

基于全息光学元件的增强现实 3D 显示系统

余文涛 张汉乐 邓欢 王琼华 李大海

四川大学电子信息学院, 四川 成都 610065

摘要 设计了一种基于全息光学元件的透视增强现实集成成像 3D 显示系统。对基于反射体全息原理的全息光学元件的记录及再现做了理论分析,并通过搭建实验光路记录一块尺寸为 20 mm×20 mm 的全息光学元件。该全息光学元件仅对满足布拉格条件的光线体现出微透镜阵列成像功能,再现出虚拟的 3D 图像,而真实 3D 物体发出的光线可以直接透过全息光学元件,因此该全息光学元件作为图像融合元件实现了真实 3D 物体与虚拟 3D 图像的融合。该实验研制的透视增强现实 3D 显示系统能够再现出较好的虚拟 3D 图像,有效地融合虚拟 3D 图像和真实 3D 物体,实现增强现实的 3D 显示效果。

关键词 全息; 光学元件; 增强现实; 集成成像; 微透镜阵列; 反射体全息

中图分类号 O438.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.1009001

Augmented Reality Three-Dimensional Display System Based on Holographic Optical Element

Yu Wentao Zhang Hanle Deng Huan Wang Qionghua Li Dahai

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

Abstract An augmented reality integral imaging three-dimensional (3D) display system based on holographic optical element is designed. Theoretical analysis is carried out on the record and reproduction of holographic optical element based on reflection volume holographic principle, and a holographic optical element with size of 20 mm×20 mm is recorded by setting up the experimental light path. The holographic optical element reflects the micro-lens array imaging function only for light which meets Bragg conditions, and it reproduces the virtual 3D image. The light emitted from the real 3D object can directly go through the holographic optical element. Therefore, the holographic optical element is used as an image fusion element to realize the fusion of the real 3D object and virtual 3D image. The developed optical see-through augmented reality 3D display system reproduces a better virtual 3D image and realizes the effective fusion with the real 3D object, which achieves the augmented reality 3D display effect.

Key words holographic; optical element; augmented reality; integral imaging; micro-lens array; reflection volume hologram

OCIS codes 090.2890; 090.7330; 110.3010

1 引言

增强现实(AR)技术因其全新的视觉效果以及巨大的应用前景在近几年发展迅速,并被视为未来显示技术新的发展方向^[1]。增强现实将计算机生成的虚拟图像通过 AR 设备叠加于现实场景中,以增强用户对于世界的认知以及交互。增强现实显示技术可以分为头盔显示(HMD)、投影式显示、手持式显示^[2-3],其中 HMD 又可以分为视频透视式 AR 系统^[4]和光学透视式 AR 系统^[5]。视频透视式 AR 系统与光学透视式 AR 系统均可实现虚拟图像和真实场景的融合,不同之处在于前者通过摄像机拍摄获取真实世界信息,后者

收稿日期: 2016-05-25; 收到修改稿日期: 2016-06-28

基金项目: 国家自然科学基金(61405129)、四川省科技支撑计划(2015FZ0109)

作者简介: 余文涛(1995—),男,本科,主要从事三维成像方面的研究。E-mail: yuwentao619@163.com

导师简介: 邓欢(1985—),女,博士,副研究员,硕士生导师,主要从事集成成像方面的研究。

E-mail: huandeng@scu.edu.cn(通信联系人)

由人眼透过图像融合元件直接观察到真实场景。传统光学透视式 AR 系统常用半反射镜作为图像融合元件,因此虚拟图像以及真实场景的亮度信息都将损失约 50%。

目前国内外对 AR 技术已有较多研究,并且做出了相应的产品,如日本 Chuo 大学研制了 PARTNER AR 系统帮助未经训练的试验人员成功拆卸便携式投影仪(OHP)^[6];美国密歇根州立大学研究出一种头盔投影显示(HMPD)原型系统,利用分光器和自反射屏幕实现虚拟物体与真实环境的重叠^[7];美国华盛顿大学设计出便携式 Magic Book AR 系统,采用视觉跟踪技术将虚拟模型重叠于真实书籍上实现增强现实^[8];韩国首尔国立大学研制出基于全息光学透镜阵列的增强现实 3D 显示,实现了透视集成成像 3D 显示等^[9]。尽管 AR 技术在医疗、娱乐、维修制造等方面应用前景广阔,但它目前的发展仍受限于技术难题,比如设备笨重不便穿戴、系统亮度及分辨率较差、多数 AR 设备仅能加载 2D 虚拟图像等。少数可加载 3D 虚拟图像的 AR 系统结构臃肿、对硬件或制造要求较高^[10-11],而且部分基于双目视差原理实现的 3D 虚拟图像显示存在双眼集合与单眼调节的冲突,容易引起视疲劳^[12]。

作为图像融合元件的全息光学元件高度透明,再现图像衍射效率高。在众多 3D 显示技术中,集成成像显示技术被认为是最有前途的 3D 显示技术之一,它具有连续视点、无视疲劳、全视差和无需辅助设备等优点^[13-15]。本文采用红敏光致聚合物材料制作微透镜阵列全息光学元件,实现了 AR 集成成像 3D 显示。对于布拉格匹配光,该全息光学元件具有传统微透镜阵列的功能,可代替传统微透镜阵列实现虚拟 3D 图像重建;对于布拉格非匹配光,全息光学元件将直接透射光线,实现了 AR 技术与集成成像 3D 显示技术的完美结合。

2 基本原理

2.1 全息光学元件的记录

图 1 为全息光学元件的记录及再现示意图。在记录过程中,信号光通过微透镜阵列形成微球面波阵列,并与斜入射参考平行光在光致聚合物干板处发生干涉形成体光栅,从而获得具有微透镜阵列功能的全息光学元件。之后,如图 1(b)所示,以满足布拉格条件的再现光照射全息光学元件,再现出原始物光波前,实现传统微透镜阵列对平行光的会聚功能。

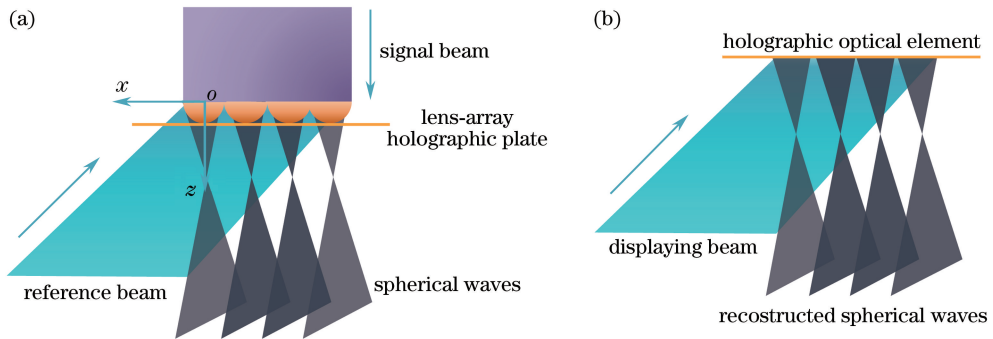


图 1 全息光学元件(a)记录和(b)再现过程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of (a) recording and (b) reproducing processes of holographic optical element

为简化讨论,分析透镜阵列中单个透镜元的记录原理,如图 1 所示。全息干板上侧单色平行光垂直通过透镜发生会聚,其在干板处的复振幅分布可表示为

$$S(x, y) = S_0 \exp [j\phi_s(x, y)] \quad (1)$$

设全息干板上任意一点坐标为 (x_0, y_0, z_0) ,干板上侧入射的单色信号光振幅为 A_0 ,经过透镜分布在全息干板上的振幅为 $S_0 = \frac{A_0}{z_0}$,相位为 $\phi_s(x, y) = \frac{k}{2z_0} [(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + 2z_0^2]$, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ 。参考波从全息干板的另一侧入射,可表示为

$$R(x, y) = R_0 \exp [j\phi_R(x, y)] \quad (2)$$

式中振幅 R_0 为常数, $\phi_R(x, y)$ 为相位。物光波 $S(x, y)$ 与参考光 $R(x, y)$ 在全息干板处发生干涉,干涉条

纹的亮度信息以全息材料折射率分布的形式被记录下来,进而得到相位全息图。设全息干板的复振幅反射系数为

$$\tau(x, y) = \beta \exp[j\phi(x, y)], \quad (3)$$

式中 β 为振幅常量。相位全息图的相位分布 $\phi(x, y)$ 正比于曝光光强分布 $I(x, y)$ ^[16], 即

$$\phi(x, y) \propto I(x, y) = |S(x, y) + R(x, y)|^2. \quad (4)$$

忽略常数因子,由(1)~(4)式得反射系数 $\tau(x, y)$, 可表示为^[17]

$$\tau(x, y) = K [\cos(a \cos \theta) + j \sin(a \cos \theta)], \quad (5)$$

其中 $K = \beta \exp[j(S_0^2 + R_0^2)]$, $a = 2S_0R_0$, $\theta = \phi_s - \phi_R$, 对(5)式作贝塞尔函数展开, 即

$$\tau(x, y) = K \left\{ J_0(a) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n J_{2n}(a) \cos(2n\theta) + j 2 \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n J_{2n+1}(a) \cos[(2n+1)\theta] \right\}, \quad (6)$$

得到 ± 1 级反射复振幅系数的表示式

$$\tau_{\pm 1}(x, y) = K [j 2 J_1(a) \cos \theta] = j K J_1(a) \{ \exp[j(\phi_s - \phi_R)] + \exp[j(\phi_R - \phi_s)] \}, \quad (7)$$

当再现光波 $C=R$ 时, ± 1 级衍射光波表达式为

$$U_{\pm 1}(x, y) = \tau_{\pm 1}(x, y) C(x, y) = j K R_0 J_1(a) \{ \exp(j\phi_s) + \exp[j(2\phi_R - \phi_s)] \}. \quad (8)$$

对于反射体全息, 只需考虑 $+1$ 级衍射^[17], 即

$$U_1(x, y) = j K R_0 J_1(a) \exp(j\phi_s) = \beta J_1(a) \frac{R_0}{S_0} S(x, y) \exp \left[j \left(S_0^2 + R_0^2 + \frac{\pi}{2} \right) \right], \quad (9)$$

可以看出与原始会聚球面光波 $S(x, y)$ 相比, 衍射光波 $U_1(x, y)$ 增加了初始相位常数 $S_0^2 + R_0^2 + \pi/2$ 、振幅比例常数 $\beta J_1(a) R_0 / S_0$, 但再现衍射波仍为会聚球面波, 记录单个透镜得到的全息光学元件实现了普通透镜对光线的会聚功能。本实验通过记录透镜阵列得到的全息光学元件具有普通微透镜阵列的光学特性。当再现光波为带有微图像阵列信息的平行光束时, 有

$$C(x, y) = C_{\text{EIA}} \exp(j\phi_R), \quad (10)$$

式中 C_{EIA} 为微图像阵列的振幅强度, 再现光相位与参考光一致, 均为 ϕ_R , 由(8)~(10)式可得再现光波的表达式

$$U_{\text{EIA}}(x, y) = j K C_{\text{EIA}} J_1(a) \exp(j\phi_s) = C_{\text{EIA}} \frac{\beta J_1(a)}{S_0} S(x, y) \exp \left\{ j \left[(S_0^2 + R_0^2) + \frac{\pi}{2} \right] \right\}. \quad (11)$$

由(11)式可知再现光波相位增加的常数相位因子 $\exp\{j[(S_0^2 + R_0^2) + \pi/2]\}$ 并不影响最后的成像效果^[17]; 再现光波振幅受到 $C_{\text{EIA}} \beta J_1(a) / S_0$ 的调制, $\beta J_1(a) / S_0$ 为常数, 所以可认为振幅受到 C_{EIA} 调制。从以上分析可知, 该调制结果等同于微图像阵列受到普通微透镜阵列调制后的效果, 表明该全息光学元件可以用于实现集成成像 3D 显示。

图 2 为全息光学元件记录实验的原理图和装置图。其中光源为红色半导体激光器, 其波长为 671 nm, 功率为 50 mW; 分光棱镜的分光比为 1:1; 反射镜 1、2 均为反射率高于 90% 的金属镀膜反射镜; 光阑 1、2 为 20 mm×20 mm 的普通光阑; 微透镜阵列节距为 1 mm, 焦距为 3.3 mm。实验选用的相位型全息记录材料为国产 RSP-VI 型红敏光致聚合物^[18-19], 记录介质厚度为 25 μm 、灵敏度为 1 mJ/cm², 其光敏范围为 630~671 nm, 分辨率大于 4000 lp/mm, 平均折射率为 1.52, 且该材料在一定曝光区间内满足线性记录条件^[16]。相比常见的卤化银干板, 光致聚合物材料的分辨率、光灵敏度要高很多。激光经扩束、滤波、准直后由分光棱镜分为平行光束 1、2。平行光束 1 经反射镜 1(M1)以 45°斜入射到记录干板, 平行光束 2 经过反射镜 2(M2)反射后垂直透过微透镜阵列, 形成众多微球面波阵列并到达记录干板, 两束光线在干板处发生干涉并由全息材料记录下干涉条纹, 获得系统所需的全息光学元件。为控制曝光区域, 光路中间放置光阑 1、2。

国产 RSP-VI 型红敏光致聚合物材料的 Q 参量可表示为^[20]

$$Q = \frac{2\pi\lambda_s d}{n_D \Lambda^2}, \quad (12)$$

$$\Lambda = \frac{\lambda_D}{2 \sin \theta_B}, \quad (13)$$

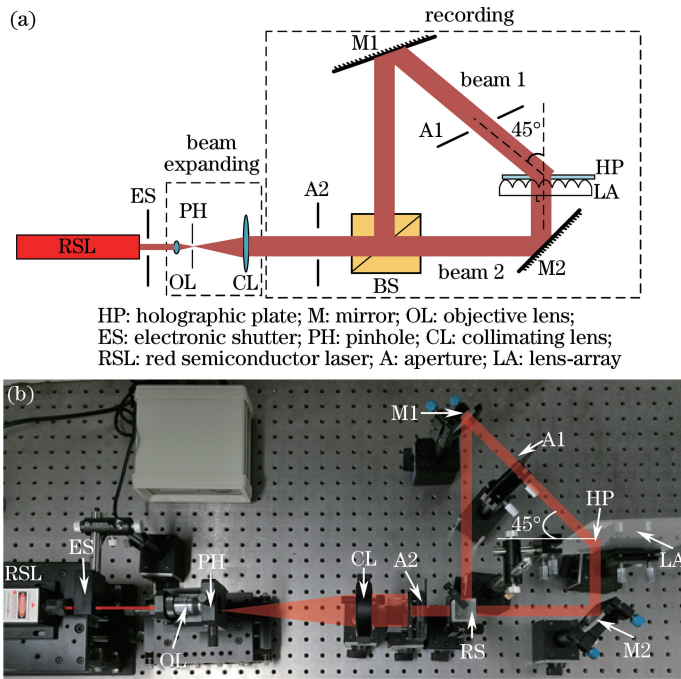


图 2 全息光学元件记录实验的(a)原理图和(b)装置图

Fig. 2 (a) Schematic diagram and (b) device diagram of holographic optical element recording experiment

$$\theta_B = \frac{|\varphi_R - \varphi_O|}{2}, \quad (14)$$

式中 λ_a 为记录光波在空气中的波长, n_D 、 d 分别为记录介质的折射率、厚度, Λ 为体光栅的光栅间距, θ_B 为布拉格衍射角, φ_R 为参考光折射角, φ_O 为物光折射角。经(12)~(14)式计算可得 $Q \approx 82$, 大于 10, 满足体全息记录的条件。

反射式体全息光学元件对再现光的波长极其敏感。在满足布拉格角度和波长选择性的条件下, 用白光再现时能再现出单色光的像。用白色平行光以与记录时参考光相同的入射角照射全息光学元件, 获得如图 3 所示的再现效果。白色平行光在全息光学元件的衍射作用下再现出一个个点状的光斑, 证实了该全息光学元件具有传统微透镜阵列对光线的会聚功能。

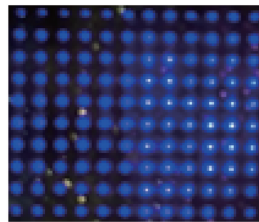


图 3 全息光学元件平行光再现效果

Fig. 3 Parallel light reproduction effect of holographic optical element

由图 3 可见全息光学元件脱水处理后再现图像为蓝色, 产生这种现象的主要原因是全息干板脱水及风干过程中光致聚合物材料的厚度发生收缩, 光栅矢量 k_F 发生改变, 如图 4(a)所示。假设参考光矢量、物光波矢量、光栅矢量分别为 k_R 、 k_O 、 k_F , 三者关系可表示为

$$k_F = k_O - k_R. \quad (15)$$

绘制上述矢量的变化图, 如图 4(b)所示, 图中实线和虚线分别代表介质收缩前、后的矢量。可以看出: 记录介质收缩后, k_F 方向及大小均随之发生改变, 导致再现衍射光矢量 $|k_I|$ 增大, 即再现光波长变短; 此外, 在实验过程中, 衍射再现的物光波及再现照明光线方向将偏离理想中干板未发生收缩时的情况。

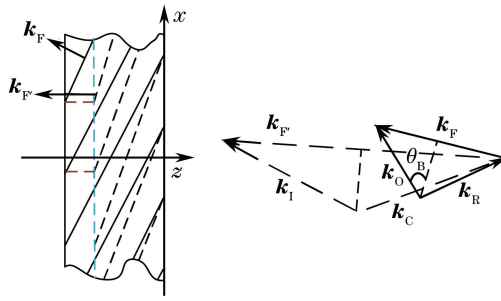


图 4 (a)体全息光栅收缩示意图;(b)光栅矢量变化示意图

Fig. 4 (a) Schematic diagram of volume holographic grating shrinking; (b) schematic diagram of grating vector changing

2.2 增强现实 3D 显示原理

增强现实 3D 显示系统的原理如图 5 所示,该 3D 显示系统由全息光学元件和投影装置组成。投影装置将计算机生成的微图像阵列投射到全息光学元件上,全息光学元件作为图像融合元件,针对满足布拉格条件的投影光线表现出微透镜阵列功能,再现出虚拟的 3D 物体。而针对真实物体发出的非匹配光,则具有高透射性,所以人眼可看到虚拟 3D 图像与真实物体的有机结合,实现增强现实 3D 显示。

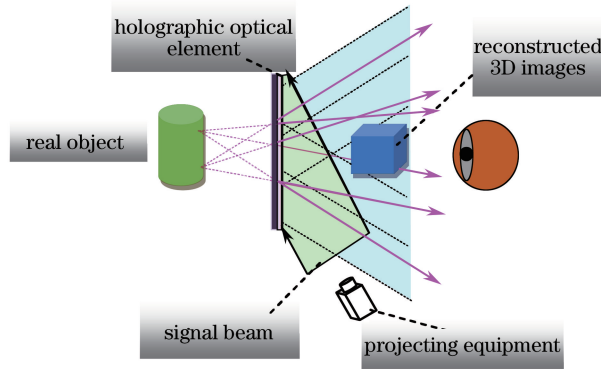


图 5 增强现实 3D 显示系统原理示意图

Fig. 5 Schematic diagram of augmented reality 3D display system

3 实验验证

基于全息光学元件的增强现实 3D 显示系统实验装置如图 6(a)所示,主要由投影仪、中继光学元件、远心透镜三部分构成,其中投影仪投射出的微图像阵列由中继光学元件会聚并经远心透镜准直扩束后、以满足布拉格条件的角度入射到全息光学元件(全息光学元件位于真实物体“汽车模型”前方 38 mm 处),再现出虚拟的 3D 图像。实验所用的微图像阵列如图 6(b)所示,它由计算机生成,其中字符“3”和字符“D”相距 30 mm,且中心深度平面位于全息光学元件表面。

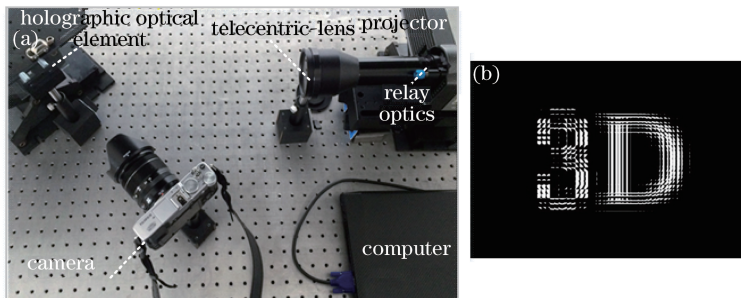


图 6 增强现实 3D 显示系统。(a)实验装置;(b)微图像阵列

Fig. 6 Augmented reality 3D display system. (a) Experimental setup; (b) micro-image array

基于全息光学元件的透视增强现实 3D 显示系统的实验结果如图 7 所示,从“左”、“右”视图中可以看出再现的虚拟图像“3D”存在明显的水平视差;从“上”、“下”视图可以看出“3D”存在明显的垂直视差。透过全息光学元件可以清晰地看到“3D”后边的小车模型,该实验完美实现了真实 3D 物体与虚拟 3D 图像的融合,证实了该增强现实 3D 显示系统的显示效果。此外,由实验结果可以看出再现虚拟图像颜色均匀性有待进一步提高,这是由于感光介质厚度及曝光强度分布不均匀导致各区域图像衍射效率不同,影响再现图像的均匀性;全息干板显影风干过程中人工操作的误差也会影响各区域像的均匀性。

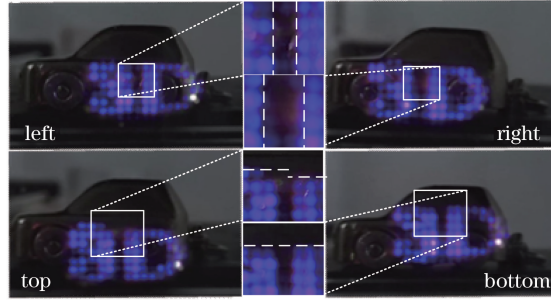


图 7 透视增强现实 3D 显示系统实验结果图

Fig. 7 Experimental results of see-through augmented reality 3D system

4 结 论

利用反射体全息原理制作具有普通微透镜阵列光学特性的全息光学元件,对全息光学元件的记录和再现进行了理论分析,并讨论了再现图像“蓝移”的问题。将该全息光学元件应用于投影式集成成像 3D 显示系统中,实现了虚拟 3D 图像与真实 3D 物体的融合,获得了较好的透视增强现实 3D 显示效果。另外,实验证实了全息光学元件应用于集成成像 3D 显示的可行性。相比于传统的微透镜阵列,全息光学元件可以精简系统结构并降低成本,作为图像融合元件还具有增强现实的功能。该透视增强现实 3D 显示系统在医疗、娱乐、军事、维修制造等领域有潜在的应用前景和商业价值。

参 考 文 献

- 1 Azuma R T. A survey of augmented reality[J]. Presence: Teleoperators and Virtual Environments, 1997, 6(4): 355-385.
- 2 Milgram P, Takemura H, Utsumi A, *et al.* Augmented reality: A class of displays on the reality-virtuality continuum[C]. SPIE, 1994, 2351: 282-292.
- 3 Azuma R, Bailiot Y, Behringer R, *et al.* Recent advances in augmented reality[J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 2001, 21(6): 34-47.
- 4 Feng Y, Du W, Guan X, *et al.* Realization of multilayer occlusion between real and virtual scenes in augmented reality[C]. 10th International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design, 2006: 1-5.
- 5 Kiyokawa K, Billinghamurst M, Campbell B, *et al.* An occlusion-capable optical see-through head mount display for supporting co-located collaboration [C]. Proceedings of the 2nd IEEE/ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality, IEEE Computer Society, 2003: 133-141.
- 6 Yamashita M, Sakane S. Adaptive annotation using a human-robot interface system PARTNER[C]. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2001, 3: 2661-2667.
- 7 Hua H, Gao C, Biocca F, *et al.* An ultra-light and compact design and implementation of head-mounted projective displays[C]. Virtual Reality, IEEE, 2001: 175-182.
- 8 Billinghamurst M, Kato H, Poupyrev I. The MagicBook: A transitional AR interface[J]. Computers & Graphics, 2001, 25(5): 745-753.
- 9 Hong K, Yeom J, Jang C, *et al.* Full-color lens-array holographic optical element for three-dimensional optical see-through augmented reality[J]. Optics Letters, 2014, 39(1): 127-130.
- 10 Takaki Y, Urano Y, Kashiwada S, *et al.* Super multi-view windshield displays for long-distance image information

- presentation[J]. Optics Express, 2011, 19(2): 704-716.
- 11 Hong J, Min S W, Lee B. Integral floating display systems for augmented reality[J]. Applied Optics, 2012, 51(18): 4201-4209.
- 12 Zhao W X, Wang Q H, Wang A H, *et al.* Autostereoscopic display based on two-layer lenticular lenses[J]. Optics Letters, 2010, 35(24): 4127-4129.
- 13 Deng H, Wang Q H, Xiong Z L, *et al.* Magnified augmented reality 3D display based on integral imaging[J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2016, 127(10): 4250-4253.
- 14 Liu Yao, Deng Huan, Luo Chenggao, *et al.* An integral imaging three dimensional display method based on aperture stop array[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(9): 0910004.
刘 尧, 邓 欢, 罗成高, 等. 基于光孔阵列的集成成像三维显示方法[J]. 光学学报, 2014, 34(9): 0910004.
- 15 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.
- 16 张光勇, 章鹤龄, 任永禄. RSP-I型红敏光致聚合物全息干板特点、性能及使用方法[Z/OL]. 北京: 首都师范大学, 1993 [2016-05-05]. <http://www.docin.com/p-1018783001.html>.
- 17 Yu M W. Opticalholography and its applications[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1996: 138-140.
- 18 Zhang G Y, Zhang H L, Ren Y L. The features and application of red-sensitive photopolymer holographic dry plate[J]. Optical Technique, 1993, 19(5): 38-40.
- 19 Ma X K, Zhang H Y, Mao W H. Characteristics of red sensitive photopolymer plate[J]. Physics Experimentation, 2005, 25(10): 40-42.
- 20 Klein W R. Theoretical efficiency of Bragg devices[J]. Proceedings of the IEEE, 1966, 54(5): 803-804.