J]. *Appl. Opt.*,2013,52(4):546-560.
- [3] SMALLEY D E, SMITHWICK Q Y J, BOVE V M, *et al.*. Anisotropic leaky-mode modulator for holographic video displays [J]. *Nature*,2013,498:313-317.
- [4] 张雷,杨勇,赵星,等.多级投影式集成成像三维显示的视场角拓展[J]. *光学精密工程*,2013,21(1):1-6.  
ZHANG L, YANG Y, ZHAO X, *et al.*. Enhancement of viewing angle of multi-stage projection-type integral imaging 3D display[J]. *Opt. Precision Eng.*,2013,21(1):1-6. (in Chinese)
- [5] ZHENG H D, YU Y J, WANG T, *et al.*. Computer-generated kinoforms of real-existing full-color 3D objects using pure-phase look-up-table method[J]. *Optics and Lasers in Engineering*,2012,50(4):568-573.
- [6] 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.

- MA J SH, XIA P F, SU P, *et al.*. Survey on key techniques and systems of digital holographic 3D display[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(5):1141-1152. (in Chinese)
- [7] 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.  
WANG T, YU Y J, ZHENG H D. Removal of magnification chromatism in optoelectronic full color holography[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(6):1414-1420. (in Chinese)
- [8] HAHN J, KIM H, LIM Y, *et al.*. Wide viewing angle dynamic holographic stereogram with a curved array of spatial light modulators[J]. *Opt. Express*, 2008, 16(16):12372-12386.
- [9] YARAS F, KANG H, ONURAL L. Circular holographic video display system[J]. *Opt. Express*, 2011, 19(10):9147-9156.
- [10] KOZACKI T, KUJAWINSKA M, FINKE G, *et al.*. Extended viewing angle holographic display system with tilted SLMs in a circular configuration[J]. *Appl. Opt.*, 2012, 51(11):1771-1780.
- [11] KOZACKI T, KUJAWINSKA M, FINKE G, *et al.*. Holographic capture and display systems in circular configurations[J]. *J. Disp. Tech.*, 2012, 8(4):225-232.
- [12] 陈海云, 王辉. 用空间光调制器实现全息再现像的实时重构[J]. *光电工程*, 2008, 35(3):122-125.  
CHEN H Y, WANG H. Real-time reconstruction of holograms using spatial light modulator[J]. *Opto-Elec. Engineering*, 2008, 35(3):122-125. (in Chinese)
- [13] CHEN R H Y, WILKINSON T D. Field of view expansion for 3-D holographic display using a single spatial light modulator with scanning reconstruction light[C]. *IEEE 3DTV conference*, Potsdam, Germany, 2009(5):1-4.
- [14] LIU Y Z, PANG X N, JIANG S J, *et al.*. Viewing-angle enlargement in holographic augmented reality using time division and spatial tiling[J]. *Opt. Express*, 2013, 21(10):12068-12075.
- [15] STANLEY M, SMITH M A G, SMITH A P, *et al.*. 3D electronic holography display system using a 100-megapixel spatial light modulator[J]. *Proc. SPIE*, 2004, 5249:297-308.
- [16] KOZACKI T, FINKE G, GARBAT P, *et al.*. Wide angle holographic display system with spatiotemporal multiplexing[J]. *Opt. Express*, 2012, 20(25):27473-27481.
- [17] TENG D D, LIU L L, ZHANG Y L, *et al.*. Spatiotemporal multiplexing for holographic display with multiple planar aligned spatial-light-modulators[J]. *Opt. Express*, 2014, 22(13):15791-15803.
- [18] TAKAKI Y, HAYASHI Y. Modified resolution redistribution system for frameless hologram display module[J]. *Opt. Express*, 2010, 18(10):10294-10300.
- [19] KURIHARA T, TAKAKI Y. Improving viewing region of 4f optical system for holographic displays[J]. *Opt. Express*, 2011, 19(18):17621-17631.
- [20] TAKAKI Y, OKADA N. Hologram generation by horizontal scanning of a high-speed spatial light modulator[J]. *Appl. Optics*, 2009, 48(17):3255-3260.
- [21] TAKAKI Y, YOKOUCHI M. Accommodation measurements of horizontally scanning holographic display[J]. *Opt. Express*, 2012, 20(4):3918-3931.
- [22] ZHENG H D, WANG T, DAI L M, *et al.*. Holographic imaging of full-color real-existing three-dimensional objects with computer generated sequential kinoforms[J]. *Chinese Optics Letters*, 2011, 9(4):040901.

#### 作者简介:



曾震湘(1988—),男,湖南益阳人,博士研究生,主要从事全息三维显示方面的研究。E-mail: zengzhenxiang1019@126.com



高洪跃(1977—),女,黑龙江密山人,副研究员,2007年于哈尔滨工业大学获得博士学位,主要从事全息真三维电视、实时动态全息显示液晶材料、全息投影、全息光盘、全息打印方面的研究。E-mail: gaohylet@shu.edu.cn



郑华东(1978—),男,江西上饶人,副研究员,2009年于上海大学获得博士学位,主要从事全息显示、全息打印、光学信息获取与处理方面的研究。E-mail: bluenote2008@shu.edu.cn



于瀛洁(1969—),女,辽宁宽甸人,研究员,博士生导师,1996年、1998年于哈尔滨工业大学分别获得硕士、博士学位,主要从事光学精密测量技术与仪器等方面的研究。E-mail: yingjieyu@staff.shu.edu.cn



卢小仟(1990—),女,福建泉州人,硕士研究生,主要从事全息三维显示方面的研究。E-mail: fjgclxq609@163.com

## 《光学 精密工程》(月刊)

- 中国光学开拓者之一王大珩院士亲自创办的新中国历史最悠久的光学期刊
- 现任主编为国家级有突出贡献的青年科学家曹健林博士
- Benjamin J Eggleton, John Love 等国际著名光学专家为本刊国际编委

《光学 精密工程》主要栏目有现代应用光学(空间光学、纤维光学、信息光学、薄膜光学、光电技术及器件、光学工艺及设备、光电跟踪与测量、激光技术及设备);微纳技术与精密机械(纳米光学、精密机械);信息科学(图像处理、计算机应用与软件工程)等。

- \* 美国工程索引 EI 核心期刊
- \* 中国出版政府奖期刊提名奖
- \* 中国精品科技期刊
- \* 中文核心期刊
- \* 百种中国杰出学术期刊
- \* 中国最具国际影响力学术期刊

主管单位:中国科学院

主办单位:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所

中国仪器仪表学会

地址:长春市东南湖大路 3888 号

邮编:130033

电话:0431-86176855

传真:0431-84613409

电邮:gxjmgc@sina.com

网址: <http://www.eope.net>

定价:100.00 元/册