

一种基于液体透镜的全息色差补偿方法

王 迪 李芳转 王琼华 周 昕

四川大学电子信息学院, 四川 成都 610065

摘要 在真彩色全息显示中,由波长不同引入的色差往往会影响到再现像的观看效果。利用液体透镜的可变焦特性,提出了一种基于液体透镜的全息色差补偿方法。利用电湿润原理制作了一个液体透镜,当改变液体透镜的电压时,它的焦距也会随之改变。当三种颜色的激光时序照射相应颜色的全息图时,通过控制液体透镜的焦距相应地改变,从而使三种颜色的再现像清楚地呈在同一位置。实验结果表明了该方法的可行性。

关键词 全息; 液体透镜; 色差补偿

中图分类号 O438.1 文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0509001

A Method of Holographic Chromatic Aberration Compensation Based on a Liquid Lens

Wang Di Li Fangzhan Wang Qionghua Zhou Xin

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

Abstract In the color holographic display, the quality of reconstructed images are affected by chromatic aberration caused by different wavelengths of color lasers. Using the zoom feature of the liquid lens, a method of holographic chromatic aberration compensation based on a liquid lens is proposed. A liquid lens using the principle of electrowetting is developed. When the voltage applied to the liquid lens changes, the focal length changes accordingly. When three color lasers illuminate the corresponding holograms in turns, by keeping the focal length of the liquid lens change accordingly, three color reconstructed images can display in the same location clearly. The experimental results verify its feasibility.

Key words holography; liquid lens; chromatic aberration compensation

OCIS codes 090.2870; 090.1705; 090.1760

1 引 言

全息显示技术是一种理想的真三维显示技术^[1-4]。它利用干涉原理将物体发出的特定光波以干涉条纹的形式记录下来,使物光波的全部信息都存储在记录介质中,所记录的干涉条纹图样被称为全息图。当用光波照射全息图时,根据衍射原理能重现出原始物光波,从而形成原物体逼真的三维像。计算全息不仅可以记录真实的物体和场景,还可以记录虚拟的物体和场景,并且它制作简单、成本低、效率高,因而具有独特的优点和极大的灵活性。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)的计算全息显示成为当前的研究热点^[5-13]。在计算全息真彩色三维显示中,传统的方法主要有空分复用法和时分复用法。空分复用法使用三个SLM和红、绿、蓝三个激光器^[14-16],再现时三基色激光器分别照射加载了相应颜色分量全息图的SLM,三个SLM同时工作,最终再现出物体的彩色像。但这种方法需要进行精准的对位操作,系统结构比较复杂,也会产生其他的干扰像。时分复用法使用三基色激光器和一个SLM^[17-18],在不

收稿日期: 2014-11-24; 收到修改稿日期: 2015-01-20

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

作者简介: 王 迪(1990—),女,博士研究生,主要从事全息显示技术方面的研究。E-mail: wangdi1041272365@163.com

导师简介: 王琼华(1969—),女,博士,教授,主要从事三维立体显示技术方面的研究。

E-mail: qhwang@scu.edu.cn(通信联系人)

同的时间段分别用三种颜色激光器照射加载了相应颜色分量全息图的空间光调制器,当三色全息图的切换频率足够高时,利用人眼的视觉暂留效应,可以观察到物体的彩色再现像。这种方法只使用一个SLM,结构比较简单,但是在全息图的再现过程中,由于波长不同,再现像的位置和大小也会不一样,从而带来了倍率色差和轴向色差等问题,往往会影响再现像的观看效果。有学者提出增加二次相位因子来消除轴向色差,也有学者提出使用数字透镜来代替传统的固体透镜。近年来,一些主动式变焦透镜(如液晶透镜、液体透镜等)被广泛应用于成像系统、变焦系统以及全息投影中^[19-20]。使用这些元件要比传统的机械元件更轻、更小、更灵活,因此,它们具有一定的优势。

本文利用液体透镜的可变焦特性,提出了一种基于液体透镜的全息色差补偿方法,通过改变液体透镜的焦距,可以使三种颜色的再现像清楚地呈在同一位置,实验结果表明了该方法的可行性。

2 原 理

液体透镜的结构如图1所示,在该器件中使用两种不相溶的液体,液体1是透明的油,液体2是导电液滴。把电极加在基板上,然后用四个涂有Teflon的矩形氧化锡(ITO)玻璃作为侧壁,当加电压时,接触角会随着电压的改变而改变,其关系可表示为^[21]

$$\cos \theta = \frac{\gamma_1 - \gamma_2}{\gamma_{12}} + \frac{\varepsilon}{2\gamma_{12}d} U^2, \quad (1)$$

式中 γ_1 是侧壁和液体1之间的表面张力, γ_2 是侧壁和液体2之间的表面张力, γ_{12} 是两种液体之间的表面张力, θ 是当施加电压时的接触角, d 是介电层的厚度, $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$ 是介电层的介电常数, U 是加到电极上的电压。在没有施加电压的情况下,液体之间的界面是向上弯曲,透镜是发散的。当对它连续加电压时,由于电湿润效应液面会发生改变。当所加的电压超过某一临界值时,界面会向下弯曲,此时透镜就变成了会聚透镜。因此,通过改变液体透镜的电压,它可以起到变焦的作用。

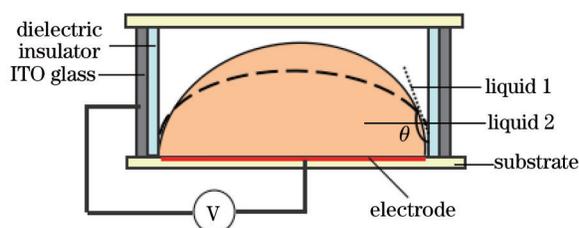


图1 液体透镜的原理图

Fig.1 Principle of the liquid lens

根据衍射传播原理,在夫琅禾费近似条件下,空间光调制器后面的成像场分布可以用下式表示:

$$U_f(x, y) = \frac{\exp(ikf)}{i\lambda f} \exp\left[\frac{i\pi}{f\lambda}(x^2 + y^2)\right] \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} U(u, v) \cdot \exp\left[\frac{-2i\pi}{f\lambda}(xu + yv)\right] dudv, \quad (2)$$

式中 λ 是入射光波的波长, $k = 2\pi/\lambda$, f 是SLM后透镜的焦距, $U_f(x, y)$ 是再现像的光场分布, $U(u, v)$ 是全息图的光场分布。此时,将在透镜的后焦面上看到物体的再现像。把用红光、绿光和蓝光照射透镜时的焦距分别记为 f_r , f_g , f_b , $f_r \neq f_g \neq f_b$,因此再现像的位置也不同,从而会产生轴向色差。为了使红、绿、蓝三种颜色的再现像呈在同一位置,使用液体透镜来改变焦距。当在SLM上加载红色分量的全息图时,控制红色激光照射SLM,并调节液体透镜的电压,使 $f_r = f$;当在SLM上加载绿色分量的全息图时,控制绿色激光照射SLM,同时调节液体透镜的电压,使 $f_g = f$;同理,当在SLM上加载蓝色分量的全息图时,用蓝色激光照射SLM并调节液体透镜的电压使 $f_b = f$ 。通过改变液体透镜的电压,可以控制焦距,使 $f_r = f_g = f_b = f$ 。由(2)式可知,三种颜色的再现像将呈在同一位置,从而消除了轴向色差。当切换时间足够快时,根据人眼的视觉暂留效应,将看到彩色的全息再现像。

色差补偿方法的再现光路如图2所示,光路中包括红、绿、蓝三种颜色的激光器、三个滤波器、三个透镜、三个分光棱镜、一个SLM、一个液体透镜和一个接收屏。其中,滤波器和透镜是用来将激光器发出的光变成准直的平行光,同步控制电路是用来控制全息图的切换、激光器的切换时间以及液体透镜的切换时间一

致。激光照射SLM后经过液体透镜,最终可以在接收屏上看到物体的再现像。

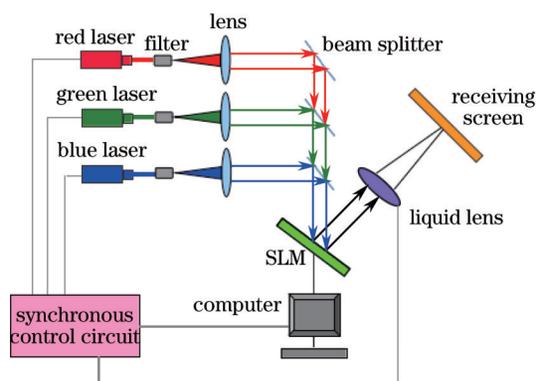


图2 色差补偿方法的全息再现光路

Fig.2 Holographic reconstruction of chromatic aberration compensation method

3 实 验

首先用红、绿、蓝三种颜色的激光器对液体透镜进行测试,图3是它的焦距随电压改变的关系图。从图3中可以看到,当电压相同时,对不同波长的光波,液体透镜的焦距是不同的;同样,当电压改变时,液体透镜的焦距也会随着改变。

本实验采用一幅二维彩色场景作为记录图,采用 Matlab 软件对其进行红绿蓝分色处理,如图4所示。然后采用迭代傅里叶算法分别生成相应颜色分量的全息图。将绿色全息图加载到SLM上,并使用绿光照射SLM,当接收屏上绿色的像的最清晰时,记录下此时液体透镜的电压,为44.0 V。保持电压不变,分别将红色全息图和蓝色全息图按一定次序输入到SLM上,并用红色激光器和蓝色激光器分别照射加载了相应颜色全息图的SLM,从接收屏上可以观看到红色再现像的结果和蓝色再现像的结果,如图5所示。结果表明,红色再现像和蓝色再现像是模糊的,也就是所谓的轴向色差。

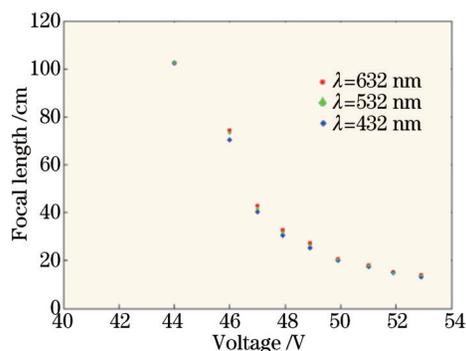


图3 液体透镜的电压和焦距的关系

Fig.3 Relationship between the voltage and focal length of the liquid lens

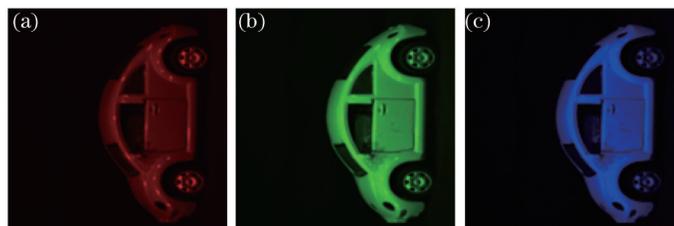
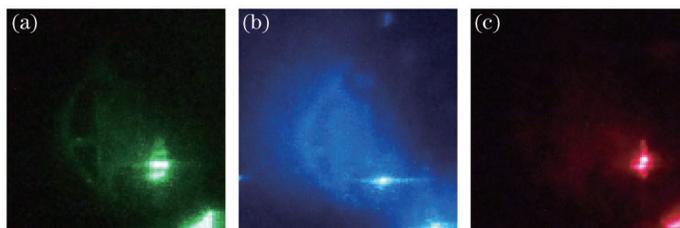


图4 三基色场景图。(a) 红色场景图; (b) 绿色场景图; (c) 蓝色场景图

Fig.4 Three primary color scenes. (a) Red scene; (b) green scene; (c) blue scene

根据文中所提的方法,重新改变液体透镜的电压,当绿光照射绿色分量全息图时,设置液体透镜的电压 $U=44.0$ V;当蓝光照射蓝色分量全息图时,设置液体透镜的电压 $U=43.0$ V;当红光照射红色分量全息图时,设



5 电压 $U=44.0$ V 时的再现像结果。(a) 绿色像; (b) 蓝色像; (c) 红色像

Fig.5 Results of reconstructed images when $U=44.0$ V. (a) Green image; (b) blue image; (c) red image

置液体透镜的电压 $U=44.6$ V, 结果如图 6 所示。从图 6 中可以看到, 通过改变液体透镜的电压, 可以得到清晰的红绿蓝再现像, 从而消除了轴向色差。当然, 该方法还有一些问题没有解决, 比如液体透镜本身会对系统的成像质量产生一定的影响, 造成光强减弱; 由于受液体透镜孔径的影响, 再现像的尺寸也会受到一定的限制; 其次所制作的液体透镜的响应时间为大约 70 ms, 暂时无法满足视觉暂留效应的要求时间, 通过数值再现给出了彩色再现结果, 如图 7 所示。在后续的工作中, 可以通过减小液体透镜介电层的厚度等方法来提高液体透镜的响应时间。通过进一步深入的研究, 搭建出效果较好的全息再现系统, 使该方法更具有实用价值。

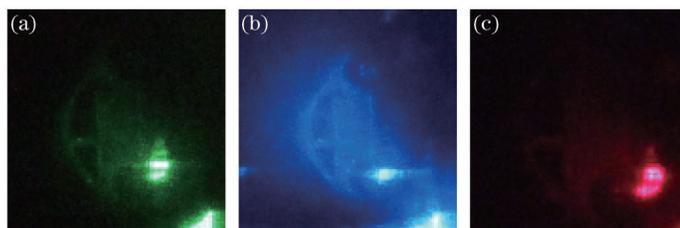


图 6 给液体透镜加不同电压时三种颜色的再现结果。(a) $U=44.0$ V 时的绿色再现像; (b) $U=43.0$ V 时的蓝色再现像; (c) $U=44.6$ V 时的红色再现像

Fig.6 Three color reconstructed images when different voltages are applied to the liquid lens. (a) Green image when $U=44.0$ V; (b) blue image when $U=43.0$ V; (c) red image when $U=44.6$ V



图 7 彩色再现像

Fig.7 Color reconstructed image

4 结 论

提出了一种基于液体透镜的全息色差补偿方法。利用电湿润原理制作了一个液体透镜, 当改变液体透镜的电压时, 它的焦距也会随之改变。当三种颜色的激光时序照射相应颜色分量的全息图时, 通过控制液体透镜的焦距相应地改变, 从而使三种颜色的再现像清楚地呈在同一位置。实验结果表明了该方法的可行性。该方法不仅可以消除全息再现过程中的轴向色差, 而且光学再现系统非常简单, 易于与其他提高显示性能的方法相结合, 具有实用意义。

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 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.
- 5 T Yamaguchi, G Okabe, H Yoshikawa. Real-time image plane full-color and full-parallax holographic video display system[J]. Opt Eng, 2007, 46(12): 125801.
- 6 Su Xianyu, Li Jitao. Optical Information Processing[M]. Beijing: Science Press, 2007: 111.
苏显渝, 李继陶. 信息光学[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 111.
- 7 Y Sando, M Itoh, T Yatagai. Color computer-generated holograms from projection images[J]. Opt Express, 2004, 12(11): 2487–2493.
- 8 Huang Yongfeng. The Research of True Color Computer-Generated Holography[D]. Qingdao: Qingdao University, 2007.
黄永峰. 真彩色计算全息术的研究[D]. 青岛: 青岛大学, 2007.
- 9 T Kozacki, G Finke, P Garbat, *et al.*. Wide angle holographic display system with spatiotemporal multiplexing[J]. Opt Express, 2012, 20(25): 27473–27481.
- 10 Y Sando, M Itoh, T Yatagai. Holographic three-dimensional display synthesized from three-dimensional Fourier spectra of real existing objects[J]. Opt Lett, 2003, 28(24): 2518–2520.
- 11 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.
- 12 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.
- 13 Wang Hui, Jin Hongzhen, Wu Dongyuan, *et al.*. Information capacity and reduction in computing holographic three-dimensional display[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(2): 0209012.
王 辉, 金洪震, 毋东元, 等. 计算全息三维显示的信息量及其简化[J]. 中国激光, 2014, 41(2): 0209012.
- 14 Liu Sujuan, Wang Qionghua, Xu Xiaoqing, *et al.*. A method of computer-generated hologram's real color display[J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2012, 23(11): 2184–2188.
刘素娟, 王琼华, 徐小清, 等. 一种计算全息图真彩色显示的方法[J]. 光电子·激光, 2012, 23(11): 2184–2188.
- 15 M Makowski, I Ducin, M Sypek, *et al.*. Color image projection based on Fourier holograms[J]. Opt Express, 2010, 35(8): 1227–1229.
- 16 S Nakazaki, K Sato, M Morimoto, *et al.*. Real-time color holography with high-resolution reflective LCD panels[C]. SPIE, 2004, 5290: 50–57.
- 17 A Shiraki, N Takada, M 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.
- 18 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.
- 19 H C Lin, N Collings, M S Chen, *et al.*. A holographic projection system with an electrically tuning and continuously adjustable optical zoom[J]. Opt Express, 2012, 20(25): 27222–27229.
- 20 L Li, Q H Wang. Zoom lens design using liquid lenses for achromatic and spherical aberration corrected target[J]. Opt Eng, 2012, 51(4): 043001.
- 21 C H Li, H R Jiang. Electrowetting-driven variable-focus microlens on flexible surfaces[J]. Appl Phys Lett, 2012, 100(23): 231105.

栏目编辑: 何卓铭