

采用视角切片法提高全息体视图再现视差图像分辨率

裴 闯^{1,2} 蒋晓瑜¹ 闫兴鹏¹ 赵 锴¹ 程长青¹

¹装甲兵工程学院信息工程系, 北京 100072

²中国人民解放军61135部队, 北京 102211

摘要 针对利用液晶空间光调制器再现全视差计算全息体视图的过程中,再现视差图像分辨率较低的问题,提出了一种视角切片法。设定全息体视图平面与观察平面之间的距离为有限远,全息体视图上每一个全息单元由再现一个点变成再现一定宽度的视角切片。设定了视差图像、视角切片与全息单元频谱之间的对应关系,根据观察距离与全息单元尺寸计算了对应的视角切片宽度。基于液晶空间光调制器进行了全息体视图的再现实验,结果表明,视角切片法能够将再现视差图像的分辨率提高8倍,清晰地再现视差图像的细节特征。并分析了再现距离对视角切片法全息体视图再现质量的影响。

关键词 全息; 三维显示; 全息体视图; 视角切片

中图分类号 O438.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.090901

A Novel Perspective Slice Method to Improve Resolution of Reconstruction Parallax Image in Holographic Stereogram

Pei Chuang^{1,2} Jiang Xiaoyu¹ Yan Xingpeng¹ Zhao Kai¹ Cheng Changqing¹

¹Department of Information Engineering, Academy of Armored Force Engineering, Beijing 100072, China

²61135 PLA Troops, Beijing 102211, China

Abstract A novel perspective slice method is proposed to solve the low resolution problem in reconstruction parallax images of holographic stereogram. The distance between holographic stereogram plane and viewing plane is set to be finite. A perspective slice is reconstructed by a holographic element (hogel), which is only a point in traditional holographic stereogram. The relationships between parallax image, perspective slice and the spectra of hogels are designed. The width of perspective slice is calculated from viewing distance and the size of hogels. The holographic stereogram with perspective slice is reconstructed by optical system based on a spatial light modulator (SLM). The experimental results demonstrate that the proposed method can enhance the resolution of the reconstruction parallax image by 8 times and represent the details of objects effectively. The influences of reconstruction distance to the quality of parallax images are analyzed.

Key words holography; three-dimensional display; holographic stereogram; perspective slice

OCIS codes 090.1760; 090.2870; 100.2000; 100.6890

1 引言

生活在丰富多彩的三维世界中,传统的二维显示技术越来越无法满足人眼的视觉需求。三维立体显示能够真实地还原出环境的深度信息,使显示的场景和物体具有真实立体感觉,是未来显示技术的发展方向,在工业、军事、医学与科研领域都具有广阔的应用前景。目前的三维立体显示技术主要包括头盔显示器^[1]、三维立体眼镜^[2]、透镜阵列立体显示^[3]、体三维显示^[4]以及全息三维显示^[5]等。其中,全息显示技术由于能够完整地记录和再现物体的波前信息,观察者无需佩戴额外的眼镜即可以获得逼真的三维立体感,是目前三维

收稿日期: 2014-10-17; 收到修改稿日期: 2015-01-31; 网络出版日期: 2015-08-13

基金项目: 全国优秀博士学位论文作者专项资金资助项目(201432)、北京市自然科学基金(4152049)、北京市科技新星计划

作者简介: 裴 闯(1985—),男,博士研究生,主要从事数字全息及光电信息处理等方面的研究。

E-mail: lnxiaopeiwinwin@163.com

导师简介: 蒋晓瑜(1967—),男,教授,博士生导师,主要从事信息光学及三维全息显示技术等方面的研究。

E-mail: jiangxiaoyu2007@gmail.com

立体显示技术的研究热点^[6-7]。

计算全息技术采用计算机模拟光学全息过程,获得三维物体的全息图,避免了光学全息复杂的光路系统和繁琐的制备过程,能够再现物体的三维形态,并且适用于显示那些数学描述已知但实际不存在的物体。但是,计算全息显示技术受到数据源获取难度高、计算量大、空间带宽积高等诸多问题的困扰^[8]。计算全息体视图技术是对双目视差原理与全息技术的综合运用。该技术利用三维物体一系列的二维视差图像生成全息图,数据获取简单方便;采用人眼双目视差原理在大脑中重构物体的三维图像,使用较少的数据获得较高质量的成像效果,避免了传统计算全息技术数据源获取难度较高以及计算速度缓慢等问题。全息显示领域历史上最为成功的是麻省理工学院基于声光调制器的 Holo-Vedio 系统^[9-11],该系统采用全息单元(Hogel)的思想,能够实现水平视差三维显示。然而,更接近于真实世界立体感觉的全视差全息体视图,是全息体视图的最终发展方向。同时,随着技术的发展,全息显示的承载器件多为数字微反射镜(DMD)以及液晶空间光调制器(LC-SLM)等。因此,本课题组提出了全视差计算全息体视图,并基于液晶空间光调制器实现三维物体的多视角全视差再现^[12-13]。

在全视差计算全息体视图中,视差图像的分辨率与全息单元的尺寸呈反比关系。由于空间光调制器的像素总量十分有限,获得高分辨率的再现视差图像是十分困难的。尽量减少全息单元的尺寸,即全息单元中包含更少的像素数,是提高再现视差图像分辨率最直接有效的方法。但是,全视差全息体视图视差图像是通过控制全息单元不同的频谱成分获得的,过小的全息单元,其对频谱成分的控制能力会减弱,造成频谱图像再现的不精确,进而影响到视差图像的质量。另一类提高全息体视图再现视差图像分辨率的常用的方法是时分复用法。一种方案是通过高速刷新空间光调制器中的全息体视图^[14],利用人眼的视觉暂留效应,获得视觉上更好的再现图像。然而,目前商用的液晶空间光调制器的刷新频率为 60 Hz,而人眼视觉的时间分辨能力为 24 Hz,商用的空间光调制器在时间频率上并没有较大的优势。另一种方案是多个空间光调制器的拼接^[15],包括平面拼接或者环形拼接;或者是采用光机扫描的方法,通过水平方向和垂直方向的扫描扩大观察视角和图像质量。但是,这两种方法都面临着系统价格昂贵、光学和机械结构复杂等问题的困扰。

本文根据全视差计算全息体视图原理,提出了一种视角切片法。将观察平面与全息体视图平面之间的距离设定为有限远,摄像机拍摄的三维物体视差图像被分割为具有一定尺寸的视角切片,每一个视角切片由全息单元衍射生成。在观察平面的某一位置,视差图像由不同全息单元衍射的视角切片拼接而成。因此,该方法能够在保证全息单元较大尺寸的前提下,提高再现视差图像的分辨率,获得更高质量的三维再现效果。基于液晶空间光调制器对视角切片法计算全息体视图进行了再现实验,对结果进行了分析。

2 全视差计算全息体视图

全视差全息体视图系统的结构如图 1(a)所示。定义直角坐标系 $O-xyz$, 全息体视图所在平面为 $x-y$ 平面,全息体视图再现平面即人眼观察平面为 f_x-f_y 平面,两者距离为 z 。

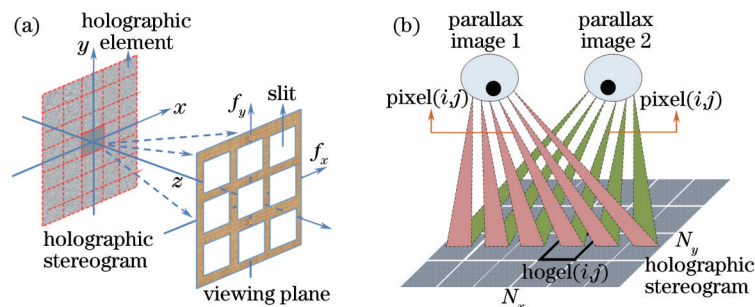


图 1 (a) 全视差计算全息体视图结构; (b) 视差图像与全息单元的对应关系
Fig.1 Structure of computer-generated full parallax holographic stereogram;
(b) relationship between parallax image and holographic element

全息体视图 $x-y$ 平面被空间采样为多个二维全息单元。每一个全息单元具有向空间不同方向衍射光线的的能力。全息体视图向再现区域的不同方向衍射三维物体不同的视差图像,相当于将再现平面 f_x-f_y 划分为多个观察狭缝,人眼瞳孔在不同狭缝处看到物体的不同视角,利用人眼双目视差效应产生三维立体感。

对于全息体视图平面上的全息单元,观察平面位于其夫琅禾费衍射区内,即观察平面与全息单元的距离可以视为无穷远。这样,在观察平面上透过一个狭缝看全息体视图,由于全息单元微小的尺寸,每一个全息单元都被视为一个像素点。任意一个全息单元向不同的观察狭缝衍射光线,形成视差图像中的一个像素。例如,在图1(b)中,全息单元 (i,j) 衍射形成视差图像1与视差图像2中的像素 (i,j) 。三维物体某一视角的图像,如视差图像1或视差图像2,是由全息体视图平面上的所有全息单元向同一方向衍射光形成的。因此,视差图像的分辨率与全息体视图平面上全息单元的数量是相等的,为 $N_x \times N_y$ 。在全息体视图平面上,全息单元的数量与全息单元的大小是呈反比的。因此,全视差全息体视图系统中,再现视差图像的分辨率与全息单元的大小呈反比关系。

对于全息显示采用的商用液晶空间光调制器而言,其空间带宽积是十分有限的。为了保证全视差全息体视图的再现质量,应该尽量增加全息单元的尺寸,即增加全息单元中包含的像素数量。然而,全息单元尺寸的增加,会造成全息体视图平面上全息单元数量的减少,导致再现视差图像的分辨率很低,无法有效地表现三维物体的视差特征。

3 视角切片法

在全视差计算全息体视图中,拍摄视差图像的摄像机平面位于全息体视图平面的无穷远处,以保证观察平面位于全息单元的夫琅禾费衍射区内。这样,可以认为所有全息单元向同一拍摄位置发出的光线都是平行的,如图2(a)所示,该方法称之为无穷远相机法。人眼在观察平面观察时,全息体视图平面上的每一个全息单元都被人眼视为一个点。由此可以得到视差图像的分辨率等于全息体视图平面上全息单元的数量。传统的无穷远相机法计算和再现过程非常简单,但是在一个观察点,每一个全息单元仅仅表现一个像素点,因此再现视差图像的分辨率受到了极大的限制。

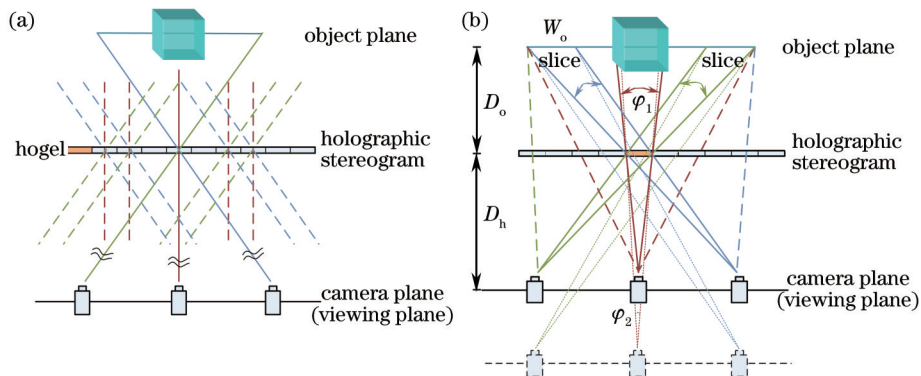


图2 (a) 无穷远相机法和 (b) 视角切片法原理图

Fig.2 (a) Principle of infinite camera method and (b) perspective slice method

为了解决该问题,将摄像机向前移动到距离全息体视图平面有限距离 D_h 处,如图2(b)所示。此时,每一个摄像机拍摄到的视差图像,跨越了若干个全息单元。同时,每一个全息单元不能被视为一个点,而是向不同方向分别衍射若干个宽度为 W_o 的视角切片。每一幅视差图像都是由所跨越的全息单元衍射的视角切片拼接而成。在全息体视图平面上全息单元数量相等的情况下,全息单元由表现一个像素点到表现宽度 W_o 的视角切片,再现视差图像的分辨率能够得到提高。

在视角切片法中,由于观察平面与全息体视图平面之间的距离为有限远,视角切片的大小与观察距离 D_h 及物面距离 D_o 是相关的。如图2(b)所示,在同样的物面距离下,当观察平面(摄像机平面)向后移动到虚线位置时,摄像机对于全息单元的张角由 φ_1 减小到 φ_2 ,视角切片的宽度也会随之下降。所以,视角切片法中,再现视差图像的分辨率随着全息体视图平面与观察平面之间的距离增加而不断减小。

全息单元尺寸 δ_h 、观察距离 D_h 、物面距离 D_o 、张角 φ 与视角切片的宽度 W_o 满足

$$\tan \frac{\varphi}{2} = \frac{\delta_h}{2D_h} = \frac{W_o}{2(D_h + D_o)}. \quad (1)$$

由此可以得到视角切片的像素数

$$n_p = \text{round}\left(\frac{W_o}{\Delta\xi}\right) = \text{round}\left[\frac{\delta_h(D_h + D_o)}{D_h \Delta\xi}\right], \quad (2)$$

式中 $\Delta\xi$ 为视角切片中像素点之间的间距, round 为取整运算。

视角切片法同样采用全息单元向不同方向衍射形成视差图像,进而使人眼产生三维立体视觉。与传统的无穷远相机法相比,视角切片法中每一个全息单元向观察狭缝衍射一个视角切片。对于一个全息单元而言,其频谱由不同视差图像抽取的视角切片组合形成。由视差图像生成全息单元的频谱过程如图3所示。

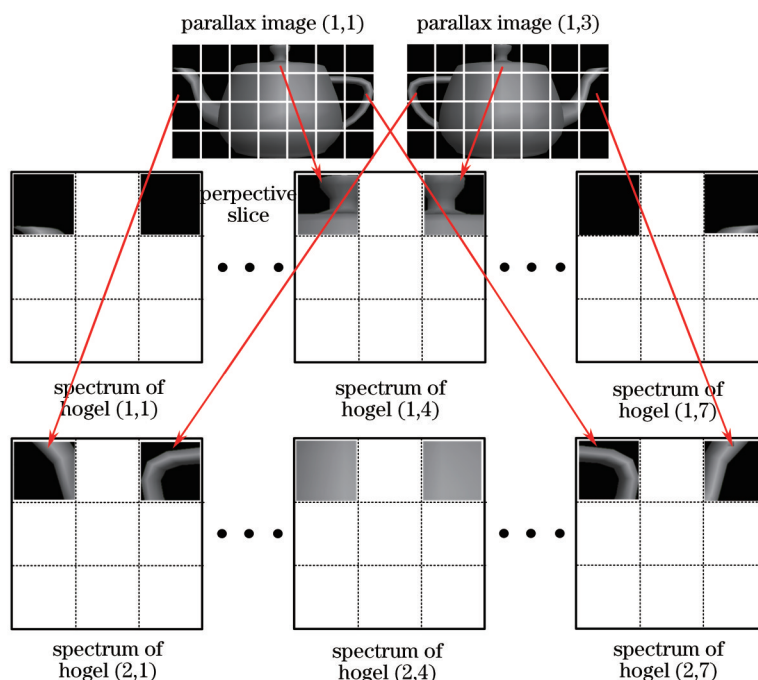


图3 视角切片法由视差图像生成全息单元频谱的过程

Fig.3 Generative process of hogel's spectrum from parallax images in perspective slice method

全息单元的频谱分割成 3×3 个区域,因此全息体视图能够再现 3×3 幅视差图像。选择一个茶壶作为再现物体,茶壶的两个视角分别作为视差图像(1,1)和视差图像(1,3)。全息单元为 $256 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$,液晶空间光调制器上的像素数量为 $1920 \text{ pixel} \times 1080 \text{ pixel}$,因此全息体视图平面上具有 7×4 个全息单元,每一幅视差图像被对应的分割为 7×4 个视角切片。视角切片按照全息单元的位置和频谱分布情况被抽取组合到各个全息单元的频谱当中。例如,视差图像(1,1)的第(2,1)个视角切片被分配到全息单元(2,1)频谱中位置为(1,1)的区域;同理,视差图像(1,3)的第(1,4)个视角切片被分配到全息单元(1,4)频谱中位置为(1,3)的区域。这样,将三维物体的视差图像分割成视角切片并组合提取出全息单元的频谱,而后,采用迭代傅里叶算法^[16],由全息单元的频谱计算生成全息单元。遍历计算全息体视图平面上所有的全息单元后,可以得到三维物体的视角切片法全息体视图。

4 实验与结果分析

为了验证所提出的全息体视图视角切片计算方法,以液晶空间光调制器为基础,构建光学再现系统,如图4所示。液晶空间光调制器采用 Holoeye 公司的 HEO1080p 型,分辨率为 $1920 \text{ pixel} \times 1080 \text{ pixel}$,像素间隔为 $8 \mu\text{m}$ 。以 He-Ne 红光激光器(SLM)作为再现光源,波长为 632.8 nm 。激光器发出的激光经过衰减、扩束准直之后,得到均匀的出射光斑,照射到空间光调制器的面板上。采用提出的视角切片法计算得到的全息体视图,由计算机通过驱动电路加载到空间光调制器中。空间光调制器对再现平面波进行调制,在再现区域衍射成三维物体的不同视角图像。选择佳能 EOS 500D 作为记录相机(其像素数为 $4752 \text{ pixel} \times 3168 \text{ pixel}$,像素间隔为 $4.7 \mu\text{m}$),在拍摄平面上水平移动,获取再现视差图像。

在实验中,首先设定全息单元中的像素数量为 $256 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$,根据前面的分析可知,此时液晶空间光调制器上全息单元的数量为 7×4 ,即再现视差图像的分辨率仅为 7×4 ,是非常低的。设物面距离 $D_o =$

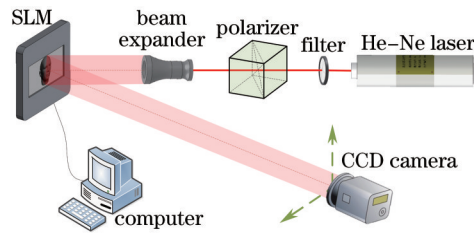


图4 全息体视图光学再现系统

Fig.4 Optical reconstruction system of holographic stereogram

1400 mm, 观察平面与全息体视图平面之间的距离 $D_h = 800$ mm, 根据(2)式计算得到全息单元能够表现的视角切片像素数为 $4 \text{ pixel} \times 4 \text{ pixel}$ 。这样, 对于全息体视图平面上的 7×4 个全息单元, 再现视差图像的分辨率由 7×4 提高到 28×16 , 再现视差图像的分辨率提高到原来的4倍。图5(a)为视角切片的像素数量逐渐增加时再现点的分布情况。左侧全息单元由再现一个点变成再现 $4 \text{ pixel} \times 4 \text{ pixel}$ 的视角切片, 而右侧全息单元的再现点保持不变。图5(b)和(c)分别为采用传统无穷远相机法和所提出的视角切片法再现的水壶两个视差图像。在图5(b)中可以看到, 采用传统方法构建的全息体视图, 其再现视差图像分辨率仅为 7×4 。由于分辨率太低, 水壶的基本特征无法有效变现。而在图5(c)中, 采用视角切片法之后, 全息体视图再现视差图像分辨率提高到了 28×16 , 水壶的基本形状与特征能够分辨。在提高再现视差图像分辨率的同时, 由于全息单元的尺寸没有变化, 视角切片法能够保证再现点的聚焦特性, 再现点的清晰度没有受到影响, 从而能够保证再现视差图像的质量。

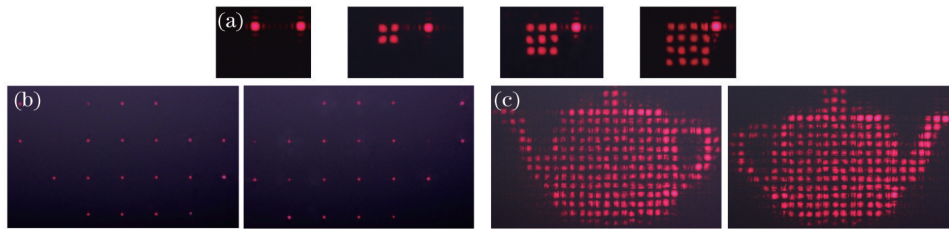
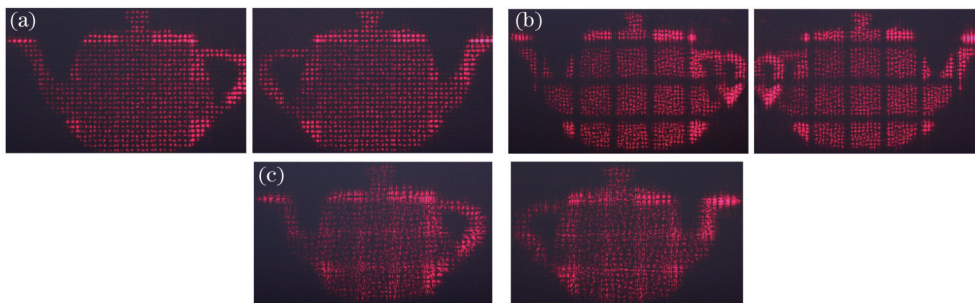
图5 观察距离为 $D_h = 800$ mm 时, (a) 全息单元再现点变化情况; (b) 传统方法再现视差图像; (c) 视角切片法再现视差图像

Fig.5 (a) Distribution of points reconstructed by hogels; (b) reconstruction parallax images of traditional method; (c) perspective slice method when viewing distance is 800 mm

将观察距离设定为 $D_h = 400$ mm, 根据(2)式计算得到 $n_p = 8$, 即全息单元表现的视角切片像素数量为 8×8 。这样, 全息体视图的再现视差图像的分辨率提高到了 56×32 , 为原来的8倍。这与前面的分析相一致, 即当观察距离减小时, 视角切片的尺寸增加, 再现视差图像的分辨率能够进一步得到提高。在距离全息体视图平面 400 mm 处, 拍摄到的水壶两幅再现视差图像如图6(a)所示。可以看到, 当分辨率进一步提高后, 两个视差图像中壶盖、壶嘴的细节部分都得到了较好的表现。

图6 视角切片为 8×8 时, 距离全息体视图平面 (a) 400 mm、(b) 380 mm 和 (c) 420 mm 的再现视差图像Fig.6 Reconstruction parallax images at (a) 400 mm、(b) 380 mm and (c) 420 mm away from holographic stereogram plane when the perspective slice is 8×8

但是, 相对于传统的全息体视图计算方法, 视角切片法对观察距离更为敏感。因此, 采用视角切片法计算的全息体视图, 其观察距离必须严格限制在设定的距离, 否则再现图像的质量将迅速下降。对于按照视角切片法, 设定观察距离 $D_h = 400$ mm 计算的全息体视图, 在距离全息体视图平面 380 mm 和 420 mm 处拍

摄到的再现视差图像分别如图 6(b)和 6(c)所示。在图 6(b)中,由于该位置处的实际视角切片尺寸增加,因此不同的全息单元再现的视角切片之间出现了很大的空隙。而在图 6(c)中,随着距离的增加,实际的视角切片尺寸减小,于是全息单元再现的视角切片之间出现了交叠。再现视角切片的分离和交叠都严重影响了再现图像的质量。因此,视角切片法计算的全息体视图,观察时必须设定位置,以保证再现的视角切片精确地拼接成视差图像。

5 结 论

本文针对计算全息体视图再现视差图像分辨率较低、无法表现物体细节的问题,提出了视角切片法。将观察平面与全息体视图平面之间的距离由无穷远变为有限远,使全息单元衍射形成视差图像的一个视角切片。在观察平面的任一狭缝,视差图像由全息体视图平面上所有全息单元再现的视角切片拼接而成。设计了三维物体视差图像与全息单元频谱的对应关系,由视差图像切割成视角切片,并组合形成全息单元频谱,进而计算全息单元,获得三维物体全息体视图。基于液晶空间光调制器构建光学系统对所提出的视角切片法进行了实验验证。结果表明,提出的视角切片法在不改变全息单元尺寸的前提下,将再现视差图像分辨率提高到了原来的 8 倍,能够较好地表现物体的细节特征,获得更好的三维再现效果。分析了观察距离对视角切片法全息体视图再现效果的影响。下一步,项目组将研究实现全视差全息体视图打印系统,并采用视角切片法,在不改变全息材料尺寸和全息单元数量的前提下,提高打印全息图的再现图像分辨率。

参 考 文 献

- 1 W T Song, Y T Wang, D W Cheng, *et al.*. Light field head-mounted display with correct focus cue using micro structure array[J]. *Chin Opt Lett*, 2014, 12(6): 060010.
- 2 P Aflaki, M Hannuksela, H Sarbolandi, *et al.*. Simultaneous 2D and 3D perception for stereoscopic displays based on polarized or active shutter glasses[J]. *J Visual Communication and Image Representation*, 2014, 25(4): 622-631.
- 3 Y H Kim, J H Park, H J Choi, *et al.*. Viewing-angle-enhanced integral imaging system using a curved lens array[J]. *Opt Express*, 2004, 12(3): 421-429.
- 4 Pan Wenping, Shen Chunlin, Cai Liang, *et al.*. Key technologies of interactive dynamic volumetric 3D display[J]. *Science & Technology Review*, 2011, 29(1): 44-51.
潘文平,沈春林,蔡亮,等.交互式动态体三维显示关键技术[J].*科技导报*, 2011, 29(1): 44-51.
- 5 S A Benton, V M Bove. *Holographic Imaging*[M]. New York: Wiley Interscience, 2008: 15-25.
- 6 S Tay, P A Blanche, R Voorakaranam, *et al.*. An updatable holographic three-dimensional display[J]. *Nature*, 2008, 451(7179): 694-698.
- 7 P A Blanche, A Bablumian, R Voorakaranam, *et al.*. Holographic three-dimensional telepresence using large-area photorefractive polymer[J]. *Nature*, 2010, 468(7320): 80-83.
- 8 M Lucente. Holographic bandwidth compression using spatial sub-sampling[J]. *Opt Eng*, 1996, 35(6): 1529-1537.
- 9 M Lucente. *Diffraction-Specific Fringe Computation for Electro-Holography*[D]. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 1994: 25-87.
- 10 W Plesniak. Incremental update of computer-generated holograms[J]. *Opt Eng*, 2003, 42(6): 1560-1571.
- 11 W Plesniak, M Halle, V M Bove, *et al.*. Reconfigurable image projection holograms[J]. *Opt Eng*, 2006, 45(11): 115801.
- 12 Pei Chuang, Jiang Xiaoyu, Zhao Kai, *et al.*. A fast realization method of full parallax holographic stereogram for 3D object[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 4(22): 1029-1036.
裴闯,蒋晓瑜,赵锴,等.三维物体全视差全息体视图的快速计算[J].*光学精密工程*, 2014, 4(22): 1029-1036.
- 13 C Pei, X Yan, X Jiang. Computer-generated phase modulated full parallax holographic stereograms without conjugate images[J]. *Opt Eng*, 2014, 53(10): 103105.
- 14 T Shimobaba, T Ito. Color holographic reconstruction system by time division multiplexing with reference lights of laser[J]. *Opt Rev*, 2003, 10(5): 339-341.
- 15 H Joonku, 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.
- 16 R W Gerchberg, W O Saxton. A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures[J]. *Optik*, 1972, 35(2): 227-246.