

文章编号 1004-924X(2014)04-1029-08

三维物体全视差全息体视图的快速计算

裴 闯*, 蒋晓瑜, 赵 锴, 梁浩聪
(装甲兵工程学院 信息工程系, 北京 100072)

摘要:针对传统全息技术对三维数据源要求高、计算量大以及实现速度慢等问题,提出了一种三维物体全视差全息体视图的快速计算方法。该方法对全息面和再现面分别进行空间分割和频谱采样,通过迭代傅里叶变换算法计算多个基元全息图,叠加构成全息图单元。由摄像机获取三维物体不同角度的二维视差图像,基于人眼双目视差立体视觉原理,构建视差图像与全息图单元的对应关系。最后,利用全视差图像调制全息图单元中对应衍射方向的基元全息图,快速合成三维物体全视差全息体视图。基于液晶空间光调制器构建的光学系统对全息体视图进行了再现实验。结果表明,与传统全息图计算方法相比,本文方法容易获取数据源,计算量较小,能够快速计算全息体视图,实现三维物体不同视角图像的再现。

关键词:计算全息;三维显示;全息体视图;全息图单元;全视差

中图分类号:O438.1 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20142204.1029

Fast realization of full parallax holographic stereograms for 3D objects

PEI Chuang*, JIANG Xiao-yu, Zhao kai, LIANG Hao-cong

(Department of Information Engineering, Academy of Armored Force Engineering, Beijing 100072, China)

* Corresponding author, E-mail: Inxiaopeiwinwin@163.com

Abstract: A new fast method for generating a full parallax holographic stereogram of 3D objects was proposed to overcome the problems such as huge data, slow computation speeds and high requirements for the data source in computer-generated hologram technique. Firstly, spatial segmentation and spectral sampling were carried out on a hologram plane and a reconstructed plane respectively. Then, a series of perspective view images were captured by a moving camera according to the principle of binocular stereo-vision in the human visual system. The matching relationship between multi-view images and holographic elements was designed in this algorithm. The multi-view images were used to modulate primary elemental holograms in holographic elements to get the holographic stereogram of 3D objects. Finally, the holographic stereogram was reconstructed in an optical system based on the liquid spatial light modulator. The experimental result shows that the proposed holographic stereogram can realize the reconstruction of different parallax images of 3D objects.

Key words: computer generated holography; three dimension display; holographic stereogram; holographic element; full parallax

收稿日期:2013-07-11;修订日期:2013-08-20.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61205120)

1 引言

三维立体显示技术是人类最为理想的显示技术,是人们不断追求的目标。随着科技与信息技术的飞速发展,三维立体显示技术在战场指挥、医学影像处理、空中导航以及立体电视等领域都拥有广泛的应用前景。

因为全息三维显示技术能够完整地记录和重建三维物体的波前,提供所有视点、距离上的三维深度感知而成为最理想的三维显示技术,是学者们研究的热点^[1-3]。目前,三维物体的计算全息显示方法主要包括点源法^[4]、层析法^[5]、分数傅里叶变换法^[6]以及多视角投影法^[7-8]等。这些方法的不足之处在于获取大场景真实物体的三维深度数据十分困难;同时因其波前记录数据量巨大,对计算全息算法的速度及显示介质的空间带宽积提出了苛刻的要求,使得计算全息显示技术无法实时高效地再现三维物体。另外,由于三维全息显示的分辨率远远超过了人眼的分辨能力,造成了大量的信息浪费。

全息体视图^[9-11]利用三维物体一系列的二维视角图像生成全息图,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,仅需较少的数据就可获得较高质量的成像效果,避免了传统计算全息技术分辨率的浪费以及计算速度缓慢等问题。全息体视图是全息三维显示技术重要的发展方向之一,众多学者在该方向做了许多有益的尝试。麻省理工学院^[12-13]的空间成像小组以多个声光调制器(Acousto-Optic Modulator, AOM)为核心构建了水平视差(Horizontal Parallax Only, HPO)的三维全息体视图显示系统,但该系统需要机械结构扫描显示,结构较为复杂。韩国首尔国立大学的 Joonku Hahn 等人^[14]采用多个液晶空间光调制器环形拼接的方法,扩大了水平视差全息体视图的视角范围,但该系统结构复杂,且造价昂贵。我国浙江师范大学的王辉等人^[15]利用液晶空间光调制器的时分复用技术,实现了三维物体两个视角的动态全息显示。北京理工大学的谢敬辉等人^[16]利用自动分区伺服结构构造了彩虹全息图记录装置,提高了合成全息体视图的质量和制作效率。

目前,学者们的研究工作主要集中在水平视

差全息体视图上,而更接近于真实世界立体感觉的全视差全息体视图将是全息体视显示技术的终极发展方向。另外,全息体视图的计算速度依旧是困扰实时全息显示的主要问题之一。本文在现有的研究基础上,基于合成全息的基本思想,提出了一种三维物体全视差全息体视图的快速计算方法。该方法在全息面和再现面分别进行空间分割与频谱采样,利用叠加不同频谱基元全息图的全息图单元控制再现光的衍射方向。最后,采用摄像机获取的三维物体多角度二维图像对基元全息图进行调制,快速计算出三维物体的全息体视图。文中构建了基于液晶空间光调制器的全息再现系统,并对本文方法计算的全息体视图进行了光学再现,给出了实验结果。

2 基本原理

在全息图再现系统中,定义直角坐标系 $O-xyz$,全息图所在平面为 xy 平面,全息图再现平面即人眼观察平面为 $\xi\eta$ 平面,两者距离为 z ,如图 1 所示。

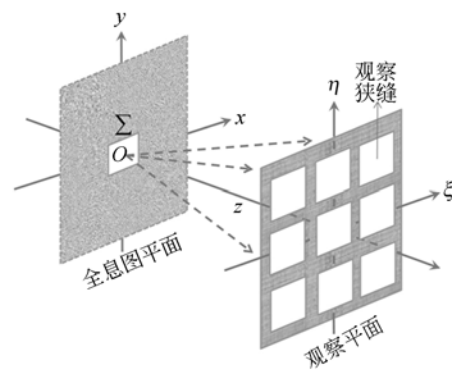


图 1 全息图再现系统结构

Fig. 1 Structure schematic of holographic reconstruction system

在传统的计算全息显示方法中,再现平面 $\xi\eta$ 上的每个点都是全息面上所有点共同作用产生的,由此在整个人眼观察区域逼近真实三维物体的波前。然而,这种运算同样产生了庞大的计算量,导致无法快速实时生成全息图。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角图像,相当于将再现平面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。

在图 1 中,对于全息面上的有限孔径 Σ ,当观察平面所在的区域为夫琅和费衍射区时,即观察平面与全息面的距离满足以下条件:

$$z \gg \frac{k}{2}(x^2 + y^2)_{\max}, \quad (1)$$

其中: $k=2\pi/\lambda$ 为波数, λ 为再现波长。有限孔径 Σ 在观察平面的衍射光场分布 $U(\xi, \eta)$ 可以表示为:

$$U(\xi, \eta) = \frac{1}{j\lambda z} \exp(jkz) \exp\left[\frac{jk}{2z}(x^2 + y^2)\right] \times \iint O(x, y) \exp\left[-j\frac{2\pi}{\lambda z}(\xi x + \eta y)\right] dx dy = \frac{1}{j\lambda z} \exp(jkz) \exp\left[\frac{jk}{2z}(x^2 + y^2)\right] \times \mathcal{F}\{O(x, y)\}_{\xi=\frac{x}{\lambda z}, \eta=\frac{y}{\lambda z}}, \quad (2)$$

其中: \mathcal{F} 为傅里叶变换符。上式表明,观察平面上的场分布 $U(\xi, \eta)$ 正比于全息面上有限孔径 Σ 透射光场分布 $O(x, y)$ 的傅里叶变换^[17]。因此,在夫琅和费衍射区再现全息图时,可以将再现图像视为全息图的频谱分布。

在全息面上,单个像素点只有亮度的明暗变化,无法直接控制再现光的传播方向。为了实现全息面在不同角度衍射不同视角图像,基于合成全息的思想,本文将全息面划分为多个有限孔径的全息图单元,如图 2 所示。全息图单元由多个基元全息图叠加而成。每个基元全息图具有相互独立的频谱分布 $U(\xi, \eta)$,其可以看作是频率不同的二维光栅,用来控制再现光的不同传播方向。叠加了多个基元全息图的全息图单元对再现平行光进行调制,作为点光源发出多个方向的光线。多个全息图单元射出的光线在空间相交后进入人

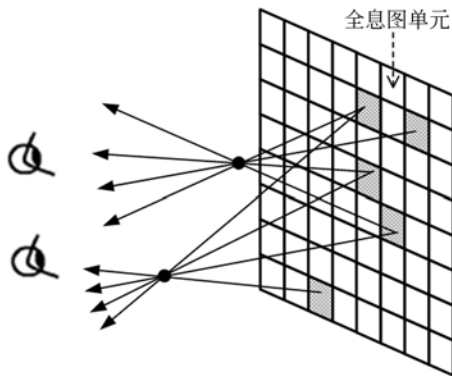


图 2 基于全息单元的三维物体重构

Fig. 2 3D object reconstruction based on holographic element

的双眼,由于光点空间位置上的差异,光线进入人眼的视角不同,使眼球发生转动的紧张程度也不同,根据这种不同,人眼视觉系统可以判别出物体的深度分布,形成三维视觉。

3 算法实现

3.1 基元全息图的计算

本文算法首先将全息面分割为多个全息图单元,每个全息图单元中包含一系列基元全息图。基元全息图设计为不同频率的数字光栅,来控制再现光的传播方向。

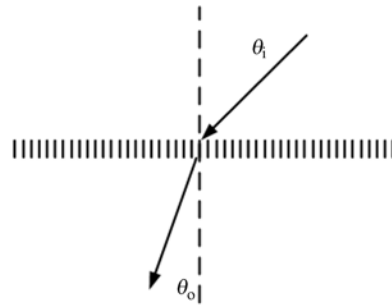


图 3 光栅衍射原理

Fig. 3 Grating diffraction principle

以图 3 所示的一维光栅为例,再现光透过基元全息图后方向发生偏转。根据基本衍射公式:

$$f\lambda = \sin \theta_o - \sin \theta_i. \quad (3)$$

在再现光入射角 θ_i 与波长 λ 一定的情况下,光栅出射光线的方向 θ_o 由光栅频率 f 决定。频率越高,衍射角度越大;频率越低,衍射角度越小。

由前面的理论分析可知,在远场夫琅和费衍射中,全息面的透射光场与再现像面的光场分布满足傅里叶变换关系。那么,不同频率的基元全息图对应不同的空间频谱。因此,本文对全息再现像面进行频谱采样,采样间隔为 Δf ,每个基元全息图对应空间的一个频谱范围。对全息面的频谱采样间隔越小,则再现精度越高,同时获得的基元全息图数量更多。

根据基元全息图在空域和频域的幅值限制,本文采用迭代傅立叶变换算法^[18]计算基元全息图的空间分布。设基元全息图的空间分布为 $t(x, y)$,由于采用平行光再现,其幅值约束为 $|t(x, y)|=1$ 。基元全息图的频谱分布为 $T(u, v)$,根据对再现频谱的采样结果,其频谱约束条件

为:

$$|T(u, v)| = 1, \quad i \cdot \Delta f < u \leq (i+1) \cdot \Delta f \\ j \cdot \Delta f < v \leq (j+1) \cdot \Delta f. \quad (4)$$

基元全息图的迭代流程如图 4 所示,计算过程为:首先在全息面以随机相位开始,经过傅里叶变换到再现面加上采样的频谱约束;傅里叶逆变换回全息面,加上空间分布的幅值约束。同时,如果再现面的频谱特征达到频率采样的约束要求,或者达到算法规定的最高迭代次数,则运算停止,输出基元全息图。

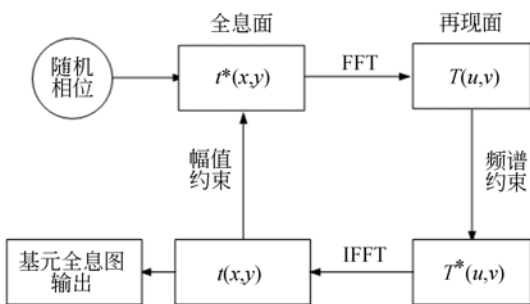
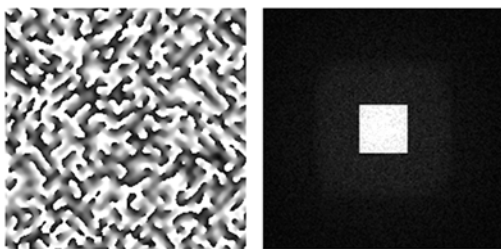


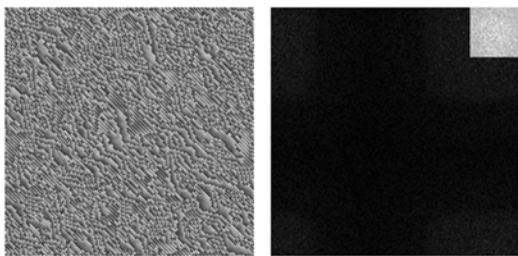
图 4 基元全息图迭代计算过程

Fig. 4 Iterative process of primary elemental hologram



(a) (3,3)基元全息图及其频谱

(a) (3,3) primary elemental hologram and its spectrum



(b) (1,5)基元全息图及其频谱

(b) (1,5) primary elemental hologram and its spectrum

图 5 基元全息图及其频谱

Fig. 5 Primary elemental holograms and their spectra

若对再现的空间频谱进行 5×5 采样,迭代计算 25 个基元全息图,分辨率为 200×200 。其中,第(3,3)幅和第(1,5)幅基元全息图的空间分布和频谱分布分别如图 5(a)和图 5(b)所示。可以发现,由于(1,5)幅基元全息图的空间分布变化频率更快,因此其频谱值更高,表现为对再现光有更大的偏转角度。

3.2 二维投影图像的获取

人的三维视觉感知主要分为生物物理刺激与生物心理刺激两部分。生物物理刺激包括眼的调节、汇聚、运动视差、双眼视差等。生物心理刺激包括因物体位置不同而产生不同的明暗、阴影、遮挡、透视现象等。其中,三维立体视觉最主要由人眼的双目视差产生。因此,本文利用三维物体的多视角视差图像计算全全息体视图。

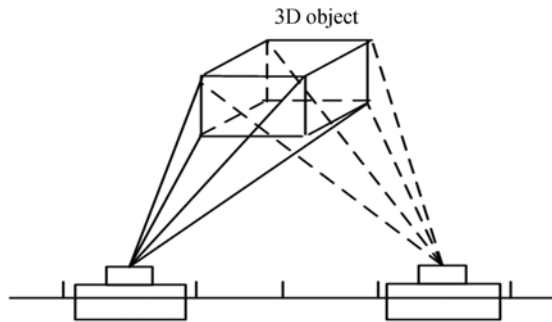


图 6 三维物体多视角图像的获取

Fig. 6 Acquisition of multi-view images for 3-D object

如图 6 所示,摄像机首先在一条水平线上从左至右相对于三维物体以固定速度移动,获取具有固定水平视差的序列图像;然后,摄像机在垂直方向移动,并做同样的水平扫描拍摄,从而获取三维物体一个视角范围内的全视差图像序列。该方法利用三维物体一系列不同视角的二维投影图像(也可以由计算机图形学的方法获得)作为计算全息图的数据源,将连续的三维物体表面信息转化为离散的二维图像信息,能够有效地压缩三维全息的计算数据量。

3.3 三维全息图的生成

利用获取的二维投影图像计算全全息体视图,本文设计了投影图像与全息面上的全息图单元之间的对应关系,如图 7 所示。三维物体某一视角的图像由在全息面上的多个全息图单元向同一方向衍射光形成。全息图单元由多个基元全息图组成,根据本文计算的基元全息图可知,其在再现面

上的频谱是相互独立的,因此,多个基元全息图可以相互叠加而不影响彼此的频谱分布。叠加的结果构成全息面上的一个全息图单元,它具有向再现空间不同方向衍射光的功能。多个全息图单元的多个衍射光构成了不同方向的视差图像,从而使人眼产生三维立体视觉。

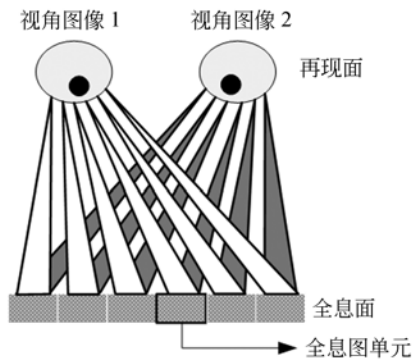


图 7 视角图像与全息单元的对应关系

Fig. 7 Matching relationship between multi-view images and holographic elements

根据视角投影图像与全息图单元的对应关系,本文由获取的多视角图像对全息图单元中对应方向的基元全息图进行调制生成三维物体的全息体视图。如图 8 所示。

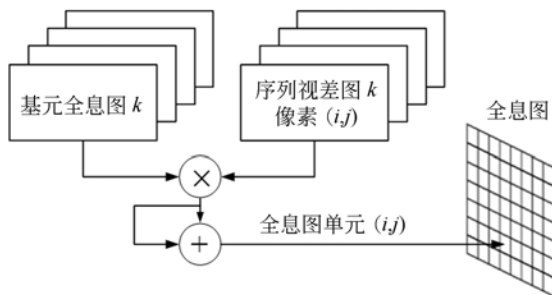


图 8 全息图计算过程

Fig. 8 Calculation process of hologram

预先对再现频谱进行 $N_x \times N_y$ 采样,迭代计算出 $N_x \times N_y$ 幅基元全息图。利用摄像机运动获取三维物体 $N_x \times N_y$ 幅的全视差图像。对于空间分割的全息面,全息图单元的数量与视差图像的分辨率相等,为 $M_x \times M_y$ 。由视差图像和基元全息图计算全息面上全息图单元的过程如式(5)所示:

$$H_{i,j} = \sum_{k=1}^{N_x \times N_y} I_{k,i,j} \times P_k, \quad (5)$$

其中: $I_{k,i,j}$ 为第 k 幅视差图像中第 i, j 个像素点的亮度值; P_k 为第 k 幅基元全息图的振幅分布; $H_{i,j}$ 为第 i, j 个全息图单元的振幅分布。遍历计算全息面上的 $M_x \times M_y$ 个全息单元后,由计算的全息图单元构成了三维物体的全息体视图。

相较水平视差全息体视图系统,全视差全息体视图的计算量和计算复杂度成倍增加。而在本文方法中,对于构建好的全息体视图显示系统而言,其基元全息图是相同的。因此,基元全息图可以通过预先计算并存储在计算机中,计算全息图的过程简化为根据三维物体的全视差视角图像直接对基元全息图调制相加。该方法可以方便地使用查找表技术,进而有效地提高三维物体全视差全息体视图的动态实现速度。

4 实验结果

实验以液晶空间光调制器(LCSLM)为基础,搭建了一套全息显示系统,用以验证本文提出的方法。系统装置如图 9 所示。其中,1 为半导体红光激光器,波长为 632 nm,2 为扩束镜,3 为空间光调制器及其驱动电路,4 为成像透镜,焦距为 150 mm,5 为 CCD 摄像机。入射激光经过扩束镜扩束后,得到均匀的出射光斑,照射到空间光调制器的面板上。系统选用的空间光调制器为纯相位型,分辨率为 $1\,920 \text{ pixel} \times 1\,080 \text{ pixel}$;相位调制范围为 2π ;填充因子 $> 87\%$;衍射效率 $> 60\%$;像素尺寸为 $8 \mu\text{m} \times 8 \mu\text{m}$,即系统的最小采样间隔为 $8 \mu\text{m}$ 。因此,本文计算的基元全息图最高频率为 125 cycle/mm。

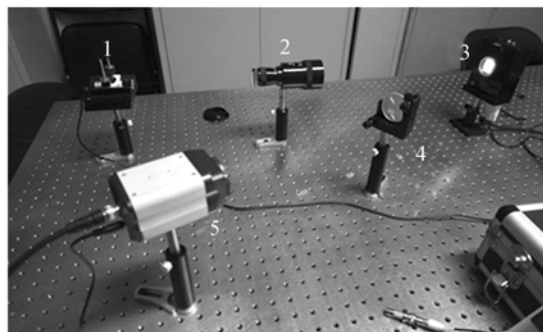


图 9 全息体视图再现系统

Fig. 9 Reproducing system of holographic stereogram

依据本文提出的方法,首先对全息面进行空间分割。在本文算法中,视角图像的分辨率等于

全息体视图平面上全息图单元的个数。因此,对于同样分辨率的空间光调制器,全息图单元的分辨率与视角图像的分辨率成反比关系。为了获得更高的视角分辨率,应该尽量减小全息图单元中的像素个数,但同时要保证全息图单元的频谱精度。本实验折衷选择每个全息图单元分辨率为 16×16 ,则空间光调制器面板被分为 120×67 个全息单元,即视角图像的分辨率为 120×67 。对再现的空间频谱进行 5×5 采样,迭代计算 25 个基元全息图,则再现光具有 25 个衍射方向。利用建模工具 3D Max 制作虚拟三维物体,如图 10(a)所示。利用计算机图像学的方法模拟摄像机运动,并从不同角度拍摄,三维物体垂直方向 5 个视角、水平方向 5 个视角进行交叉拍摄,获取 25 幅序列视差图像。为了增加人眼观察时的视觉差异,本文选择拍摄视差图像的水平角度为 $\pm 20^\circ$,垂直角度为 $\pm 15^\circ$ 。利用视差图像对全息单元的基元全息图进行调制,获得该三维物体的全息体视图(图 10(b))。在计算中,基元全息图的迭代运算可以提前完成,以提高计算速度。采用 CPU



(a) 虚拟三维物体
(a) Virtual 3D object



(b) 全息体视图
(b) Holographic stereogram

图 10 虚拟三维物体及其全息体视图

Fig. 10 Virtual 3D object and its holographic stereogram

为 Pentium 2.2GHz,内存为 2G 的计算机,利用本文算法由视差图像生成全息体视图的时间约为 1.02 s,与传统基于干涉的全息图计算方法相比,本文算法在计算量与速度方面具有较大的优势。

将计算的全息体视图加载到空间光调制器中,利用本文构建的光学系统进行再现。为了获得清晰的成像效果,成像透镜设置在距离空间光调制器 1 500 mm 处,CCD 位于成像透镜的焦面上。改变成像透镜与 CCD 相对于空间光调制器的角度,模拟人眼的运动视差,观察再现图像。由于空间光调制器的栅格结构,再现时会出现多级衍射像,本文选择一级衍射像作为观察对象。实验获取的 2 个垂直视角,5 个水平视角的再现图像如图 11 所示。由图 11 可见,该方法计算的全息体视图能够再现三维物体不同视角的图像。依据双目视差原理,可以产生较好的三维立体感。由于再现像的质量与再现光的波长、空间光调制器的尺寸和像素间距等因素相关,本实验所用的空间光调制器的分辨率有限,因此再现像的分辨率较低。

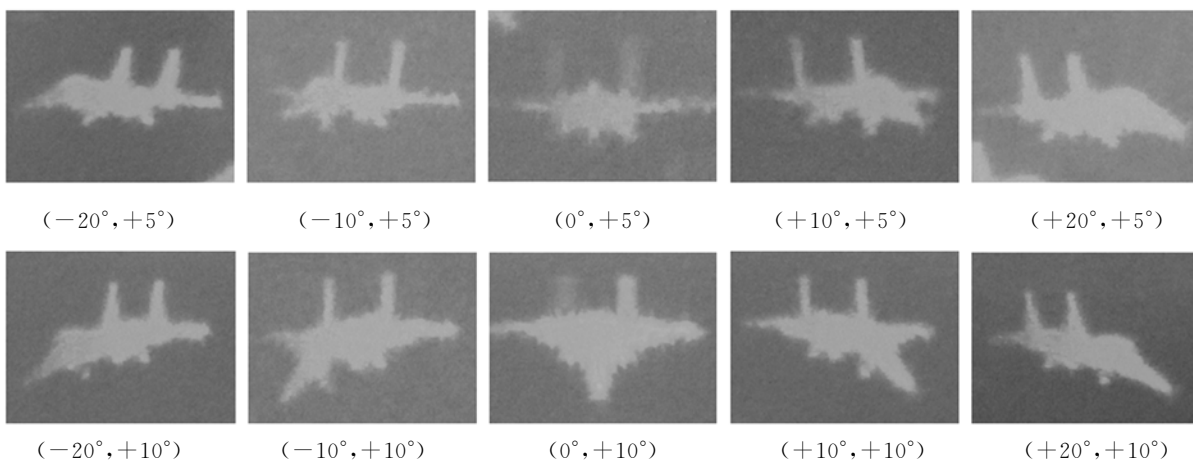


图 11 多视角再现图像

Fig. 11 Multi-view reproduction images

5 结 论

本文通过分析全息面与再现像面之间的光场分布关系,根据全息体视图的基本原理,对全息面和再现像面分别进行了空间分割和频谱采样。利用三维物体的多角度全视差图像对全息图单元中的基元全息图进行调制,快速生成三维物体的全视差全息体视图。最后,本文以液晶空间光调制器为基础进行了全息体视图再现实验。实验结果表明,本文方法计算的全息图能够再现三维物体

的不同视角。与传统全息图的计算方法相比,本文方法数据源获取简单,同时计算量显著降低,拥有较快的实现速度,为三维物体全视差全息体视图的实时计算提供了一种新的技术途径。但是,由于本文方法利用 $16 \text{ pixel} \times 16 \text{ pixel}$ 构建了一个全息单元,牺牲了空间光调制器的部分分辨率。同时,由于实验使用的液晶空间光调制器像素尺寸、空间分辨率的限制,全息再现像的质量和视场范围无法满足人眼观察的视觉要求,探索多个空间光调制器拼接,实现大幅面、大视角的全视差全息体视图实时再现是本文下一步努力的方向。

参考文献:

- [1] TAY S, BLANCHE P A, VOORAKARANAM R, *et al.*. An updatable holographic three-dimensional display [J]. *Nature*, 2008, 451: 694-698.
- [2] BLANCHE P A, BABLUMIAN A, VOORAKARAN-AMET R, *et al.*. Holographic three-dimensional telepresence using large-area photorefractive polymer [J]. *Nature*, 2010, 468: 80-83.
- [3] 马建设, 夏飞鹏, 苏萍, 等. 数字全息三维显示关键技术及系统综述[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(5): 1141-1152.
- [4] MA J SH, XIA F P, SU P, *et al.*. Survey on key techniques and systems of digital holographic 3D displays [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(5): 1141-1152. (in Chinese)
- [5] TOMOYOSHI S, NOBUYUKI M, TOMOYOSHI I. Simple and fast calculation algorithm for computer-generated hologram with wave front recording plane [J]. *Optics Letters*, 2009, 34(20): 3133-3135.
- [6] JOSHUA J, GAVIN L, ALAN P. Three-dimensional holographic lithography by an iterative algorithm [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(13): 2495-2497.
- [7] 韩起, 韦穗, 刘凯峰. 分数傅里叶分块算法全息图的编码与动态显示[J]. *光学学报*, 2009, 29(12): 3300-3303.
- [8] HAN CH, WEI S, LIU K F. Coding of tiling algorithm hologram of fractional Fourier and dynamic display [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(12): 3300-3303. (in Chinese)
- [9] ABOOKASIS D, ROSEN J. Computer-generated holograms of three-dimensional objects synthesized from their multiple angular viewpoints [J]. *Journal of Optics Society*, 2003, 20(8): 1537-1545.
- [10] ROSEN J, BARAK K, GARY B. Review of three-dimensional holographic imaging by fresnel incoherent correlation holograms [J]. *3D Research*, 2010, 1(1): 28-35.
- [11] UTSUGI T, YAMAGUCHI M. Reduction of the recorded speckle noise in holographic 3D printer [J]. *Optics Express*, 2013, 21(1): 662-674.
- [12] SU W C, CHEN C Y, WANG Y F. Stereogram implemented with a holographic image splitter [J]. *Optics Express*, 2011, 19(10): 9942-9949.
- [13] TAKAKI Y, IKEDA K. Simplified calculation method for computer-generated holographic stereograms from multi-view images [J]. *Optics Express*, 2013, 21(8): 9652-9663.
- [14] PLESNIAK W, BOVE V M, PAPPU R, *et al.*. Reconfigurable image projection holograms [J]. *Optical Engineering* 2006, 45(11): 115801.
- [15] NWODOH TA, BENTON SA. Holographic video computation and display using Holo-Chidi [J]. *Journal of Electronic Imaging*, 2003, 12(3): 551-557.
- [16] HAHN J, KIM H, LIM Y J, *et al.*. Wide viewing angle dynamic holographic stereogram with a curved array of spatial light modulators [J]. *Op-*

tics Express, 2008,16(16):12372-12386.

- [15] 陈海云,王辉,王媛媛,等. 用液晶空间光调制器实现动感合成全息[J]. 浙江师范大学学报, 2006,29(3):283-286.

CHEN H Y, WANG H, WANG Y Y, *et al.*. The implementation of sensor motor holography based on liquid crystal spatial light modulator [J].

Journal of Zhejiang Normal University, 2006, 29(3):283-286. (in Chinese)

- [16] 谢敬辉,李闻,莫晓丽,等. 合成全息的计算机设计及自动化记录[J]. 北京理工大学学报,2006,26

(6):525-527.

XIE J H, LI W, MO X L, *et al.*. Computer aided design and automatic recording of synthetic hologram [J]. *Transactions of Beijing Institute University*, 2006,26(6):525-527.

- [17] GOODMAN J W. *Introduction to Fourier Optics* [M]. New York: Mc-Graw-Hill, 1996.

- [18] GERCHBERG R W, SAXTON W O. A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures [J]. *Optik*, 1972, 35(2): 227-246.

作者简介:



裴 闯(1985—),男,辽宁葫芦岛人,博士研究生,2010年于装甲兵工程学院获得硕士学位,主要从事三维计算全息、图像融合与机器视觉方面的研究。E-mail: lnxiaopeiwinwin@163.com

导师简介:



蒋晓瑜(1967—),男,湖南安仁人,教授,博士生导师,1997年于北京理工大学获得工学博士学位,主要从事光电图像处理、图像融合、电子稳像及三维数字全息等方面的研究。E-mail: jiangxiaoyu2007@gmail.com

(版权所有 未经许可 不得转载)