

大视角的全息真彩色显示方法

王迪¹ 唐文华¹ 王君¹ 王琼华^{1,2}

¹四川大学电子信息学院, 四川 成都 610065

²四川大学视觉合成图形图像技术国家重点学科实验室, 四川 成都 610065

摘要 大视角的真彩色显示是全息显示的重要目标。提出一种使用白光发光二极管(LED)作为再现光源,通过旋转反射镜实现大视角彩色全息显示的方法。通过空分的方法,使每个颜色分量的全息图加载到空间光调制器(SLM)的三分之一区域。白光LED经过滤光片照射到空间光调制器上,通过调整红绿蓝(RGB)三色分量原图的大小实现再现像的完全重合。当加载不同视角的全息图时,再现像经过旋转反射镜呈在不同的位置。保证全息图的切换速度与反射镜的转动速度一致,当切换速度足够快时,通过人眼的暂留效应可看到大视角的全息再现像。实验结果验证了所提出方法的可行性。

关键词 全息; 彩色全息显示; 旋转反射镜; 空间光调制器

中图分类号 O438.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.0609001

A Method of Wide-Viewing Angle Holographic Display in Color

Wang Di¹ Tang Wenhua¹ Wang Jun¹ Wang Qionghua^{1,2}

¹School of Electronic and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China

²State Key Laboratory of Fundamental Science on Synthetic Vision, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China

Abstract Wide-viewing-angle color display is an important goal of holographic display. A method to achieve wide-viewing-angle color holographic display using white light illumination and a rotating mirror is proposed. By using spatial multiplexing method, each color component hologram is loaded on one third area of the spatial light modulator (SLM). White light LED illuminates the SLM after a filter, and complete overlapping of reconstructed image can be realized by adjusting the original size of three color components. When holograms are loaded on SLM with different viewing angles, reconstructed image is reflected in different locations by rotating mirror. The switching speed of the holograms should be the same with rotation speed of mirror. When the switching speed is fast enough, the wide-viewing-angle holographic reconstruction can be seen according to the persistence of vision effect. The experimental result verifies the feasibility of the proposed theory.

Key words holography; color holographic display; rotating mirror; spatial light modulator

OCIS codes 230.6120; 090.1195; 090.2870

1 引言

全息显示技术是一种理想的三维(3D)显示方式^[1-3]。随着计算机软硬件性能的提升和光电器件技术的发展,基于空间光调制器(SLM)的大视角计算全息真彩色显示^[4-10]成为当前的研究热点。目前的彩色再现方法主要有两种:一种是使用单个SLM。如Nakazaki等^[11]提出了时序法全息显示,该系统使用一片SLM和红绿蓝三色光源,将三幅全息图轮流输入到SLM上,使用同步控制电路保证再现光的颜色和全息图记录场景的颜色相同,利用人眼的视觉暂留效应便可观看到物体的彩色再现像。另一种是使用三个SLM。Yaras等^[12]依据空间复用的方法,采用多个图形处理器(GPU)和三基色发光二极管(LED)光源建立了实时彩色显示系统,该系统通过三色LED分别照明三片SLM实现了彩色全息再现。然而,由于受限于SLM等光电器件的限

收稿日期: 2014-10-11; 收到修改稿日期: 2015-01-20; 网络出版日期: 2015-04-10

基金项目: 国家863计划(2012AA011901)、四川省青年科技创新研究团队专项计划项目(13CXTD0003)

作者简介: 王迪(1990—),女,博士研究生,主要从事全息显示方面的研究。E-mail: 1041272365@qq.com

导师简介: 王琼华(1969—),女,博士,教授,主要从事三维显示等方面的研究。E-mail: qhwang@scu.edu.cn

制,再现像的视角都比较小。为了扩大再现像的观看视角,Yaras等^[13]用多个SLM倾斜排列成一个圆弧,可以将视场角扩大到 24° ;也有学者提出利用 $4f$ 系统来扩大视场角^[14]。目前已有的技术虽然可以获得大视角的再现效果,但系统本身都比较复杂,同时对多个SLM的无缝拼接技术^[15-19]要求比较高,如果要再现彩色的3D图像,将会进一步增加系统的复杂度。

本文提出一种以白光作为再现光源,利用旋转反射镜实现大视角真彩色全息显示的方法。通过空分的方法,使每个颜色分量的全息图加载到SLM的三分之一区域,通过制作特定的滤光片,使白光经过滤光片后分别变为红、绿、蓝三种颜色的光并分别照射到SLM的相应区域,从而实现了白光LED作为再现光。然后使用一个旋转反射镜,用同步控制电路控制其旋转速度与全息图的切换速度相同。当加载不同视角的全息图时,再现像经过旋转反射镜的反射呈现在不同的位置,根据人眼的视觉暂留效应,可以观察到大视角的彩色再现像。

2 原 理

2.1 彩色再现原理

为了简化光路,采用对单个SLM进行空分的方法来实现彩色再现。将红、绿、蓝三种颜色的全息图分别加载到SLM的三分之一区域,红绿蓝三种颜色光分别照射加载了相应颜色全息图的SLM,如图1所示,三种颜色的再现像经过透镜后将在接收屏上重合。因此,可以在接收屏上看到彩色的再现结果。全息图的处理方式为:根据图像处理的方法用计算机将一幅彩色场景分成红、绿、蓝三种颜色场景,为了避免再现光波长不同引起的色差问题,对三种颜色场景图按一定比例进行缩放。在全息图进行再现的过程中,再现像的尺寸 $h=f\lambda/p$,其中 f 是透镜的焦距, λ 是波长, p 是SLM的像素间距。因此, $h_r:h_g:h_b=\lambda_r:\lambda_g:\lambda_b$,其中 h_r 、 h_g 、 h_b 分别是红绿蓝三种颜色的再现像尺寸。设置红绿蓝三色再现光的波长分别为 $\lambda_r=632.8\text{ nm}$ 、 $\lambda_g=514.5\text{ nm}$ 、 $\lambda_b=488.5\text{ nm}$,以蓝色场景为基准,则红绿蓝场景图的缩放比例 a_{or} 、 a_{og} 、 a_{ob} 满足 $a_{or}:a_{og}:a_{ob}=0.77:0.95:1$ 。将缩放后的三基色场景图制成三幅全息图,根据合成彩色全息图的结构,为了实现白光再现,这里设计了一个包含红绿蓝三种颜色的滤光片,如图2所示,将滤光片置于SLM前方并对齐,白光LED经过一空间滤波器具有空间相干性,再过滤光片照射到全息图上。该方法所使用的滤光片是根据SLM的尺寸进行定制,用平移台来固定并调整它与SLM的相对位置。这样,保证了物体的记录光波的波长与再现光波的波长相等。当使用白光照明时,红绿蓝三种颜色的再现像在同一位置叠加,便可观看到物体的彩色再现像。

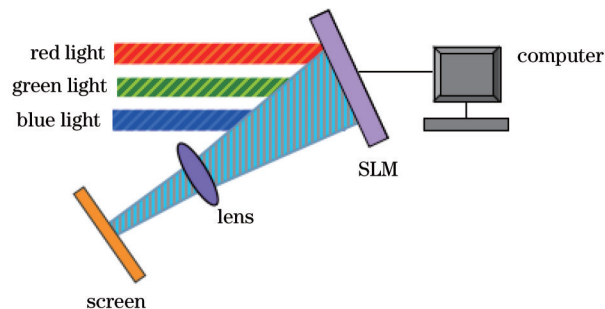


图1 彩色再现原理

Fig.1 Principle of color reconstruction

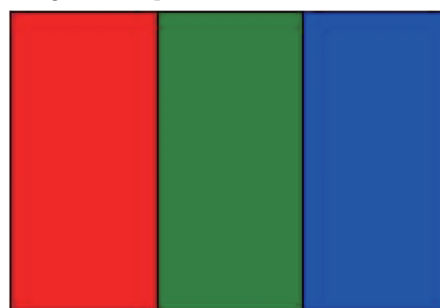


图2 滤光片结构

Fig.2 Structure of filter

2.2 大视角显示原理

计算全息三维显示的一个重要性能指标是再现像的大小与视角,由于衍射条纹的最大空间频率是由SLM的像素间距决定,因此,全息图所允许的最大衍射角 ϕ 是由SLM的像素大小 p 和参考光波的波长 λ 决定,表示为

$$\phi = \arcsin[\lambda/(2p)], \quad (1)$$

由(1)式可以看出,当使用 $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ 的光波来照射像素尺寸为 $8 \mu\text{m}$ 的SLM时,最大衍射角约为 2.26° ,因此再现像的观看视角约是 $2\phi = 4.5^\circ$ 。为了扩大再现像的观看区域,使用旋转反射镜来扩大再现像的观看区域。实验系统的整体原理图如图3所示,选用精密型电动旋转台来固定旋转反射镜,其速度可以达到 $100^\circ/\text{s}$,定位精度约为 0.1° 。当用再现光照射SLM时,通过旋转反射镜的反射,观看者可以在接收位置观察到物体的再现像。当转动旋转反射镜时,物体的再现位置也会有所改变。记录同一物体的不同视角全息图,按照上述空分复用方法分别生成相应视角的彩色全息图。输入第一幅视角图,设在初始状态时物体的再现位置位于接收屏中间,当向左转动旋转反射镜 2.5° 时,根据反射作用,物体的再现像位置相应向左偏移 5° ,可以在左侧 4.5° 的视角范围内观看到再现像;同理,当向右转动旋转反射镜 2.5° 时,根据反射作用,物体的再现像位置同样向右偏移 5° ,可以在右侧 4.5° 的视角范围内观看到再现像,如图4所示。这里在 50 ms 内控制旋转反射镜分别转动2次,并用同步控制电路控制在SLM上同步加载不同视角的全息图,根据人眼的视觉暂留效应,将看到大视角的物体再现像。在这里,使用刷新速度为 60 Hz 的SLM,当然,目前市场上已经有 240 Hz 的SLM,如果使用更高刷新率的SLM和更高速度的旋转反射镜,根据时间复用的方法,分别在不同的时刻 $t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, \dots$ 加载不同视角的全息图,再现像经过旋转反射镜的反射将呈现在不同的位置,当切换速度足够快时,可以进一步扩大再现像的观看视角。

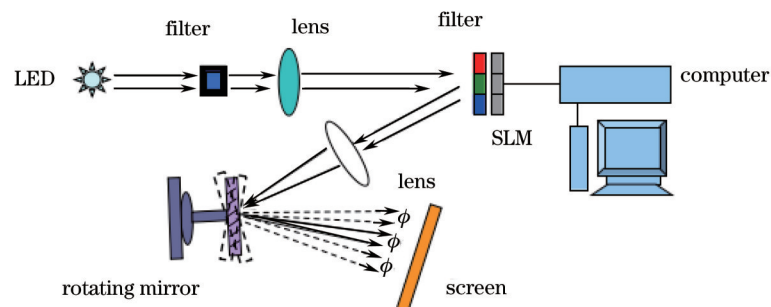


图3 实验原理图

Fig.3 Principle of experiment

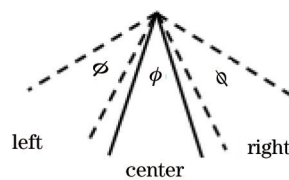


图4 再现视角图

Fig.4 View angle of reconstructed image

3 实验

实验中首先记录同一物体的3幅不同视角图,通过计算机编程分别对物体的3幅视角图进行三基色分色处理,然后按照 $a_{or}:a_{og}:a_{ob} = 0.77:0.95:1$ 的比例将不同单色场景图进行缩放。以其中一幅视角图为例,缩放后三种颜色场景的结果如图5所示。待记录彩色场景的像素数为 $256 \text{ pixel} \times 1080 \text{ pixel}$,图5(a)中红色分量的像素数为 $197 \text{ pixel} \times 197 \text{ pixel}$,图5(b)中绿色分量的像素数为 $243 \text{ pixel} \times 243 \text{ pixel}$,图5(c)中蓝色分量的像素数为 $256 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$ 。然后通过编码得到该视角的红、绿、蓝三种颜色的相位全息图,并合成一幅新的彩色全息图,如图6所示。同理,按上述处理方法再分别对物体的另外两幅视角图进行处理,并得到相

应视角的彩色全息图。实验中所使用的SLM是反射式SLM,像素数为1920 pixel×1080 pixel,调制方式为相位调制,像素间距为8 μm 。会聚透镜的焦距为 $f=15\text{ cm}$ 。输入第一幅视角的彩色全息图,当采用白光LED照射SLM时,观看者将看到视区约为 4.5° 的彩色再现像;接着输入第二幅视角的彩色全息图,同时控制旋转反射镜转动 2.5° ,根据旋转反射镜的反射,观察者将在相邻的区域看到物体的第二幅彩色再现像,观看角度约 4.5° 。按照上述步骤将三幅视角的彩色全息图依次输入至SLM上,并控制旋转反射镜每次旋转的角度为 2.5° 。使用文中所提出的方法,观察者可以同时看到物体的3个不同视角的彩色再现像,观看区域可以扩大到约 13.5° 。数值再现结果如图7所示。

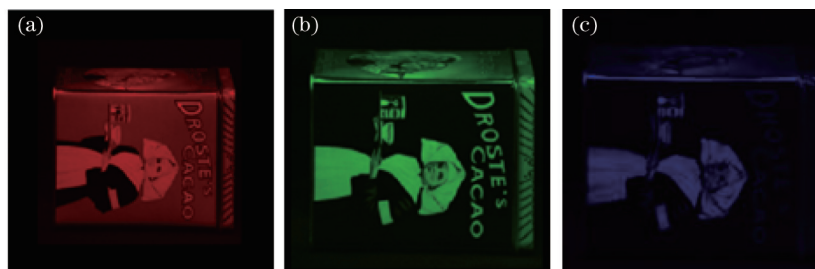


图5 色差补偿。(a) 缩放后的红色场景图; (b) 缩放后的绿色场景图; (c) 蓝色场景图

Fig.5 Chromatic compensation. (a) Scaled red scene; (b) scaled green scene; (c) scaled blue scene

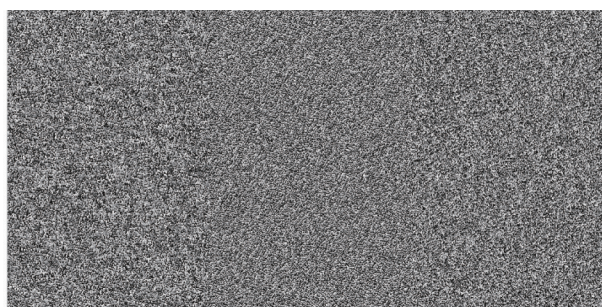


图6 彩色全息图

Fig.6 Color hologram



图7 物体的再现结果。(a) 再现像1; (b) 再现像2; (c) 再现像3

Fig.7 Reconstruction result. (a) Reconstruction image 1; (b) reconstruction image 2; (c) reconstruction image 3

从结果可以看出,所提出的方法可以实现大视角的彩色全息显示。经过反射镜以后,三种颜色的再现像会有错位,通过在全息图上加载一定的相位偏移进行消除,从而得到理想的再现结果。此外,如果使用像素间距为 $6.4\ \mu\text{m}$ 的SLM,由(4)式可知每个时刻的观看视角将为 5.6° ,此时使用该方法,再现像的观看视角将扩大到约 17° 。由于器件限制,目前视角只能扩大到十几度,在后续工作中,将进一步寻找高刷新率的SLM和更高转速的旋转反射镜,希望可以进一步扩大再现像的观看视角。此外,所提出的方法使用白光LED作为再现光,可以大大降低对人眼的伤害,系统比较简单,而且易于与其他提高显示性能的方法相结合,具有实用意义。

4 结 论

本文提出一种使用白光作为再现光源,通过旋转反射镜实现大视角真彩色全息显示的方法。该方法相对于已有的彩色再现方法,降低了系统复杂度,并且可以将视角扩大到 13.5° 。此外,该方法采用白光LED作为再现光源,可以避免激光作为再现光对人眼的伤害,具有一定的使用价值。

参考文献

- 1 Y J Pan, Y T Wang, J Liu, *et al.*. Fast polygon-based method for calculating computer-generated holograms in three-dimensional display[J]. *Appl Opt*, 2013, 52(1): A290-A299.
- 2 J Jia, Y T Wang, J Liu, *et al.*. Reducing the memory usage for effective computer-generated hologram calculation using compressed look-up table in full-color holographic display[J]. *Appl Opt*, 2013, 52(7): 1404-1412.
- 3 B J Jackin, T Yatagai. Fast calculation of spherical computer generated hologram using spherical wave spectrum method[J]. *Opt Express*, 2013, 21(1): 935-948.
- 4 T Kozacki, G Finke, P Garbat, *et al.*. Wide angle holographic display system with spatiotemporal multiplexing[J]. *Opt Express*, 2012, 20(25):27473-27481.
- 5 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.
- 6 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.
- 7 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.
- 8 Wang Hao, Bi Yong, Li Fang, *et al.*. Enlargement technology of reconstructed image of computer generated hologram based on spatial light modulator[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(3): 0309001.
王皓, 毕勇, 李芳, 等. 基于空间光调制器的计算全息再现像放大技术[J]. *中国激光*, 2013, 40(3): 0309001.
- 9 Tang Chunming, Liu Yucui, Yu Xiang. A focusing criterion function for automatic reconstruction of digital holograms[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(8): 0809001.
汤春明, 刘玉翠, 于翔. 一种用于全息图自动重建的聚焦评价方法[J]. *光学学报*, 2014, 34(8): 0809001.
- 10 Yao Kainan, Wang Jianli, Wu Yuanhao, *et al.*. A computer-free wavefront sensing method based on holography[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(12): 1209001.
姚凯男, 王建立, 吴元昊, 等. 基于全息术的无计算波前传感方法[J]. *光学学报*, 2013, 33(12): 1209001.
- 11 S Nakazaki, K Sato, M Morimoto, *et al.*. Real-time color holography with high-resolution reflective LCD panels[C]. *SPIE*, 2004, 5290: 50-57.
- 12 F Yaras, H Kang, L Onural. Real-time phase-only color holographic video display system using LED illumination[J]. *Appl Opt*, 2009, 48(34): 48-53.
- 13 Fahri Yaras, Hoonjong Kang, Levent Onural. Circular holographic video display system[J]. *Opt Express*, 2011, 19(10): 9147-9156.
- 14 Yasuhiro Takaki, Yuki 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.
- 15 Y Y Pu, J W Dong, B C Chen, *et al.*. Three-dimensional imaging with monocular cues using holographic stereography[J]. *Opt Lett*, 2010, 35(19): 3279-3281.
- 16 P A Blanche, A Bablumian, R Voorakaran, *et al.*. Holographic three-dimensional telepresence using large-area photorefractive polymer[J]. *Nature*, 2010, 468(7320): 80-83.
- 17 Y Takaki, M Yokouchi, N Okada. Improvement of grayscale representation of the horizontally scanning holographic display[J]. *Opt Express*, 2010, 18(24): 24926-24936.
- 18 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.
- 19 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.

栏目编辑: 何卓铭