

# 基于数字透镜区域采样的计算全息色差补偿方法

王德宏 王 翠 李芳转 王 迪 王琼华

四川大学电子信息学院, 四川 成都 610064

**摘要** 针对计算全息彩色光电再现过程中,由成像区域中心点不重合引起的色差问题,提出一种基于数字透镜区域采样的补偿方法。通过改变数字透镜的采样区域,实现再现像位置的移动,再现像的偏移量与数字透镜采样区域的偏移量在水平和垂直方向等大反向。实验使用单个空间光调制器的空分复用,以蓝色再现像为基准,调节红色和绿色再现像的位置,实现了计算全息色差的补偿,结果证明了所述方法的可行性。

**关键词** 全息; 色差补偿; 空间光调制器; 空分复用; 数字透镜

中图分类号 O438.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0709001

## A Method of Chromatic Aberration Compensation in Computer-Generated Holography Based on Digital Lens Area Sampling

Wang Dehong Wang Cui Li Fangzhan Wang Di Wang Qionghua

School of Electronic and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China

**Abstract** For the chromatic aberration problem caused by the uncoincidence of reconstructed image's center in the procession of color optoelectronic reconstruction of computer-generated holography, a compensation method based on digital lens area sampling is proposed. By changing the sampling area of digital lens, the reconstructed image's position can be changed. The offset distance of reconstructed image is reversely equal to the offset distance of the sampling area in horizontal and vertical directions. In the experiment, a single spatial light modulator within spatial-multiplexing method is used by setting the blue reconstructed image as standard and readjusting the positions of red and green reconstructed images, the chromatic aberration compensation can be achieved. The experiment verifies the feasibility of the proposed method.

**Key words** holography; chromatic aberration compensation; spatial light modulator; spatial multiplexing; digital lens

**OCIS codes** 090.2870; 090.1760; 090.1000

## 1 引 言

科学技术的发展和社会需求的进步使三维(3D)立体显示技术日益受到重视。传统的3D显示多利用人眼的视觉暂留效应、双目视差原理以及大脑的视觉融合等给观看者带来3D体验,然而这些显示方式有限的物理景深、难以避免的视觉疲劳会严重影响观看效果<sup>[1]</sup>。全息术自1948年提出后<sup>[2]</sup>,因其可以记录、还原物体、场景的3D信息,被视为最理想的3D显示方式<sup>[3-4]</sup>。计算全息将全息原理和计算机技术相结合,不仅可以克服光学全息对外界环境严苛要求的不足,还可以记录虚拟场景和物体,因而具有更大的灵活性。伴随计算机性能的提升和光电器件的发展,基于主动可编程光学元件—空间光调制器(SLM)的计算全息显示优点日益突出<sup>[5-7]</sup>。

然而基于SLM的计算全息彩色光电再现过程中,由于红(R)、绿(G)、蓝(B)三色再现光波长的不同,使得三色再现像间存在色差,严重影响了再现像的质量。为了实现计算全息彩色光电再现过程中的色差补偿,

收稿日期: 2015-01-18; 收到修改稿日期: 2015-03-30

**基金项目:** 国家自然科学基金委重大国际合作项目(61320106015)、国家自然科学基金(61225022)、四川省青年科技创新研究团队专项计划项目(2013TD0002)

**作者简介:** 王德宏(1989—),男,硕士研究生,主要从事全息显示技术方面的研究。E-mail: dehongwg@163.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

国内外学者进行了一系列的研究,研究可以分为三种思路:1)不改变计算过程,通过调整相应光路来消除色差<sup>[8-9]</sup>;2)改变计算过程,比如对全息图按照波长进行压缩<sup>[10]</sup>、计算过程中根据波长改变物体投影角来实现色差补偿<sup>[11-12]</sup>、或者计算过程中通过改变波长等参数来消除色差<sup>[13]</sup>;3)对计算全息的源图进行处理,比如对源图进行分色后的差别采样<sup>[14]</sup>。

针对再现过程中由三色再现像中心点位置不重合<sup>[15]</sup>引起的色差,本文提出一种基于数字透镜区域采样的补偿方法,通过改变数字透镜的采样区域使再现像发生移动,调节RGB三色再现像的相对位置使其中心点重合,从而达到色差补偿的目的。

## 2 数字透镜区域采样像移理论

### 2.1 透镜成像特性

透镜成像过程中,光场经过透镜后在其像平面成像,由几何光学可知,透镜空间位置的改变会相应改变成像位置,并且像的位置的改变与透镜光轴位置的改变一致<sup>[16-17]</sup>。如图1所示,一平行光场均匀照射位置I处的透镜中心区域时,像点会聚于 $O_1$ 处,沿垂直透镜光轴方向向下移动透镜到位置II处,透镜光轴向下移动的距离为 $d$ ,此时,平行光场会聚像点向下移动距离 $d$ 后会聚于 $O_{II}$ 处。

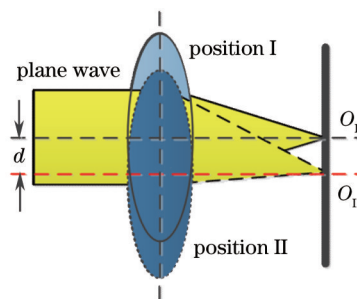


图1 透镜成像像移特性

Fig.1 Imaging offset feature of lens

### 2.2 数字透镜

波动光学中,光场经过透镜后,等效于对光场进行了一次二次相位调制,透镜的相位调制特性可以表示为

$$\phi(u, v) = -\frac{k}{2f}(u^2 + v^2), \quad (1)$$

式中 $k$ 表示光波的波数,与波长 $\lambda$ 的关系为 $k = 2\pi/\lambda$ , $f$ 表示透镜的焦距, $u$ 、 $v$ 分别表示透镜表面上的点到透镜光轴在水平方向和竖直方向上的距离。

根据(1)式可以计算透镜表面任意一点的相位调制的值,从而得到透镜的相位调制分布。为了得到与焦距为 $f$ 的透镜等效的相位调制效果,数字透镜的相位分布应当满足

$$\phi(u, v) = \text{mod}_{2\pi} \left[ -\frac{\pi}{\lambda f}(u^2 + v^2) \right], \quad (2)$$

式中 $\text{mod}_{2\pi}$ 表示取模运算,将数字透镜的相位调制分布制成灰度图后加载到SLM上,就可以实现透镜的功能。将焦距为 $f$ 的透镜记为采样透镜,数字透镜与采样透镜具有相同的焦距 $f$ 。

### 2.3 数字透镜区域采样像移

传统方法中,数字透镜的采样区域是关于采样透镜光轴对称的,如图2(a)所示。以 $x$ 轴为水平方向、以 $y$ 轴为竖直方向建立坐标系,顺着光传播的方向观察, $z$ 轴表示光传播的方向,由左手定则确定。考虑SLM的像素数为 $M \times N$ ,此时数字透镜采样区域各相位点的位置坐标可以表示为

$$\begin{bmatrix} (-n+1, m) & (-n+2, m) & \dots & (n, m) \\ (-n+1, m-1) & (-n+2, m-1) & \dots & (n, m-1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ (-n+1, -m+1) & \dots & \dots & (n, -m+1) \end{bmatrix} \cdot p, \quad (3)$$

式中 $m = M/2$ , $n = N/2$ , $p$ 为SLM的像素间距。如果改变数字透镜的采样区域,使其不再关于透镜光轴对

称,而是相对透镜中心有了  $r(r_x, r_y)$  的偏移,如图 2(b)所示,此时数字透镜采样区域各相位点的位置坐标可以表示为

$$\begin{bmatrix} (-n+1+lx, m+ly) & (-n+2+lx, m+ly) & \dots & (n+lx, m+ly) \\ (-n+1+lx, m-1+ly) & (-n+2+lx, m-1+ly) & \dots & (n+lx, m-1+ly) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ (-n+1+lx, -m+1+ly) & \dots & \dots & (n+lx, -m+1+ly) \end{bmatrix} \cdot p, \quad (4)$$

式中  $l_x = r_x/p, l_y = r_y/p$ , 利用(2)、(4)式可以计算得到采样区域偏移后的数字透镜,将新的数字透镜和某一颜色分量的全息图相加后加载到 SLM 上,此时相当于数字透镜的“光轴”发生了  $r(r_x, r_y)$  的变化,使用相应颜色的激光照射 SLM,理论上就可以使再现像的位置发生  $r(r_x, r_y)$  的偏移。

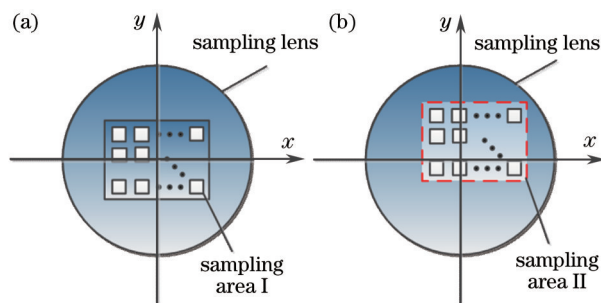


图 2 数字透镜的采样区域。(a) 关于采样透镜中心对称; (b) 具有  $r(r_x, r_y)$  的偏移

Fig.2 Sampling area of digital lens. (a) Area I being symmetrical about the center of sampling lens; (b) area II having an offset distance  $r(r_x, r_y)$  about the center of sampling lens

### 3 实验结果与讨论

实验中,使用 RGB 三色激光器作为光源,波长分别为  $\lambda_R=671 \text{ nm}$ 、 $\lambda_G=532 \text{ nm}$ 、 $\lambda_B=473 \text{ nm}$ ,采用反射式纯相位型 SLM 用以加载全息图和数字透镜,其分辨率为  $1920 \text{ pixel} \times 1080 \text{ pixel}$ ,像素间距为  $p=8 \mu\text{m}$ ,加载的数字透镜的焦距为  $f=50 \text{ cm}$ ,接收面板位于 SLM 后  $Z=50 \text{ cm}$  处,实验中将数字透镜的相位调制特性以相位分布图的形式与全息图相加后加载到 SLM 上,因此,接收屏位于 SLM 后的距离与数字透镜的焦距是相等的。RGB 三色激光经滤波器和准直透镜后变为均匀平面光,经偏振分光棱镜(PBS)反射后以小于  $5^\circ$  的入射角分别照射 SLM 上的 1/3 区域,然后在接收屏上成像,光路图如图 3(a)所示。

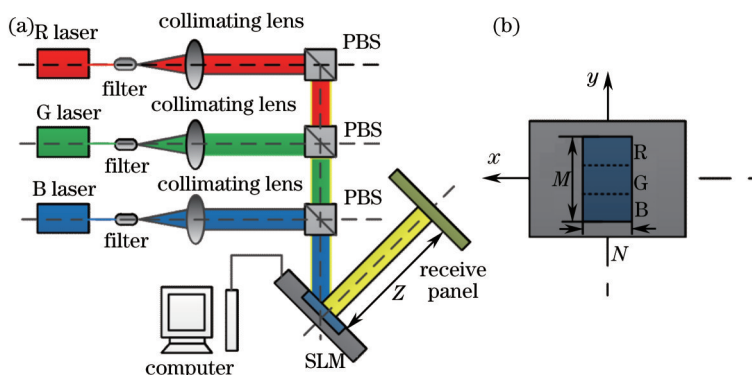


图 3 实验结构图。(a) 光路图; (b) SLM 上加载的全息图的分布示意图

Fig.3 Structure of experiment. (a) Light path diagram; (b) distribution map of holograms loaded onto SLM

#### 3.1 实验验证

实验使用绿色激光验证数字透镜区域采样像移的可行性。利用 GS 算法生成物体的全息图,实验源图和全息图分别如图 4(a)、(b)所示,然后利用(2)~(4)式分别生成采样区域关于采样透镜中心对称和具有偏移量为  $r(-4, -7)$  (单位为 mm) 的数字透镜,如图 4(c)、(d)所示。将生成的全息图与数字透镜的相位分布相加得到两幅新的全息图,将两幅新的全息图依次加载到 SLM 上,并使用绿色激光照射 SLM,得到如图 4(e)、(f)所示的

两幅再现像,考虑全息再现过程中的能量分布,选取再现区域内的一级再现像,对比图4(e)、(f)可知再现像的偏移量为 $r'(4,7)$ 。即当SLM上加载偏移量为 $r(r_x, r_y)$ 的数字透镜时,再现像会发生 $r(r_x, r_y)$ 的偏移,再现像的偏移量与数字透镜采样区域的偏移量具有等大反向的特性。

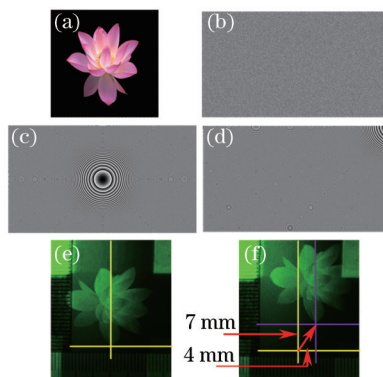


图4 验证实验图。(a)源图;(b)GS算法生成的全息图;(c)中心对称的数字透镜;(d)偏移量为(-4, -7)的数字透镜;  
(e)再现像 I; (f)再现像 II

Fig.4 Confirmatory experiment image. (a) Image source; (b) hologram generated by GS; (c) digital lens whose sampling area is symmetrical about the center of sampling lens; (d) digital lens with (-4, -7) shift; (e)reconstructed image I; (f) reconstructed image II

### 3.2 色差补偿

以第三象限内的再现像为例,当使用RGB三色激光依次照射对应分量的全息图时,第三象限内三色再现像中心点的位置坐标为 $O_i \left( -f \frac{\lambda_i}{2p}, -f \frac{\lambda_i}{2p} \right)$  ( $i=1,2,3$ ),当 $i=1,2,3$ 时, $O_i$ 和 $\lambda_i$ 分别代表 $O_R, O_G, O_B$ 和 $\lambda_R, \lambda_G, \lambda_B$ ,即 $O_R(-20.97, -20.97), O_G(-16.63, -16.63), O_B(-14.78, -14.78)$ 。以蓝色再现像为基准,分别移动红色、绿色再现像使其与蓝色再现像的中心点重合,红色、绿色再现像对应的偏移为 $r_{BR}(6.19, 6.19)$ 和 $r_{BG}(1.85, 1.85)$ 。因为再现像的偏移量与数字透镜采样区域的偏移量等大反向,所以R、G分量对应的数字透镜采样区域的偏移量分别为 $r'_{BR}(-6.19, -6.19)$ 和 $r'_{BG}(-1.85, -1.85)$ ,由(4)式可确定R、G分量对应数字透镜采样区域内各相位点的坐标值,进而得到R、G分量对应的数字透镜的相位分布,图5所示为RGB三色分量对应的数字透镜,其中B分量对应数字透镜的采样区域关于采样透镜中心点对称。

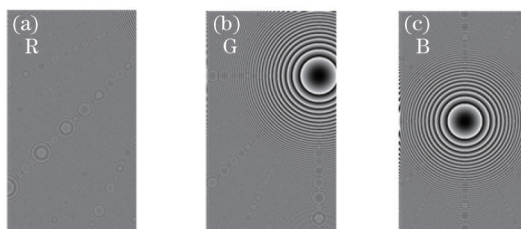


图5 数字透镜。(a) R分量对应数字透镜;(b) G分量对应全息图;(c) B分量对应数字透镜

Fig.5 Digital lenses. (a) Digital lens corresponding to R component; (b) digital lens corresponding to G component; (c) digital lens corresponding to B component

利用单个SLM的空分复用法,将SLM等分为三个区域,每个区域的像素数均为640 pixel×1080 pixel,三个区域分别加载RGB分量全息图,如图3(b)所示为逆着光线传播方向观察时SLM上加载全息图的分布示意图。考虑再现过程中由RGB波长不同引起的倍率色差,需要对RGB三色分量源图以蓝色分量为基准按照波长的反比例关系进行压缩,此时R、G分量源图的大小分别为466 pixel×785 pixel、570 pixel×960 pixel,对于R、G分量源图小于640、1080的部分进行置零处理,实验所用源图如图4(a)所示,三色分量源图如图6(a)所示。利用GS算法生成RGB分量的全息图,然后将生成的RGB分量全息图与数字透镜相加后加载到SLM上,并使用对应颜色的激光照射SLM上的1/3区域。当RGB分量全息图同时与如图5(c)所示的采样区域中心对称的数字透镜相加后加载到SLM上时,三色再现像单独再现时的位置如图6(b)所示,以中央亮斑为基准可以看出三色再现像的大小相等但是中心点位置不重合;当RGB分量全息图依次与图5(a)、(b)、(c)所示的数字透镜相

加载到SLM上,三色再现像单独再现时的位置如图6(c)所示,此时三色再现像的大小相等并且中心点位置重合。使用RGB三色激光同时照射SLM,就可得到如图6(d)所示的彩色再现像。由图6(d)的彩色再现效果可以看出,零级光斑的存在降低了再现像的质量,单个SLM空分法的使用削弱了再现像的对比度和亮度。传统方法可通过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 $4f$ 系统等消除零级光斑,提高再现像对比度;也可以通过单个SLM的时分复用或者多个SLM的使用来提高再现像的亮度。针对全息再现像质量的提高,这将在后续工作中继续研究。

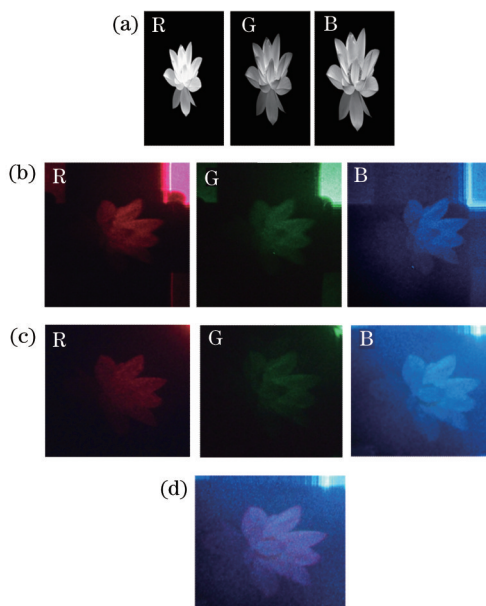


图6 彩色再现。(a) RGB分量源图;(b) 加载同一数字透镜后RGB再现像位置;(c) 加载不同数字透镜后RGB再现像的位置;  
(d) 实现色差补偿的彩色再现像

Fig.6 Reconstructed color image. (a) Source images of RGB component; (b) reconstructed images of RGB component with same digital lens; (c) reconstructed images of RGB component with different digital lenses; (d) reconstructed color image with chromatic aberration compensation

## 4 结 论

提出了数字透镜区域采样的概念,将再现像的像移与数字透镜结合,通过改变数字透镜的采样区域实现再现像位置的移动,两者在水平和竖直方向上的偏移距离等大反向。数字透镜的使用可以克服固体透镜有限尺寸的不足,同时可以避免轴向色差以及固体透镜边缘部分引起的像散等。实验使用单个SLM的空分复用,以蓝色再现像为基准,通过调节红色、绿色再现像的位置,实现了计算全息色差补偿。该方法无需复杂的理论公式的推导,易于理解,简便易行,具有一定的实用价值,并且为时序扩大再现像的尺寸和视角等提供了新的方法。

## 参 考 文 献

- 1 Wang Qionghua. 3D Display Technologies and Devices[M]. Beijing: Science Press, 2011: 203-214.  
王琼华. 3D显示技术与器件[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 203-214.
- 2 D Gabor. A new microscopic principle[J]. Nature, 1948, 161(4098): 777-778.
- 3 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.
- 4 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.
- 5 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.
- 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 D Wang, Q H Wang, J Wang, *et al.*. Color holographic display method based on a single-spatial light modulator[J]. *Opt Eng*, 2014, 53(4): 045104.
- 8 K Sato. Record and display of color 3-D images by electronic holography[C]. Vancouver: Digital Holography and Three-Dimensional Imaging, Optical Society of America, 2007: DWA2.
- 9 K Sato, A Sugita, M Morimoto, *et al.*. Reconstruction of color images of high quality by a holographic display[C]. SPIE, 2006, 6136: 61360V.
- 10 J L Martínez, G A Martínez, 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.
- 11 Y Sando, M Itoh, T Yatagai. Full-color computer-generated holograms using 3-D Fourier spectra[J]. *Opt Express*, 2004, 12(25): 6246-6251.
- 12 Y Sando, M Itoh, T Yatagai. Color computer-generated holograms from projection images[J]. *Opt Express*, 2004, 12(11): 2487-2493.
- 13 P Ferraro, S D 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.
- 14 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.
- 15 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.
- 16 Shi Shunxiang, Wang Xueen, Liu Jingsong. *Physical Optics and Applied Optics*[M]. Xi'an: Xidian University Press, 2008: 318-344.
- 石顺祥, 王学恩, 刘劲松. *物理光学与应用光学*[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2008: 318-344.
- 17 Yu Daoyin, Tan Hengying. *Engineering Optics*[M]. Beijing: China Machine Press, 2006: 15-34.
- 郁道银, 谈恒英. *工程光学*[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006: 15-34.

栏目编辑: 何卓铭