

全息打印技术综述

郑华东 孙国栋 于瀛洁*

(上海大学精密机械工程系, 上海 200072)

摘要 全息打印技术具有立体影像效果好及制作灵活性好等特点,在现代生活、商业和军事等领域具有广泛的应用前景和重要价值。阐述了全息打印技术的原理、方法及技术研究现状。重点从打印系统的光路特点等方面对现有全息打印技术进行归纳和分析,并对全息打印技术今后的发展趋势进行了展望。

关键词 全息;全息打印;计算全息图;全视差;全息像素;记录方法

中图分类号 TN26 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.110002

A Review of Holographic Printing Technologies

Zheng Huadong Sun Guodong Yu Yingjie

(Department of Precision Mechanical Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract Holographic printing is a technology with some characteristics such as good stereo images effect and well flexibility, and has promising application prospects and important value in modern life, commercial and military fields. This paper briefly introduces the principle, methods and the present research situation of holographic printing technologies. A sum-up and analysis of the existing holographic printing technologies are given according to characteristics of the printing system, and the developing trend of holographic printing technology in the future is introduced.

Key words holography; holographic printing; computer-generated hologram; full-parallax; holographic pixel (hogel); recording methods

OCIS codes 090.1760; 090.2870; 100.6890

1 引言

全息技术是利用干涉和衍射原理记录并再现物体真实三维(3D)图像的技术^[1,2]。全息技术采用卤化银、重铬酸盐明胶和光致抗蚀剂等制成感光胶片来记录全息图,再现出来的影像 3D 立体感强,形象逼真。光学全息在记录大尺寸全息图时往往需要大口径的光学干涉记录系统,因此对硬件和记录环境的要求比较高。而且光学全息无法记录虚拟 3D 物体的全息图,其应用在一定程度上受到限制。

近年来,全息打印技术得到迅猛发展,该技术将计算机技术和全息技术相结合,不仅可以制作真实 3D 物体的全息图还可以制作通过计算机 3D 建模获取的虚拟 3D 物体的全息图。通过全息打印技术制作的大幅面、大视角、真彩色的 3D 激光全息图像已成功应用于商业广告、产品展示等领域。目前该技术已在美国、日本等发达国家得到重视^[3,4],我国也有部分学者从事该技术的研究工作^[5~8]。

全息打印技术主要涉及计算机 3D 建模与渲染、3D 物体图像信息的获取与处理、3D 物体全息图快速计算和全息图记录方法等领域。重点阐述了全息打印技术的基本原理,全息打印中 3D 图像信息的编码、合成及记录方法,并对全息打印技术的未来发展趋势进行展望。

收稿日期: 2012-05-23; **收到修改稿日期**: 2012-07-02; **网络出版日期**: 2012-08-30

基金项目: 国家自然科学基金(61101176)和上海大学创新基金资助课题。

作者简介: 郑华东(1978—),男,博士,副研究员,主要从事全息显示与光学信息处理等方面的研究。

E-mail: zhenghuadong_08@163.com

* **通信联系人**。E-mail: yingjieyu@staff.shu.edu.cn

2 有参考光束的全息打印方法

传统的全息打印技术是利用干涉记录的原理,将物体发出的光波和参考光波以干涉条纹的形式记录下来,将物光波前的全部信息储存在记录介质中。当用光波照射全息图时,由于衍射原理能重现出原始物光波,从而形成逼真的3D像。

1999年,美国的 Zebra Imaging 公司^[9,10]发明了数字合成彩虹全息图(如图1所示)。其制作过程是:1)利用计算机图形软件,产生一系列带有视差的二维(2D)图像,并用电寻址的透射液晶屏以相干光照明的方式进行显示;2)针对每幅2D视差图像,采用彩虹全息在光致聚合物胶片上记录一幅 $2\text{ mm}\times 2\text{ mm}$ 的基元全息图,这种基元全息图也被称为全息像素,简称“Hogel”;3)利用计算机控制的分步重复技术,将 300×300 个“Hogels”排列成 $60\text{ cm}\times 60\text{ cm}$ 的全息图单元;4)将多个全息图单元拼合在一起,合成一幅超大尺寸的全息图。其特点是:采用光致聚合物记录全息图,无需显影、定影等复杂的后处理;衍射效率高,颜色鲜艳,水平和垂直视角均可达 100° 。该方法理论上可以制成面积任意大的全息图,但对相干记录过程的控制要求比较严格。

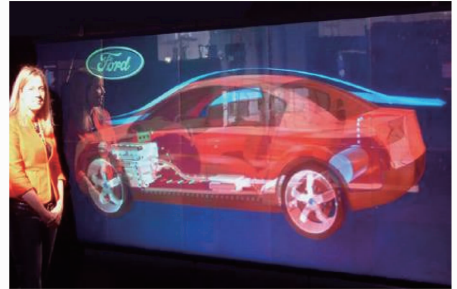


图1 轿车模型的全息显示

Fig. 1 Holographic display of car model

重庆大学的王丁等^[11,12]应用全视差点阵合成全息图的方法,将合成全息记录和计算机数字处理技术相结合,利用计算机准确、有效地收集3D物体的全视差光强分布信息并对其编码后用单色激光器将全视差编码信息依次记录在同一张3M全息打印胶片的不同区域,经过冲洗等后续步骤后得到的全息片可在普通灯光照明情况下获得立体再现像。人眼在视区内横向或纵向移动时,能看见物体的全视差再现像。其基本制作原理是:1)获取多角度平面投影视图。可采用模拟法借助计算机进行图像仿真及处理,或是直接用照相机拍摄实物对象后进行处理;2)信息编码(把视角矩阵中相同位置的像素点提取并合成为 Hogel 图,如图2所示);3)全息记录(由2D平台携带全息板单步曝光记录如图3所示);4)再现观察。

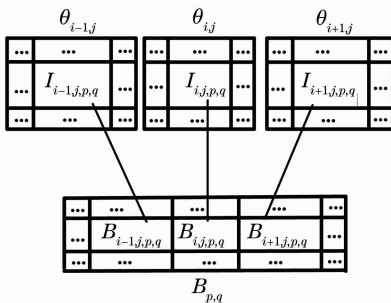


图2 编码示意图

Fig. 2 Coding schemes

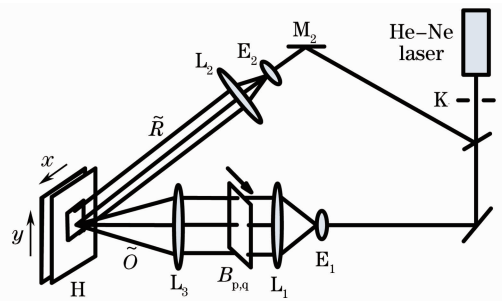


图3 全息记录光路

Fig. 3 Light path of holographic recording

2011年,哈尔滨师范大学的关承祥等^[13]提出了3D显示多通道全息图记录方法。在一个平面内分成了 $F\times M$ 个通道,同时将整幅图像分割成了 $F\times M$ 个子图像分别同时曝光记录。那么相应的曝光时间就缩短为原来的 $1/(F\times M)$ 。图4为3D全息图记录装置,图5为打印全息图的再现像从三个不同视角观察时的效果。

其基本原理是:1)将3D物体转换为不同视角的2D图像阵列(可以用模拟法或CCD直拍法);2)将每幅2D图像按光学通道格局分割处理成子图像(点阵合成法);3)运算处理子图像获得通道合成图像,在液晶空间光调制器SLM上显示,控制全息底片移动,每移动一次,每个光学通道显示一幅子合成图像,并在全息底片记录一个子区。其中,记录一个子区的过程为:激光器输出激光同时控制多通道的电动快门开启工作,多个通道同时记录,形成的物光束打在全息底片的一侧,参考光打在全息底片的背面上。通过多个光学通道将信息逐块记录在全息底片上,并拼合成大幅面全息图。多通道同时记录的优点是可以显著减少制作大幅面全息图所需的时间,但同时也使系统结构比一般单通道记录方式更为复杂。

苏州大学的陈林森等^[14]提出一种实现3D全息显示的数字化彩虹全息记录方法。根据两步法彩虹全息

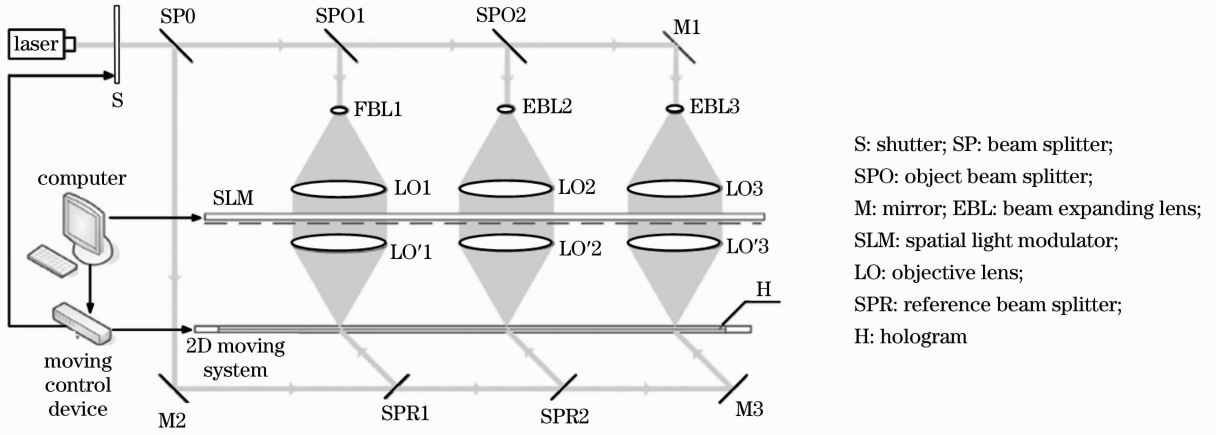


图4 记录装置

Fig. 4 Recording setup



图5 再现像三个视角的观察效果

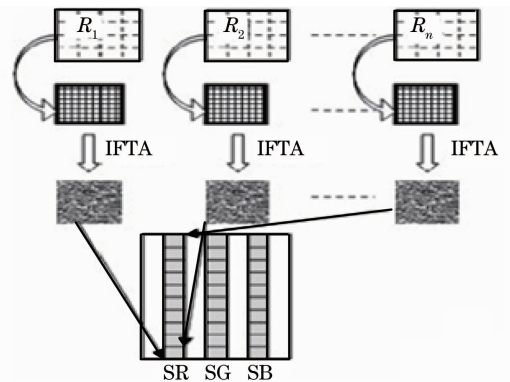
Fig. 5 Reconstructed images in three different viewing angles

的基本原理,通过分区域分幅的方式对多视角图形的波前进行数字化编码,通过迭代傅里叶变换(IFTA)^[15]获得夫琅禾费光场分布,在位相型硅基液晶空间光调制器上按视角顺序输入该编码信息,利用透镜的傅里叶变换特性再现多视角子图像,通过干涉法记录并逐区域拼接获得完整的全息图像。

该方法的实施步骤为:1)获得3D物体的分视角平面数字图像;2)对每幅图像进行分色并分割成子图,再对子图进行分组,在各图像中对应位置相同的子图为一组;3)针对每一组子图,采用IFTA算法计算每一子图在远场的光场分布,提取位相信息,将这一组子图的位相信息分布按视角排列,编码成 H_1 ;4)用空间光调制器显示 H_1 ,并放置于透镜的前焦面,在透镜后焦面上通过透镜的傅里叶变换的平移不变形性,形成多视角图像再现,引入相干光,通过干涉光路在记录材料上记录从空间光调制器上再现出的图像;5)对应下一组子图的位置,移动记录材料的位置;6)重复步骤3)~5),至所有子图记录完毕后,即完成3D图形的全息记录过程。

该方法的记录方式为:原图像与参考光在全息干板同侧干涉曝光记录。对分色处理的图像分别编码可以实现彩色彩虹全息显示。图6为数字化 H_1 编码示意图。

中国海洋大学的王金城等^[16, 17]为了实现可在白光下再现的全视差拼接合成全息图,结合图像处理技术,合成全息图的原理,提出一种激光直写拍摄技术。实验得到了具有 57° 的较大观察视场的数字合成全息图,并实现了 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 大面积拼接。这种技术利用合成全息图自动拍摄装置,结合图像处理技术和计算机自动控制技术,避免了母全息图的制作过程,用激光打点一次完成白光再现合成3D全息图的制作。利用这种技术还可以将一幅全息图分割成若干单元分别制作,然后再拼接复原成一幅大面积显示全息图,从而解决了超大面积全息图制作的困难,并且降低了制作成本。图7为原始图像序列,其制作步骤:1)原始图像序列由软件生成,像素总量为 $500\text{ pixel} \times 500\text{ pixel}$ 的原始图

图6 数字化 H_1 编码示意图Fig. 6 Schematic diagram of digital coding H_1

像(如图7所示);2)原始各视角图相同位置像素组合生成子图(Hogel),其采用的方法也是点阵合成法(如图8所示);3)子图像的曝光记录。

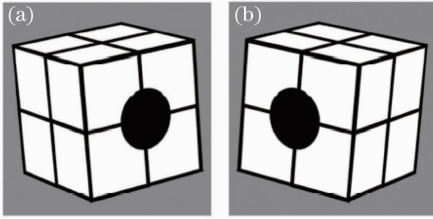


图7 原始图像序列(其中的两幅)

Fig. 7 Examples of original image series of a cube

实验所采用的激光器为氦氖激光器,功率70 mW,记录材料为银盐干板.干板上下左右移动步长设定为1 mm,曝光 50×50 次,每个点曝光时间3 s,最终得到全息图尺寸为 $5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$ (图9所示).该方法的记录方式为:携带子图(Hogels)信息的物光与参考光干涉记录。

日本东京工业大学的 Yamaguchi 等^[18,19]提出基于高密度光场重建的彩色全视差全息立体图制作方法.基于高密度光场重建的全息显示方法的基本原理是:1)利用线跟踪法或者图像渲染技术获取一系列曝光图像;2)通过 SLM 承载图像分别在相对应的阵列位置干涉曝光;3)白光再现.这种方法中采用厚全息记录材料记录体全息图,厚度约为 $10 \mu\text{m}$,可在白光下再现.如果采用红绿蓝三个激光器就可以实现彩色图像,图10为再现效果图.其系统结构如图11所示。

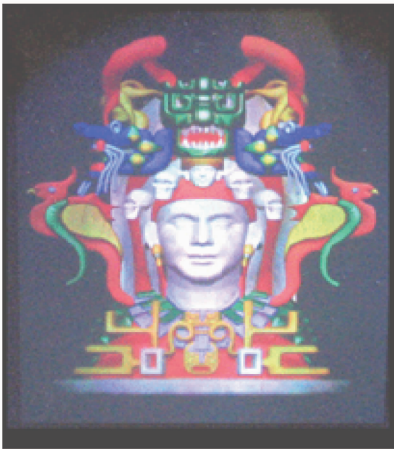


图10 再现效果

Fig. 10 Reconstructed image

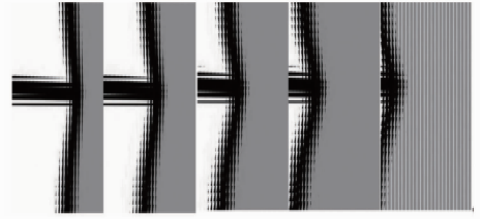


图8 合成的 Hogel 图像(其中相邻的5幅图像)

Fig. 8 Computer generated hogels (adjacent 5 hogels are shown)

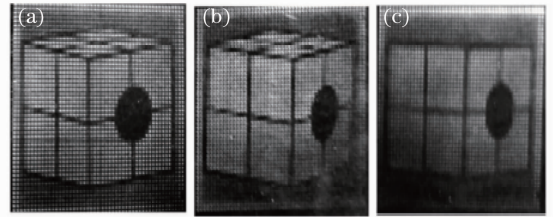


图9 实验拍摄的全视差全息图再现效果

Fig. 9 Three photos taken from different viewpoints of the full parallax hologram

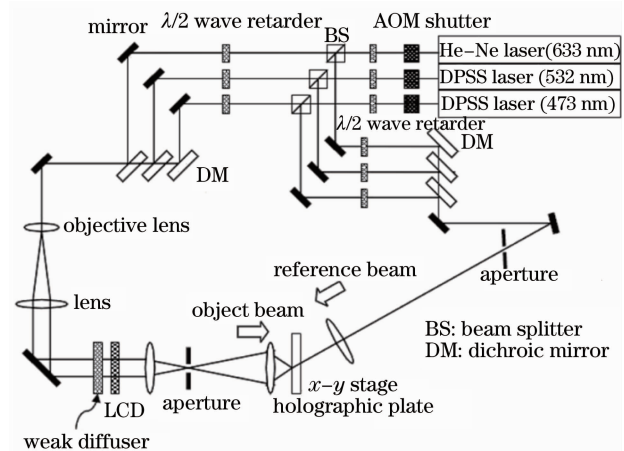


图11 光学系统装置图

Fig. 11 Schematic diagram of the optical system

3 无需参考光束的全息打印方法

用计算编码的方式代替传统光学全息记录过程,即简化了实验光路又解决了零级光和串扰光的麻烦.该方法把参考光直接编码在被打印的计算全息图中,在记录过程中无需借助参考光和物光干涉产生全息图。

日本的 Yoshikawa 等^[20~22]对数字全息条纹打印机进行了研究.采用傅里叶变换方法成功实现了彩虹全息图计算,并构建了基于硅上液晶显示芯片(LCOS)的全息打印系统,实现了彩虹全息图的打印.图12为条纹打印机原理图,图13为彩虹全息图的再现效果。

日本的 Yamaguchi 等^[18]基于波前的高密度光场重建全息显示.利用光线抽样板的方法来计算全息图

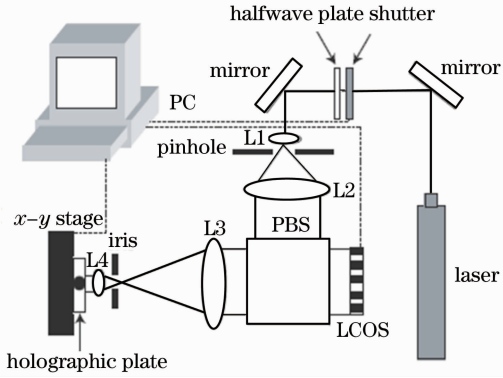


图 12 条纹打印机原理图

Fig. 12 Principle of the fringe printer

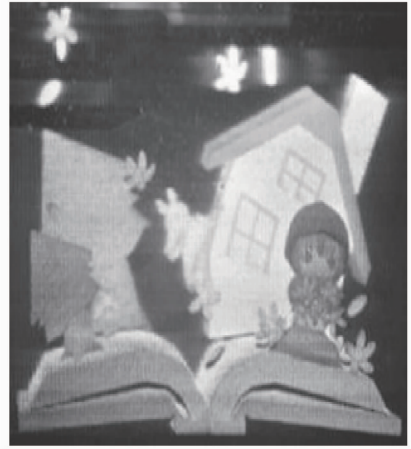


图 13 彩虹全息图再现效果

Fig. 13 Reconstructed image of rainbow hologram

(如图 14 所示),在靠近物体位置给定一个矩形窗口(光线采样平面),通过矩形窗口的光线利用计算机图像渲染技术派生出来。基于波前的高密度光场重建全息显示基本原理:1)在物体前放置抽样板,采集图像;2)随机相位与采样图像结合并进行傅里叶变换;3)模拟离轴干涉法生成计算全息图;4)单幅全息图分别缩微打印。该计算方法的原理为视角投影图(加随机相位)的傅里叶变换加菲涅耳衍射过程。图 15 为计算全息打印机光学系统结构,图 16 为采用光线采样面法获得的全息图的再现结果。

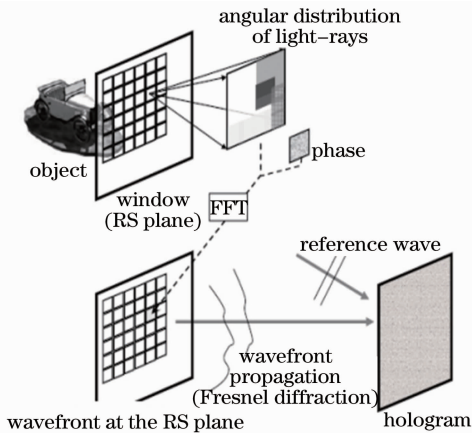


图 14 基于光线采样平面的计算全息原理示意图

Fig. 14 Schematic diagram of CGH calculation technique using ray sampling plane

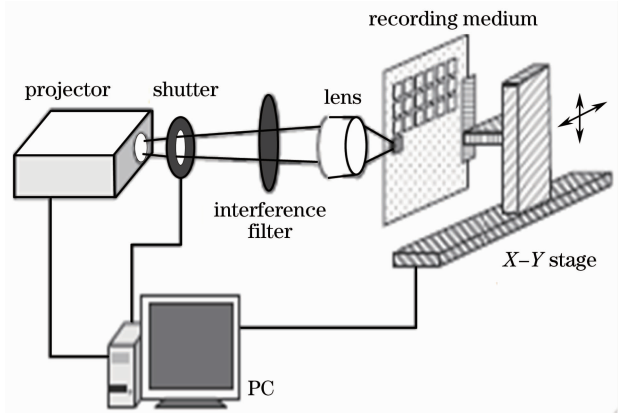


图 15 计算全息打印机光学系统结构

Fig. 15 Optical setup of CGH printer

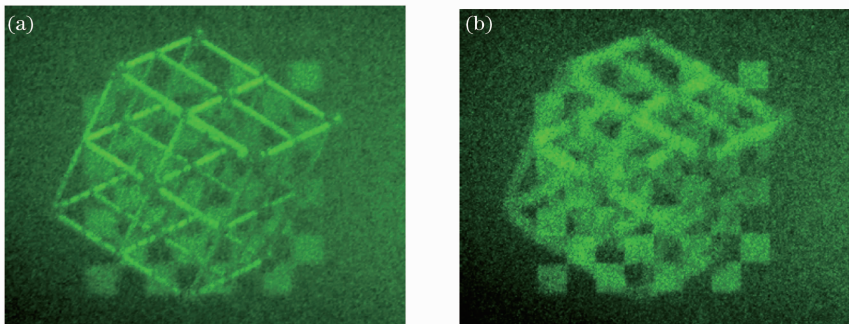


图 16 采用光线采样面法的全息再现结果。(a)聚焦前面物体;(b)聚焦后面物体

Fig. 16 Optical reconstruction using ray-sampling planes. (a) Camera focus is adjusted to front object; (b) camera focus is adjusted to background object

4 结 论

全息打印技术是光、机、电和计算机技术的高度集成,与纯光学方法记录 3D 实际物体全息图的方式相比,全息打印的特点是灵活性好,可重复性好,可实现真实场景及虚拟 3D 场景的全息显示。全息打印中往往需要对复杂 3D 场景进行信息处理和编码,并通过模拟算法实现全息图的计算。随着一些快速计算软件和硬件的出现,全息图计算的速度已经得到显著提高。近年来,科研工作者在该领域的研究已取得了较大的进展,但目前全息打印技术仍不够成熟。如何把打印全息图做精、做大、做好,使其得到真正广泛的应用,仍有许多问题亟待解决。尤其是在彩色 3D 场景的信息处理及编码方法、高质高效的彩色全息打印系统设计、高性能真彩色记录材料的研制等方面仍具有较大的发展空间。

参 考 文 献

- 1 Yu Meiweng. Optical Holography and Its Application[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1996
于美文. 光学全息及应用[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1996
- 2 Zhang Xiangsu, Liu Shou, Guo Huaimei *et al.*. Fabrication technique and special characteristic of rainbow holograms with large illumination angle[J]. *Laser J.*, 2000, **21**(3): 56~57
张向苏, 刘 守, 郭怀梅 等. 大角度照明彩虹全息图制作技术及特性[J]. 激光杂志, 2000, **21**(3): 56~57
- 3 M. Yamaguchi, N. Ohyama, T. Honda. Holographic 3-D printer[C]. *SPIE*, 1990, **1212**: 84~92
- 4 K. Nobuhiro, T. Takahiro, S. Akira. Hologram print system and holographic stereogram [P]. U. S. Patent, 6600580. 2003-07-29
- 5 Xie Jinghui, Zhao Yeling, Yu Meiwen. Traversing area partition technique and its application in 2D/3D embossing holograms[J]. *Acta Optica Sinica*, 1988, **8**(5): 410~416
谢敬辉, 赵业玲, 于美文. 横向面积分割法及其在二维/三维模压全息图中的应用[J]. 光学学报, 1988, **8**(5): 410~416
- 6 Ying Chaofu, Ma Lihong, Wang Hui. Digital holograms with large viewing angle[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(1): 87~91
应朝福, 马利红, 王 辉. 大视角数字全息的研究[J]. 中国激光, 2005, **32**(1): 87~91
- 7 Jing Hongzhen, Li Yong, Wang Hui *et al.*. The design of auto-microcopy system for digital holograms[J]. *Chin. J. Sci. Instru.*, 2006, **27**(3): 233~236
金洪震, 李 勇, 王 辉 等. 数字全息图缩微输出系统设计[J]. 仪器仪表学报, 2006, **27**(3): 233~236
- 8 Yu Xiaoyan, Rong Xianwei, Zhang Biao *et al.*. Multi-channel holographic recording method for stereo display of digital information[P]. Chinese Patent, ZL 200910307915.6. 2011-01-05
于晓艳, 荣宪伟, 张 飙 等. 数字信息立体显示的多通道全息记录方法 [P]. 中国, ZL 200910307915.6. 2011-01-05
- 9 T. H. Jeong, R. J. Ro, R. W. Aumiller. Return of the Leith-Upatnieks transmission hologram[C]. *SPIE*, 2000, **4149**: 390~396
- 10 Zheng Huadong, Yu Yingjie, Cheng Weiming. A review on three-dimensional display techniques[J]. *Opt. Techniq.*, 2008, **34**(3): 426~434
郑华东, 于瀛洁, 程维明. 三维立体显示技术研究新进展[J]. 光学技术, 2008, **34**(3): 426~434
- 11 Hou Ruining. The Study of Three-Dimensional Displaying by Computer-Generated Hologram[D]. Chongqing: Chongqing University, 2007
侯瑞宁. 计算全息三维显示的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2007
- 12 Peng Wanjuan, Wang Ding. Multi-dot synthetic full-parallax hologram[J]. *J. Chongqing University*, 2007, **30**(11): 125~128
彭婉娟, 王 丁. 全视差点阵合成全息图[J]. 重庆大学学报, 2007, **30**(11): 125~128
- 13 X. W. Rong, X. Y. Yu, C. X. Guan. Multichannel holographic recording method for three-dimensional displays[J]. *Appl. Opt.*, 2011, **50**(7): 77~80
- 14 Wan Yuanhong, Zhang Jin, Pu Donglin *et al.*. Making three-dimensional holograms with a novel digital method[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(7): 1268~1271
万远红, 张 瑾, 浦东林 等. 一种三维全息图的数字化实现方法[J]. 光子学报, 2010, **39**(7): 1268~1271
- 15 M. Hacker, G. Stobrawa, T. Feurer. Iterative transform algorithm for phase-only pulse shaping[J]. *Opt. Express*, 2011, **9**(4): 191~199
- 16 Guo Chunhua, Yu Jia, Wang Jincheng. Laser direct writing of full-parallax synthetic hologram[J]. *Acta Photonica Sinica*,

2010, **39**(3): 518~521

郭春华, 于佳, 王金城. 全视差合成全息图的激光直写拍摄[J]. 光子学报, 2010, **39**(3): 518~521

17 Wang Jincheng, Guo Huanqing, Lang Haitao *et al.*. A system of digital synthetic generated hologram[J]. *J. Optoelectron • Laser*, 2002, **13**(7): 740~745

王金城, 郭欢庆, 郎海涛等. 数字合成全息系统[J]. 光电子·激光, 2002, **13**(7): 740~745

18 M. Yamaguchi. Ray-based and wavefront-based holographic displays for high-density light-field reproduction[C]. *SPIE*, 2011, **8043**: 804306

19 S. Maruyama, Y. Ono, M. Yamaguchi. High-density recording of full-color full-parallax holographic stereogram[C]. *SPIE*, 2008, **6912**: 69120N

20 H. Yoshikawa, K. Takei. Development of a compact direct fringe printer for computer-generated holograms[C]. *SPIE*, 2004, **5290**: 114~121

21 H. Yoshikawa. Research activities on digital holographic displays in Japan[C]. *SPIE*, 2011, **8043**: 804305

22 H. Yoshikawa, T. Yamaguchi. Computer-generated holograms for 3D display[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, **7**(12): 1079~1082