

基于空分复用的大尺寸全息再现方法

李芳转 王 迪 王 翠 王琼华

四川大学电子信息学院, 四川 成都 610065

摘要 在计算全息再现过程中,受空间光调制器(SLM)自身像素尺寸的影响,再现像的尺寸很小。基于计算全息中相位型全息图上的每一点都包含有物体各个点的全部相位信息,提出一种扩大计算全息再现像尺寸的方法。利用空分复用法,将SLM分为四部分,每部分上分别加载含有物体不同场景的相位型全息图。在光学再现过程中,通过计算机控制加载到相应场景的全息图中相位光栅的变化,调节四个再现像的位置,实现了再现像的无缝拼接,从而得到计算全息大尺寸再现。实验结果证明了该方法的可行性。将该方法跟现有的几种方法进行对比,并进行了相应的讨论。

关键词 全息; 计算全息图; 大尺寸再现; 空间光调制器; 空分复用

中图分类号 O438.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0409001

Method of Large-Size Holographic Reconstruction Based on Spatial Multiplexing

Li Fangzhan Wang Di Wang Cui Wang Qionghua

School of Electronic and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China

Abstract In the reconstruction of the computer-generated holography, the size of the reconstructed image is small because the pixel size of the spatial light modulators (SLM) is limited. As we know, each point of the phase-only hologram contains all the phase information of the image in computer-generated hologram. A method to enlarge the size of the reconstructed image is proposed. We divide the phase-only SLM into four areas by using spatial multiplexing method, and load the holograms on the corresponding areas of the SLM, respectively. In the optical reproduction, by changing the phase grating that loads onto the corresponding scene hologram, we can adjust the position of the reconstructed image. Therefore, we can achieve large-size reconstruction of the computer-generated hologram without tiling. The experiment verifies the feasibility of the proposed method. We compare the proposed method with other methods and discuss the results.

Key words holography; computer-generated hologram; large-size reconstruction; spatial light modulator; spatial multiplexing

OCIS codes 090.1760; 090.2870; 070.6120

1 引 言

在信息爆炸、科技高速发展时代,显示技术以直观、快速和准确清晰传播信息的能力广受人们的青睐。1948年,Gabor^[1]为提高电子显微镜的分辨率提出全息术。由于全息可以记录物体所含的所有信息,是真正的三维显示^[2-3],所以自问世以来一直受到国际光学领域的重视。传统的光学全息是用干涉的方法记录全息图,因此对环境和光路的要求特别严格,难以拍摄室外场景和动态物体的全息图^[4]。而计算全息的发明为全息显示带来了很大的发展空间,它是利用计算机生成全息图代替光学全息的记录过程,其优点在于:1)降低

收稿日期: 2014-10-14; 收到修改稿日期: 2014-12-01

基金项目: 国家自然科学基金委重大国际合作项目(61320106015)、四川省计划项目(2013TD0002、2014FZ0084)

作者简介: 李芳转(1990—),女,硕士研究生,主要从事全息显示技术方面的研究。E-mail: lifangzhan@126.com

导师简介: 王琼华(1969—),女,博士,教授,主要从事3D立体显示技术方面的研究。E-mail: qhwang@scu.edu.cn(通信联系人)

了对光路的严格要求;2)利用可编程的空间光调制器代替光学干板实现实时的相位加载与调制^[5-7],避免了光学干板无法实现动态记录的缺点;3)不需要实际存在的物体,通过程序的建模虚拟即可实现任何物体的再现;4)在程序编码时可以对再现像进行预处理^[8-9],从而提高再现像的质量。因此与传统光学全息术相比,计算全息具有独特的优点和极大的灵活性,大大地简化了全息图的制作程序,提高了全息图制作的效率。计算全息显示发展至今,尽管在各方面取得了很大的进展,但仍然面临着一些挑战。如制作全息图的计算量太大以至于计算速度达不到实时显示的要求;受目前市场上空间光调制器(SLM)的像素大小的限制,很难获得大尺寸、大视角的全息再现像,从而制约了它的进一步发展。

受SLM自身结构的影响,计算全息的再现像很小,对此国内外研究者开展了相关的研究,并取得了一些成果。Chen等^[10]通过时分复用用法用单个SLM来实现计算全息大尺寸再现,但其对光路和SLM的刷新频率要求较高。许多团队提出利用多个SLM拼接实现大尺寸再现^[11-13],但由于多个SLM的拼接难以实现无缝拼接,从而限制了它的实用性。Yamamoto等^[14]通过在SLM阵列式拼接方法中引入透镜阵列实现了再现像的无缝拼接,得到计算全息大尺寸再现,但系统结构很复杂、费用昂贵,且SLM拼接会丢失物体的高频信息,实用性较差。Tomoyoshi等^[15]通过改变原图的像素间距实现了全息再现像的放大,但其放大仍受空间光调制器的限制,且会丢失物体的部分信息。

相位型全息图上的每一点都包含有物体各个点的相位信息,只要有光线照到加载了全息图的SLM上就会有再现像,只是照射面积不同再现像的质量不同。基于此,本文提出了一种扩大计算全息再现像尺寸的方法,利用相位补偿法使再现像可以成像在再现区域的任何位置。采用空分复用用法将SLM划分为四部分,每部分分别加载含有不同信息的全息图,将它们同时进行光学再现,然后将再现像进行拼接,实现了计算全息大尺寸的再现。

2 理论分析

2.1 全息再现像尺寸的计算

计算全息显示的再现三维像的大小与视场角主要由目前SLM阵列的大小、像素尺寸以及再现光路决定。令SLM阵列大小为 ω ,计算全息再现像的大小为 d ,视场角为 α ,则它们可以表示为

$$\omega = pN, \quad (1)$$

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

$$\alpha = \arctan[\omega/(2f)] \approx \omega/(2f), \quad (3)$$

式中 f 为傅里叶透镜的焦距, λ 为光波波长, p 为SLM像素尺寸大小, N 为SLM的像素数。当取SLM水平方向上的像素数 $N_x = 1920$, $\lambda = 532.8 \text{ nm}$, $p = 8 \text{ }\mu\text{m}$, $f = 300 \text{ mm}$ 时,由(1)~(3)式有水平视场角和再现像的尺寸分别为: $\alpha \approx 2.6^\circ$, $d \approx 20 \text{ mm}$ 。可以看出由于受SLM的限制,计算全息再现像的大小及其视场角都很小,无法满足人们的实际需求。

由(1)~(3)式可以得到再现像大小和视场角之间的关系为

$$\alpha d = N\lambda/2. \quad (4)$$

可知,计算全息的再现像尺寸和视场角间相互制约,只与SLM的像素数 N 有关。减小视场角可以得到大尺寸的再现像,但原本的视场角已经很小,牺牲视场角得到大尺寸再现不是这里期待的结果。还可通过增大SLM的像素数即减小像素的大小得到大尺寸全息再现,但在现有的基础上进一步减小像素尺寸存在很大的技术挑战,很难实现。因此这里提出在不改变像素尺寸和透镜焦距的情况下用空分复用用法实现大尺寸计算全息再现的方法。

2.2 全息图的制作

SLM具有离散的像素结构,可认为是一种光栅结构,所实现的光栅称为离散化光栅。为了实现再现像位置的移动,在相位型SLM上加载离散相位光栅,其结构如图1所示。它具有相位调制的功能,一般以 2π 为周期对光波进行相位调制,从而改变光的衍射方向,使得再现像的位置发生偏移。

图1中 $\Delta d = p$, l 为该光栅的周期数, θ 为光偏转角度。在实验中,只是对光线进行小角度的偏转,当光

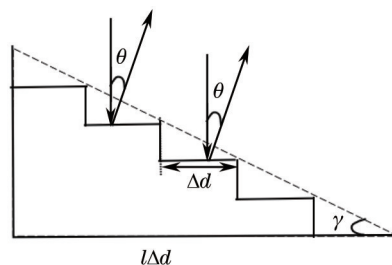


图1 离散光栅的结构

Fig.1 Structure of discrete grating

线接近垂直入射到光栅上时, l 与 θ 的关系可以表示为

$$\theta \approx \tan \theta = \frac{\lambda}{lp}. \quad (5)$$

由于偏转角度很小,可近似地认为光偏转的角度大小等于需要偏移的位移的大小。即 $\theta \approx \Delta$, 其中 Δ 为偏移位移。

当用激光照射 SLM 时,在零级光周围会出现四个大小相等的再现像,即 ± 1 级再现像,若以 0 级光所在位置为直角坐标系 xoy 的原点,则四个再现像中心点的位置坐标分别为 $(\frac{\lambda}{2p}, \frac{\lambda}{2p})$ 、 $(-\frac{\lambda}{2p}, \frac{\lambda}{2p})$ 、 $(-\frac{\lambda}{2p}, -\frac{\lambda}{2p})$ 、 $(\frac{\lambda}{2p}, -\frac{\lambda}{2p})$ ^[16]。对于第一象限中的再现像,可以通过在相位全息图中加载不同的离散相位光栅来控制再现像位置的偏移,使得再现像可以在再现域内灵活的移动。若要将其中心移动到 (x_0, y_0) , 则在 x 方向和 y 方向的位移量分别可以表示为

$$\Delta_x = \frac{\lambda}{2p} - x_0, \quad (6)$$

$$\Delta_y = \frac{\lambda}{2p} - y_0. \quad (7)$$

由(5)式可得在 x 和 y 方向上加的光栅的周期数分别为

$$l_x = \frac{\lambda}{\Delta_x p}, \quad (8)$$

$$l_y = \frac{\lambda}{\Delta_y p}. \quad (9)$$

其他象限再现像的位移量推导与上面的同理。

离散相位光栅的相位表达式为

$$\varphi_g = \frac{2\pi}{T} \text{mod}(bm + cn, T), \quad (10)$$

式中 $\text{mod}(\cdot)$ 表示取模运算, $T = l\Delta d$ 表示光栅的周期, m 、 n 是光栅的横纵范围, b 、 c 分别表示加载到 m 和 n 方向上的光栅。取不同的 b 和 c 值可以得到不同方向的光栅,取不同的 T 值可以得到不同光偏转角度的光栅。可以看到,光通过光栅后相当于对光线进行了线性相位补偿。在计算机编码时将光栅的相位分布加载到物体的相位型全息图中,通过程序控制使再现像偏移 to 特定的位置。令迭代傅里叶算法产生物体的相位为 φ , 则最终加载到 SLM 上的相位为

$$\varphi_{\text{new}} = \text{mod}(\varphi + \varphi_g, 2\pi). \quad (11)$$

3 实 验

3.1 实验光路

实验中使用波长为 $\lambda = 532.8 \text{ nm}$ 的绿色激光器为光源,采用反射型的纯相位 SLM(1920 pixel \times 1080 pixel),其像素大小为 $8 \mu\text{m}$,光线通过滤波器和准直透镜后以小于 5° 的入射角度照射到 SLM 上,再经傅里叶透镜成像在接收屏上。实验原理图如图 2 所示。

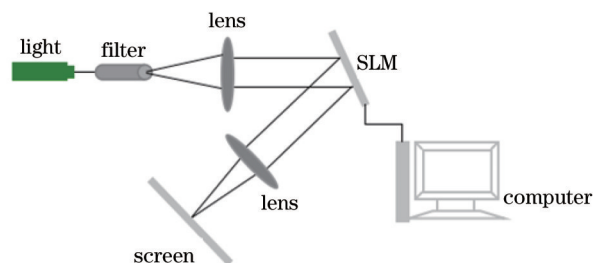


图2 实验原理图

Fig.2 Schematic of experiment

3.2 具体实验

选取一幅图片[如图 3(a)],在 Matlab 中进行处理,得到四幅子图,它们分别包含了原图的左上、右上、左下、右下部分,如图 3(b1)~ (b4)所示。为了实现物体再现像的偏移,在制作原图的相位全息图时按照(10)式加载离散光栅,其仿真结果如图 4 所示,图 4(a)为原图的仿真再现结果,图 4(b)为加载离散光栅后的仿真再现结果。在光学实验验证中,取加载到 m 和 n 方向上的光栅均为 1,即 $b = 1, c = 1$ 。对于图 3(a)的再现结果如图 5 (a)所示;当取 $l = 6$ 时,对于左下部分的再现像由(6)~(9)式可得 $|\Delta_x| = |\Delta_y| = 1.11$,再现结果如图 5(b)所示;取 $l = 2$ 时,可得 $|\Delta_x| = |\Delta_y| = 3.33$,再现结果如图 5(c)所示。同理对图 3(b1)处理后的再现结果如图 6(a)所示,分别取 $l = 6$ 、 $l = 2$ 时的实验再现结果分别如图 6(b)、(c)所示。从光学再现结果中可以看到,当 l 取不同值时,再现像的偏移量不同。因此证明了通过加载额外的相位,可以实现再现像位置的调节。

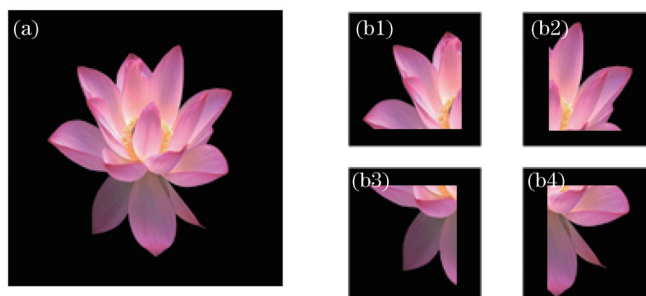


图3 实验物体图。(a) 原图;(b) Matlab 处理后得到四幅子图片

Fig.3 Object image. (a) Original image; (b1)~(b4) four sub-images after processing by Matlab

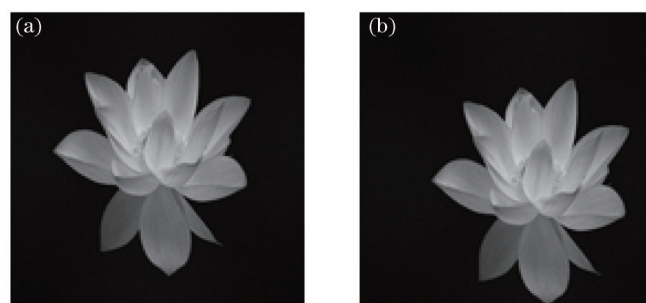


图4 再现像。(a) 图 3(a)的仿真再现像;(b) 加光栅后的仿真再现像

Fig.4 Reconstructed images. (a) Simulation result of the original image Fig.3(a); (b) simulation result after processing

按上述方法分别制作图 3(b1)~(b4)中四幅图的全息图,并相应地加载相位光栅,然后将四幅全息图合成一幅新的全息图。光学再现时可以通过改变加载到 SLM 上的全息图的离散光栅来改变各个再现像的成像位置,使四个再现像按一定的规律相邻,实现再现像的拼接。由于 1 级再现像自身越靠近 0 级光的部分能量越大^[17],为了保证得到亮度大且能量分布比较均匀的全息再现像,实验中选在 0 级处进行拼接。图 7 为最终的实验结果,其中图 7(a)为原图的再现,图 7(b)为所提出的方法得到的结果。可以看到图 7(b)明显比图 7(a)大,扩大倍数约为原图再现的 4 倍。

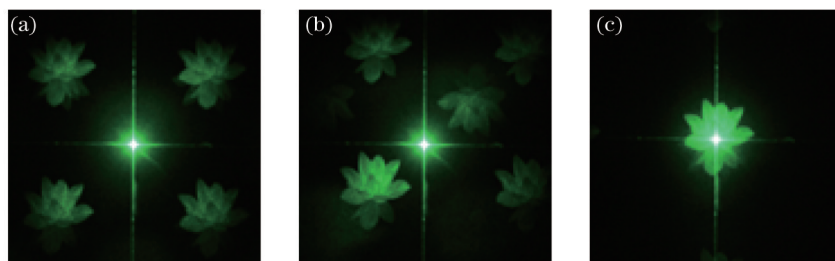


图5 再现像。(a)图3(a)的再现像;(b) $|\Delta_x|=|\Delta_y|=1.11$ 时的再现像;(c) $|\Delta_x|=|\Delta_y|=3.33$ 时的再现像

Fig.5 Reconstructed images. (a) Reconstructed image of the original image Fig.3(a); (b) reconstructed image when $|\Delta_x|=|\Delta_y|=1.11$; (c) reconstructed image when $|\Delta_x|=|\Delta_y|=3.33$

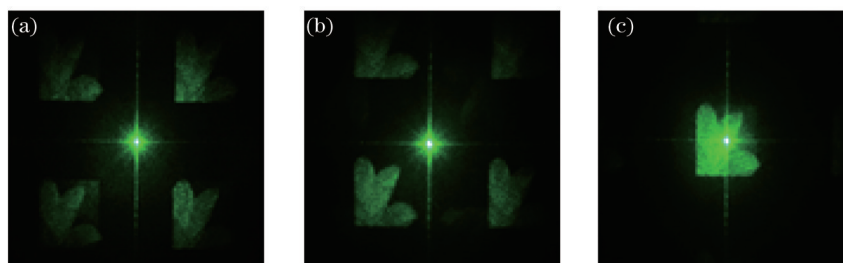


图6 再现像。(a)子图3(b1)的再现像;(b) $|\Delta_x|=|\Delta_y|=1.11$ 时的再现像;(c) $|\Delta_x|=|\Delta_y|=3.33$ 时的再现像

Fig.6 Reconstructed images. (a) Reconstructed image of sub-image Fig.3(b1); (b) reconstructed image when $|\Delta_x|=|\Delta_y|=1.11$; (c) reconstructed image when $|\Delta_x|=|\Delta_y|=3.33$

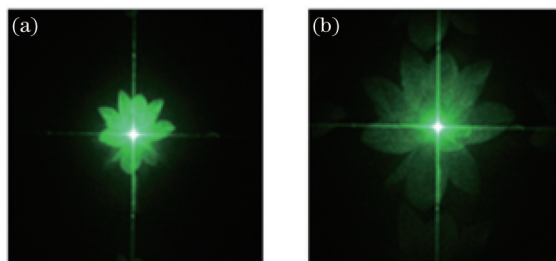


图7 再现像对比。(a)图3(a)再现像;(b)加光栅拼接后的再现像

Fig.7 Comparison of reconstructed images. (a) Reconstructed image of original image Fig.3(a); (b) reconstructed image after stitching

3.3 分析讨论

目前调节再现像尺寸的方法有很多,包括改变透镜的焦距、对原图进行缩放及对全息图进行抽样等等。但改变透镜焦距相应地就要调整光路,而这里提出的方法通过软件控制就可以实现,操作更方便;对原图缩放的过程中可能造成物体部分信息的丢失,这里在对原图进行分割时,并没有丢失原来物体的信息,因此保证了信息的完整性;对全息图进行抽样会相应地引入散斑噪声,图8为提出的方法与对全息图进行抽样实现大尺寸再现的仿真结果。图8(a)为采用提出的方法得到的结果,图8(b)为对全息图进行抽样实现大尺寸再现的仿真结果。从结果可以看到所提出的方法具有一定的优势。由于只是采用1个SLM,再现像的大小

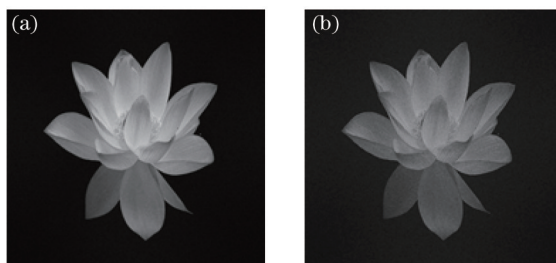


图8 仿真再现结果。(a)采用提出方法的再现像;(b)全息图抽样后再再现像

Fig.8 Simulation reconstructed images. (a) Reconstructed image by proposed method; (b) changing the sample pitch of hologram

受限于一个确定的范围,当使用多个SLM时,将更大程度地扩大再现像的尺寸,如文献[14]中利用多个SLM和透镜阵列组件实现了大尺寸再现。在后续工作中,本课题组将继续深入研究,使用多个SLM进行研究,得到更大尺寸的全息再现像。

在实验的过程中,为了提高再现像的亮度,将拼接位置选在0级光处,以得到高亮度的观看效果。如图7所示,在提高亮度的同时,观看效果受到影响。目前已经有不少消除0级亮斑的方法,如在全息图中加载二次相位,在光路中加入高通滤波器将其滤除以及使用 $4f$ 系统等。这里尝试了对单个像进行消0级处理,结果如图9所示,由图9可以看出,通过消0级处理,可以得到无0级干扰的再现像,但由于滤除了零级光,再现像的亮度变得非常暗。针对四个拼接像的质量的提高,本课题组将在后续的工作中继续研究,希望可以获得高质量的重建像,以满足实际的应用需求。

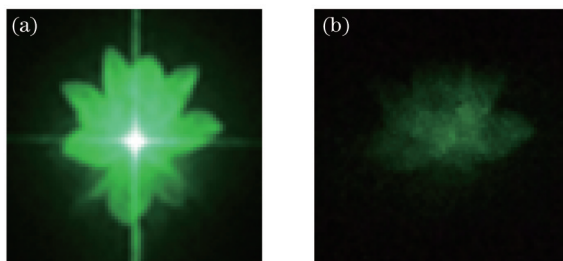


图9 消0级前后对比。(a)图3(a)再现像;(b)消0级后再再现像

Fig.9 Comparison of reconstructed image with and without the zero-order beam. (a) Reconstructed image of original image Fig.3(a); (b) reconstructed image after eliminating the zero-order beam

4 结 论

本文提出了一种扩大计算全息再现像的尺寸的方法,利用相位补偿法和空分复用法相结合的方法实现了计算全息大尺寸的再现。实验结果证明了该方法的可行性。在三维全息显示中,在不改变空间光调制器的像素的大小以及透镜的焦距的情况下,利用该方法在一定程度上可以扩大全息再现的视场角。该方法简单易行,系统结构简单,具有一定的实用价值,从而为实现较大尺寸物体的原尺寸的计算全息再现提供了可能。

参 考 文 献

- 1 D Gabor. A new microscopic principle[J]. Nature, 1948, 161(4098): 777-778.
- 2 Wang Qionghua. 3D Display Technologies and Devices[M]. Beijing: Science Press, 2011, 257.
王琼华. 3D显示技术与器件[M]. 北京: 科学出版社, 2011. 257.
- 3 Tang Wenhua, Li Shuli, Wang Jun, *et al.*. A method of computer-generated hologram based on integral imaging[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(2): 0209022.
唐文华, 李述利, 王 君, 等. 一种基于集成成像生成计算全息图的方法[J]. 中国激光, 2014, 41(2): 0209022.
- 4 Wang Di, Liu Sujuan, Li Shuli, *et al.*. Full-color display of Fourier computer-generated hologram using spatial temporal multiplexing method[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2014, 25(6): 1171-1175.
王 迪, 刘素娟, 李述利, 等. 时空复用法实现傅里叶计算全息图的显示[J]. 光电子·激光, 2014, 25(6): 1171-1175.
- 5 Haitao Dai, Keshu Xu, Yanjun Liu, *et al.*. Characteristics of LCoS phase-only spatial light modulator and its applications[J]. Opt Commun, 2004, 238(4-6): 269-276.
- 6 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.
- 7 Liu Yongjun, Xuan Li, Hu Lifa, *et al.*. Investigation on the liquid crystal spatial light modulator with high precision and pure phase [J]. Acta Optica Sinica, 2005, 25(12): 1682-1686.
刘永军, 宣 丽, 胡立发, 等. 高精度纯相位液晶空间光调制器的研究[J]. 光学学报, 2005, 25(12): 1682-1686.
- 8 Wang Di, Wang Qionghua, Wang Jun, *et al.*. Color holographic display method based on a single-spatial light modulator[J]. Opt Eng, 2014, 53(4): 045104.

- 9 Zheng Huadong, Dai Linmao, Wang Tao, *et al.*. Optoelectronic reconstruction of three-dimensional scenes based on multiple fractional-Fourier-transform holograms[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, 48(2): 020901.
郑华东, 代林茂, 王 涛, 等. 三维物场多重分数傅里叶变换全息图光电再现实验研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, 48(2): 020901.
- 10 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]. *Potsdam 3DTV Conference: the True Vision-Capture, Transmission and Display of 3D Video*, 2009. 1-4.
- 11 Keiich Maeno, Naoki Fukaya, Osamu Nishikawa, *et al.*. Electro-holographic display using 15mega pixels LCD[C]. *SPIE*, 1996, 2652: 15-23.
- 12 Hahn Joonku, Kim Hwi, Lim Yongjun, *et al.*. Wide viewing angle dynamic holographic stereogram with a curved array of spatial light modulators[J]. *Opt Express*, 2008, 16(16): 12372-12386.
- 13 Senoh Takanori, Mishina Tomoyuki, Yamamoto Kenji, *et al.*. Viewing-zone-angle-expanded color electronic holography system using ultra-high-definition liquid crystal displays with undesirable light elimination[J]. *J Display Techn*, 2011, 7(7): 382-390.
- 14 Kenji Yamamoto, Yasuyuki Ichihashi, Takanori Senoh, *et al.*. 3D objects enlargement technique using an optical system and multiple SLMs for electronic holography[J]. *Opt Express*, 2012, 20(19): 21137-21144.
- 15 Shimobaba Tomoyoshi, Makowski Michal, Kakue Takashi, *et al.*. Lensless zoomable holographic projection using scaled Fresnel diffraction[J]. *Opt Express*, 2013, 21(21): 25285-25290.
- 16 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
- 17 Yu Yingjie, Wang Tao, Zheng Huadong. Optimization of optoelectronic reconstruction of phase hologram by use of digital blazed grating[J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, 58(5): 3154-3160.
于瀛洁, 王 涛, 郑华东. 基于数字闪耀光栅的位相全息图光电再现优化[J]. *物理学报*, 2009, 58(5): 3154-3160.

栏目编辑: 何卓铭