

# 基于多层半透明薄膜的三维显示技术研究

孙天成<sup>1</sup>, 顾华荣<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>清华大学交叉信息研究院, 北京 100084;

<sup>2</sup>清华大学精密仪器系精密测试技术及仪器国家重点实验室, 北京 100084

**摘要** 近年来三维显示技术得到了学术界与工业界的广泛关注,其目标是使观察者在不用佩戴任何辅助设备的情况下,使用裸眼观察到与实际物体近乎一致的三维图像。基于多层半透明薄膜结构实现了在平面上的三维显示。与传统的三维显示技术相比,这种显示技术的分辨率与对比度更高,结构也更加简单,易于制造。基于这种多层平面三维显示原型,进一步利用镜面反射原理,将其扩展成空间三维显示,使观察者可以在半空中多角度观察到虚拟的三维物体。

**关键词** 测量; 三维显示; 光场; 多层; 四棱锥

中图分类号 O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0312001

## Study on Three-Dimensional Display Technology Based on Multi-Layer Semitransparent Thin Film

Sun Tiancheng<sup>1</sup>, Gu Huarong<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institute for Interdisciplinary Information Sciences, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

<sup>2</sup>State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Department of Precision Instrument, Tsinghua University, Beijing 100084, China

**Abstract** Three-dimensional display technology, which aims at presenting almost-realistic three-dimensional images to the observer without any auxiliary devices, has drawn great attention from both academia and industry in recent years. In this paper, we implement a flat three-dimensional display using multi-layer semitransparent thin film structure. Compared to traditional three-dimensional display technologies, the proposed display technology has higher resolution, higher contrast, and simpler structure, thus easier to fabricate. Based on our prototype of flat three-dimensional display with multi-layer, we further extend it to spatial three-dimensional display using the principle of specular reflection, which allows observers to see virtual three-dimensional objects from different directions in the air.

**Key words** measurement; three-dimensional display; light field; multi-layer; square pyramid

**OCIS codes** 120.2040; 100.6890; 100.3010

## 1 引 言

传统电子屏幕的出现大大简化了人们获取信息的方式,然而由于其无法展示三维信息,因此裸眼三维显示技术逐渐成为研究的热点<sup>[1-2]</sup>。与已经部分产业化的三维电影或者虚拟现实设备不同的是,裸眼三维显示要求观察者不用佩戴额外的辅助设备即可观察到三维图像。根据原理的不同,裸眼三维显示技术大致分为三类:全息式<sup>[3-4]</sup>、体积式<sup>[5-7]</sup>、视差

式<sup>[8-11]</sup>。全息式显示技术是通过记录物体的全部光学信息(光的强度与相位)将物体进行重现的技术,受限于器件水平,目前仅能够做到静态或低分辨率三维物体的重现。体积式显示技术是通过将较高强度的光投射到空气中的半透明物质或反射镜上,再进行散射或反射,从而在空中重现三维物体的技术;该技术对环境的要求较高,设备也比较复杂。视差式显示技术的基本原理是将传统的电子屏幕上各向同性的像素点改造成各向异性的像素点,使得不同

收稿日期: 2017-07-19; 收到修改稿日期: 2017-10-25

基金项目: 国家 973 计划(2013CB329202)、国家自然科学基金(61205013)

作者简介: 孙天成(1995—),男,本科生,主要从事三维显示技术方面的研究。E-mail: kevin.king0627@gmail.com

\* 通信联系人。E-mail: ghr@mail.tsinghua.edu.cn

方向观察到的亮度不同,从而使双眼观察到的图像产生视差。由于视差式的三维显示对设备要求相对较低,因此受到了研究者的广泛关注。本文所展示的多层三维显示技术也属于视差式三维显示。

视差式的裸眼三维显示技术早已进入了消费者的视野之中,其主要用到两种技术:视差光栅<sup>[9,12]</sup>与集成成像<sup>[13]</sup>。这两项技术的基本原理均是使用遮挡或者折射的方式,将多个各向同性的普通像素改造为一个各向异性的像素。在得到长足发展的同时,研究者也逐渐意识到它们的缺陷:光能利用率与图像分辨率相比于二维屏幕来说较低,景深也很难满足三维显示的实际需求。研究者们针对这些缺陷提出多种改进方案<sup>[14-20]</sup>,如:使用正交偏振片阵列调制液晶显示器(LCD)屏幕,从而消除微透镜之间的相互干扰,实现双视角三维显示<sup>[19]</sup>;Yu等<sup>[20]</sup>提出了一种采用与微透镜不同周期的编码图案的三维显示模型,虽然所展示出的虚拟三维物体与真实场景的视差有所不同,但其实现了 $60^\circ$ 视场角(FOV)内平滑的运动视差。

近年来,研究者提出了一种新的视差式三维显示模型——光场显示<sup>[21-22]</sup>。基于光场与视差光栅的概念,Lanman等<sup>[23]</sup>尝试将用于遮挡的第一层明暗光栅替换成LCD屏幕,使用双层LCD屏幕实现视差;Wetzstein等<sup>[24-25]</sup>基于上述工作,使用多层透明介质和LCD屏幕,通过优化算法实现了可多角度观察、实时更新的三维动态图像。相比于传统的视差光栅与集成成像,多层平面三维显示能够更有效地保证系统的光能利用率与图像分辨率,同时扩展屏幕的景深。它的主要缺陷在于视场角较小,只有从几乎垂直于显示屏的角度观看,才能从中观测到正确的三维图像。

本文基于多层半透明薄膜结构实现了在平面上的三维显示,并进一步利用镜面反射原理,将其扩展成空间三维显示。相比于多层平面三维显示,这种多层空间三维显示在保证光能利用率较高并且不降低图像分辨率的前提下,硬件结构相对简单,大大增加了三维显示可观察的视场角,使观察者可以在半空中从四周 $360^\circ$ 的范围内,观察到具有真实感、符合现实场景视差的虚拟三维物体。

## 2 原 理

### 2.1 四维光场

基于多层半透明薄膜的三维显示的基本原理是重建物体的四维光场<sup>[26]</sup>。为了便于理解,先简单地

介绍光场的概念。如图1所示,在传统的屏幕中,像素从各个方向上观测的亮度值是相同的,因此一般只使用一个二维的数组来表达所显示的图片。为了产生视差,需要打破原有假设,允许像素是各向异性的,即从不同方向观测的亮度值是不同的。将光场定义如下:在原有的 $X$ 、 $Y$ 两个空间坐标的基础上,新加入 $U$ 、 $V$ 两个坐标用来表示同一像素从不同方向观测时的亮度值,其中, $UV$ 平面与 $XY$ 平面保持平行,如图2所示。如此,光场便是一个四维张量。

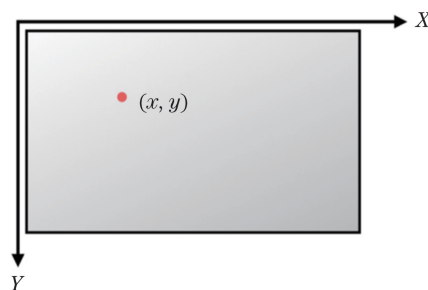


图1 传统屏幕

Fig. 1 Traditional screen

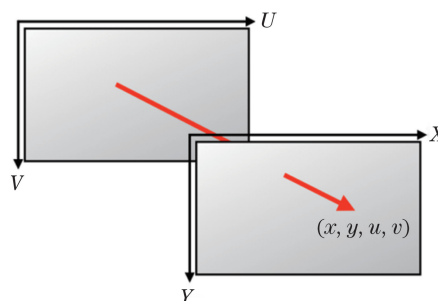


图2 光场

Fig. 2 Light field

为了更加直观地理解光场,在图3中展示一个渲染出的光场。为了方便起见,将 $UV$ 平面置于无穷远处。这样,由同一个 $UV$ 坐标向 $XY$ 平面发出的光线相互平行, $XY$ 平面所观测到的图片成为场景的正投影图(区别于透视图)。光场的四维张量中,每一个 $XY$ 平面的切片对应着某一特定方向的场景的正投影图。相当于在 $UV$ 平面上的每一个角度都朝向物体拍摄一张照片;由于这些照片是从不同角度拍摄的,因此相互之间存在视差,从而包含了物体的三维信息。将这些正投影图按照 $UV$ 平面上网格的顺序拼接起来,就可以表示光场的全部信息。在下文中均使用 $UV$ 平面位于无穷远处这一设定。

### 2.2 多层平面三维显示

多层平面三维显示利用多层结构在一个平面上还原出上述光场,生成视差,进而使观察者产生三维感。用于光场显示的多层结构如图4所示,由均匀

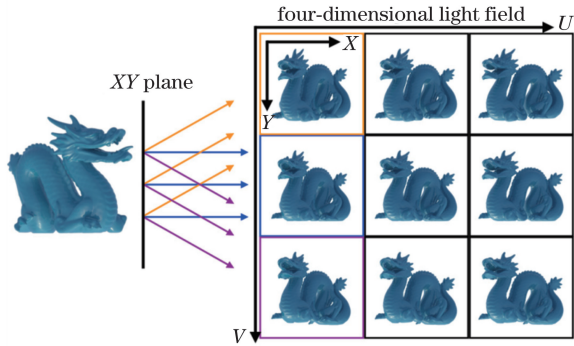


图 3 光场示例

Fig. 3 Example of light field

发光的背光源与多层半透明薄膜组成。薄膜的厚度可以忽略不计,且相互之间由透明隔板隔开。当从某一方向上观察某一像素时,视线将会穿过各层半透明薄膜上的像素到达背光源。对于同一像素,从不同方向上观察时经历的路径不同,穿过的半透明薄膜的位置不同,因此亮度不同,产生了视差。

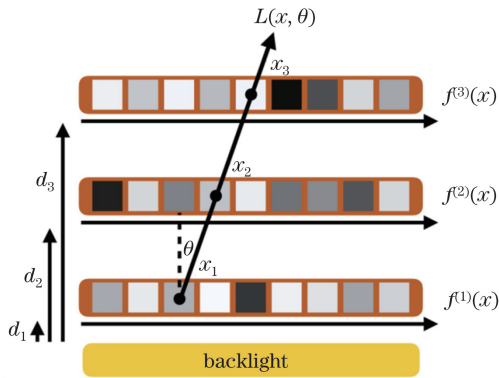


图 4 用于光场显示的多层结构

Fig. 4 Multi-layer structure for light field display

为了方便起见,假设薄膜的维度是一维的,二维薄膜可以依此推广得到。假设结构由  $N$  层半透明薄膜构成,每层薄膜与背光源距离为  $d_i$ ,  $i$  表示薄膜层数,像素值(透过率)为  $f^{(i)}(x)$ ,那么此结构所产生的光场可以表示为:

$$\bar{l}(x, \theta) = \prod_{i=1}^N f^{(i)}(x + d_i \tan \theta), \quad (1)$$

式中  $x$  为位置坐标,  $\theta$  为角度坐标。

光线通过半透明薄膜时,亮度将乘以通过点的像素值,因此(1)式中计算的是像素值的乘积。未知数相乘造成的非线性会对求解带来不便,因此将等式两边同时取对数,需要求解的问题可以表示为:

$$\begin{cases} \min_{f^{(i)}} \left\| \log[l(x, \theta)] - \sum_{i=1}^N \log[f^{(i)}(x + d_i \tan \theta)] \right\|_2^2, \\ \text{s.t. } 0 \leq f^{(i)} \leq 1 \end{cases} \quad (2)$$

式中  $l(x, \theta)$  代表显示的目标光场。经过这样的变换,此结构将会变成一个线性系统,可以使用凸优化的技巧比较方便地解决这个问题。

### 2.3 多层空间三维显示

多层平面三维显示可以重建目标光场,然而由于采用平面结构,可观察视角受到一定的限制。本节将介绍使用多层结构在空间中还原光场的多层空间三维显示。

目前市场上流行着一种“全息显示”技术,如图 5 所示,该结构将半透半反膜制作成四棱锥的形状,放在传统的屏幕上,将屏幕上所显示的图片反射到四棱锥中央,使其看起来如同光从半空中发出。这样的结构并没有做到真正的三维显示,四棱锥所反射的图像来自一个二维屏幕,因此观察者在半空中也只会看到一个二维平面,而非三维结构。因此,这种结构也被称作“伪全息显示”。

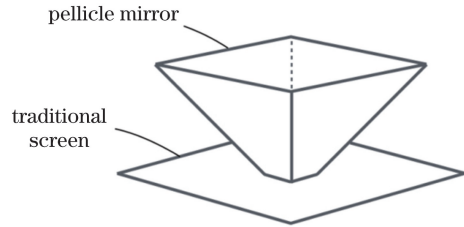


图 5 “伪全息显示”结构

Fig. 5 Structure of “pseudo holographic display”

“伪全息显示”虽然不是真正的三维显示,但是可以借鉴这种扩展观察角度的方法。若将四棱锥下的传统屏幕替换成 2.2 节所讨论的多层平面三维显示结构,如图 6 所示,那么观察者在半空中所看到的将是一个完整的虚拟三维物体。

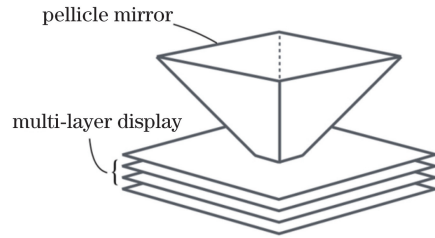


图 6 多层空间三维显示结构

Fig. 6 Structure of spatial multi-layer three-dimensional display

## 3 实验结果

### 3.1 硬件设置

在所搭建的多层三维显示系统中,选用透明的打印纸作为多层结构中的半透明薄膜,并使用高性能喷墨打印机在透明打印纸上打印出图案。选用了具有 6 种原色的爱普生 L810 型打印机,并使用厚



度均匀的透明亚克力板对透明打印纸进行分隔。透明亚克力板的层数与厚度直接影响了系统所能展现的物体深度与三维效果。厚度越大,显示内容的景深越大,产生的三维感越强烈;然而若厚度过大,边缘光线对显示内容造成的干扰会增大。为了使多层三维显示结构的厚度适中,并最大化三维效果,选用了5层半透明薄膜结构,每层间隔为2 mm。为了防止墨水被挤压后散开,通常将打印完毕的透明纸静置10 min之后再进行下一步操作。同时,为了将各层半透明薄膜安放在准确的位置,在图案的4个角打印黑色“十”字以便对齐,并在半透明薄膜和透明亚克力板按顺序放置完毕后,用玻璃夹固定整个结构。

### 3.2 软件设置

为了构建出光场,本研究使用了Mitsuba渲染器。对于一个场景,从不同的角度渲染出对应的正投影图片,形成光场。为了保证最终的三维效果,渲染的角度通常在一个 $7 \times 7$ 网格上按照角度的正切函数均匀选取,网格的角度范围即视场角为 $10^\circ$ 。

利用Matlab编写了优化算法,其核心是使用lsqlin

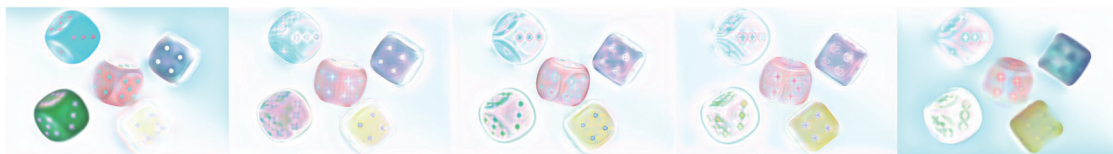


图7 用于三维显示的三维模型

Fig. 7 Three-dimensional model used in three-dimensional display

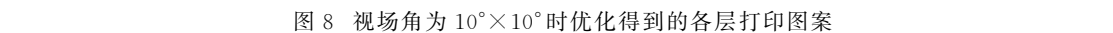


图8 视场角为 $10^\circ \times 10^\circ$ 时优化得到的各层打印图案

Fig. 8 Printing patterns from optimization with the FOV of  $10^\circ \times 10^\circ$

### 3.3 多层平面三维显示结果

本文搭建了一套多层平面三维显示系统原型,所使用的透明打印纸与透明亚克力板均为A4大小。在A4大小的平面上,设计了9张三维图像进行展示,每张图片的分辨率为 $1200 \text{ pixel} \times 800 \text{ pixel}$ 。将透明亚克力板与半透明薄膜按顺序交错相叠,并用玻璃夹进行固定,背光源采用白色的电脑屏幕。图9为多层平面三维显示系统的不同视角图,其中第一行的三张图片分别为使用 $10^\circ$ 、 $20^\circ$ 、 $30^\circ$ 视场角优化后的效果图,第二行的三张图片为示例图片,第三行的三张图片分别为使用1层、3层、5层结构进行优化的效果图。

在第一行的三张图片中可以观察到明显的视差:如第一张三维图,左方视角可以观察到黄色骰子的多个表面,而右方视角则只能看到它的一个表面;右方视角可以观察到深蓝色骰子的多个面,而左方视角则只能看到一个面。另外注意到,虽然第一行的三张图片均表现出视差,但随着优化视场角范围

函数来解决算法中的约束最小二乘问题。由于图片有RGB三个通道,因此按通道分别进行优化。对于 $700 \times 700$ 的优化问题,通常需要10 GB内存空间,每个通道的优化用时大约为10 min。

在 $10^\circ \times 10^\circ$ 的网格中按照正切函数值均匀选取 $7 \times 7$ 个角度,对如图7所示的三维模型优化后得到的各层打印图案如图8所示。可以看到,优化所得图案基本上是将各个物体投影至最近的半透明薄膜上。除了投影之外,为了保证三维效果,在距离物体较远的各层上,也存在一些图案。这些图案大多出现在物体的边缘处,或者颜色变化剧烈的地方,也就是视差体现比较明显的位置。

的扩大,图像变得越来越不清晰,但并没有观察到三张图片的可观察范围有任何差异,因此选择 $10^\circ$ 作为优化视场角范围。

第二行的图片由于墨水散开的原因,质量有所下降,但是仍然能够观察到一定程度的视差。如第二行第二列的三棵树场景,不同视角观察到的树干与树叶的相对位置有所不同,上方视角与下方视角所观察到的影子的亮度也有所不同。

第三行的三张图片展示出结构层数对三维效果的影响。仅从中央视角看,虽然第三列的图片由于墨水散开而部分模糊,但是其所展示出的三维感如阴影、遮挡等效果最为明显。通过对比不同视角的图片,可以比较各个图片的三维感:第一列的龙,由于仅有一层,因此在不同视角看到的图片是相同的;第二列的龙使用了三层半透明薄膜,能够观察到一定的视差,但不是很明显;第三列的龙视差最为明显,如龙头与龙身之间的纵向间隙,在左方、中央、上方视角,由于遮挡而无法观察到,但在右方与下方视



图 9 多层平面三维显示系统各个视角图。(a)左方视角；(b)右方视角；(c)中央视角；(d)上方视角；(e)下方视角

Fig. 9 Flat multi-layer three-dimensional display system from different views. (a) Left view; (b) right view; (c) central view; (d) upper view; (e) lower view

角却能够清晰地观察到。

### 3.4 多层空间三维显示结果

所搭建的多层空间三维显示系统的结构如图 10 所示,有关多层三维显示的部分与平面三维显示系统大致相似,优化算法中的视场角同样为  $10^\circ$ ,仅图片大小略有差异。在空间三维显示系统中,使用平板电脑的白色屏幕作为背光源,因此对透明亚克力板有所裁剪,其使用尺寸为  $20\text{ cm} \times 20\text{ cm}$ 。与“伪全息显示”类似,在下方多层结构中展示物体的前后左右 4 个方向的三维图片,图片的分辨率为  $700\text{ pixel} \times 700\text{ pixel}$ 。4 张三维图片经过上方高度约为  $10\text{ cm}$  的半透半反四棱锥反射后,成像于四棱锥中央,使得观察者感觉物体浮在空中。

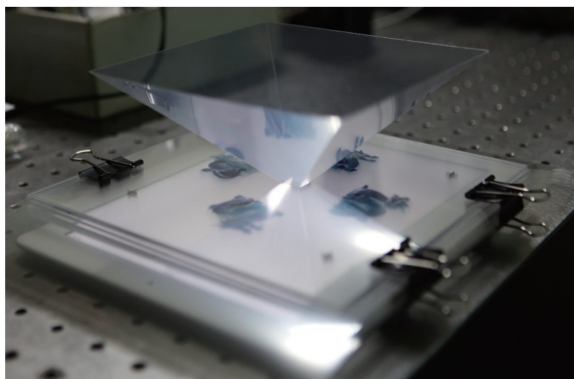


图 10 多层空间三维显示系统结构图

Fig. 10 Structure of spatial multi-layer three-dimensional display system

多层空间三维显示系统的实拍效果如图 11 所示,左列的“十”字图为普通“伪全息显示”系统的各个视角图,右列的“十”字图为多层空间三维显示系统的各个视角图。每一个“十”字图的中心图片为中心视角,其他 4 张图片按照位置为上下左右 4 个视角。

可以看到,左列“伪全息显示”的图像不论从哪一个视角观察都是相同的,即没有视差。因此,观察者虽然能在空中看到虚拟的物体,但是所观察的物体是扁平的,缺乏三维感。而多层空间三维显示系统可以产生视差。从右列各个“十”字图中横向并排的两张图均可以观察到,龙头与龙身之间的距离随着视角的不同产生了变化,两个纵向缝隙在前方视角与后方视角最为明显。在右列“十”字图的纵向并列的两张图中,也可以观察到一定的视差,龙的前爪与后爪的相对位置随着视角的变化产生了移动。另外值得注意的是,不仅仅是物体的相对位置,其表面光泽也随着视角的不同发生了变化,通过对比后方视角的上下两张图片,可以发现下方图片中龙身的表面光泽明显比上方图片亮。这种特性是普通的二维显示无法做到的。

与多层平面三维显示相比,由于将屏幕一分为四,多层空间三维显示的分辨率减少为多层平面三维显示的四分之一。然而,多层空间三维显示的视场角却大大增加,理论上是多层平面三维显示的 4 倍,实际上在四周  $360^\circ$  的范围内均可以观察到具

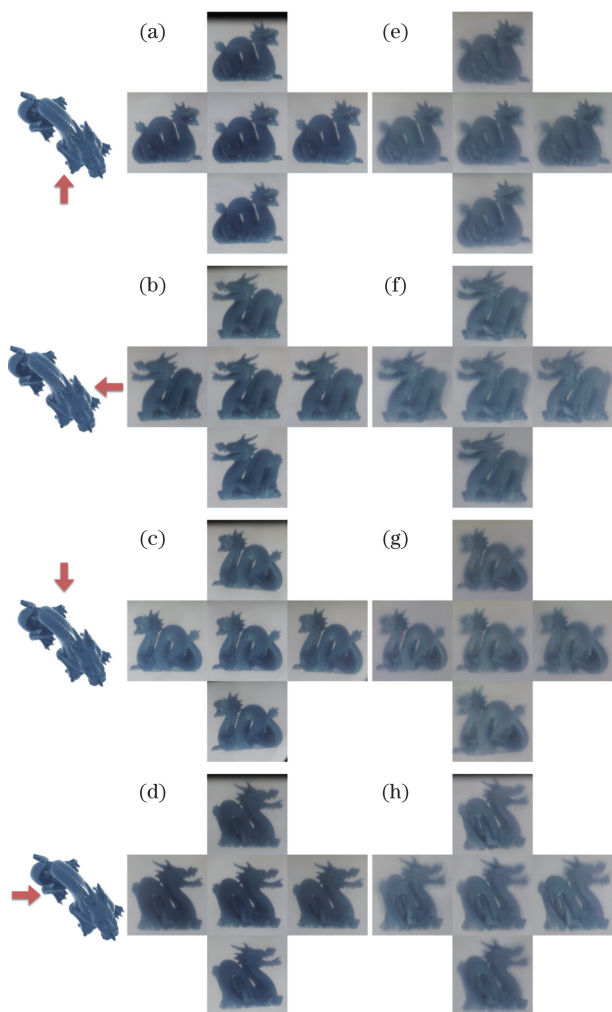


图 11 “伪全息显示”系统的(a)前方视角图、(b)右方视角图、(c)后方视角图和(d)左方视角图；多层空间三维显示系统的(e)前方视角图、(f)右方视角图、(g)后方视角图和(h)左方视角图  
Fig. 11 (a) Front view image, (b) right view image, (c) back view image and (d) left view image of “pseudo holographic display” system; (e) front view image, (f) right view image, (g) back view image and (h) left view image of spatial multi-layer three-dimensional display system

有一定三维特征的图案。或者说,多层空间三维显示将平面分辨率均匀分配到4个空间平面上。在亮度与景深方面,由于采用镜面反射,多层空间三维显示与多层平面三维显示的参数相同。

由于使用了四棱锥,在4个表面之间移动视角时会发生图像的跳变,如图12所示。这在当前方案中是无法避免的,由于优化视场角范围仅为 $10^\circ$ ,无法完全覆盖四棱锥每个面 $90^\circ$ 的范围。若使用面数更少的锥形,那么每个面所覆盖的角度变大,图像跳变会更加严重;若使用面数更多的锥形,那么各个面

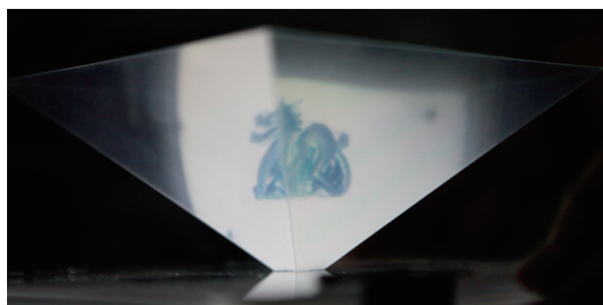


图 12 多层空间三维显示系统两个表面之间的图像跳变  
Fig. 12 Image jumping between two faces in spatial multi-layer three-dimensional display system

的图像在观察时会产生相互干扰;若直接使用圆锥形,虽然消除了图像跳变,但是图像产生了非线性变换,优化算法不再适用。因此,虽然存在图像跳变,使用四棱锥是目前最佳的解决方案。

## 4 结 论

本文实现了基于多层半透明薄膜的平面三维显示与空间三维显示。使用半透半反四棱锥将观察视角十分有限的平面三维显示系统扩展成了能够多方向观察的空间三维显示系统。相比于目前市场上流行的“伪全息显示”系统,该多层空间三维显示系统能够让观察者产生一定程度的三维感,而制造成本没有显著增加。

然而,所呈现的三维显示系统仍存在一些弊端。首先,目前采用手工组装多层结构,难免产生对齐误差;对于大批量制造来说,需找出合适的自动组装方案。其次,目前系统仅能够呈现静态图像,未来可以尝试使用多层液晶显示屏来呈现动态图像。最后,图像优化算法的时间与空间复杂度相对较高,需进一步优化以实现实时处理。

## 参 考 文 献

- [1] Geng J. Three-dimensional display technologies[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2013, 5(4): 456-535.
- [2] Sang X Z, Yu X B, Chen D, *et al.* Research progress on three-dimensional optical display technology[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(5): 050006.  
桑新柱, 于迅博, 陈铎, 等. 三维光显示技术研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(5): 050006.
- [3] Xue G, Liu J, Li X, *et al.* Multiplexing encoding method for full-color dynamic 3D holographic display[J]. *Optics Express*, 2014, 22(15): 18473-18482.
- [4] Zhang H, Zhao Y, Cao L, *et al.* Fully computed



- holographic stereogram based algorithm for computer-generated holograms with accurate depth cues[J]. *Optics Express*, 2015, 23(4): 3901-3913.
- [5] Favalora G E. Volumetric 3D displays and application infrastructure[J]. *Computer*, 2005, 38(8): 37-44.
- [6] Cossairt O S, Napoli J, Hill S L, *et al.* Occlusion-capable multiview volumetric three-dimensional display[J]. *Applied Optics*, 2007, 46(8): 1244-1250.
- [7] Fang Y, Lu Y L, Wu H X, *et al.* Study on gray scale correction in solid-state three dimensional volumetric display[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(11): 1133001. 方勇, 芦云龙, 吴华夏, 等. 固态体积式真三维显示中的灰度级修正研究[J]. *光学学报*, 2016, 36(11): 1133001.
- [8] Dodgson N A. Autostereoscopic 3D displays[J]. *Computer*, 2005, 38(8): 31-36.
- [9] Tao Y H, Wang Q H, Gu J, *et al.* Autostereoscopic three-dimensional projector based on two parallax barriers[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(20): 3220-3222.
- [10] 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.
- [11] Zhou X X, Su C, Li H F, *et al.* Research on monocular focusing characteristic for horizontal light field three-dimensional display[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(9): 0912001. 周欣鑫, 苏忱, 李海峰, 等. 水平光场三维显示单目聚焦特性研究[J]. *光学学报*, 2017, 37(9): 0912001.
- [12] Luo J Y, Wang Q H, Zhao W X, *et al.* Autostereoscopic three-dimensional display based on two parallax barriers[J]. *Applied Optics*, 2011, 50(18): 2911-2915.
- [13] Xiao X, Javidi B, Martinez-Corral M, *et al.* Advances in three-dimensional integral imaging: sensing, display, and applications [Invited][J]. *Applied Optics*, 2013, 52(4): 546-560.
- [14] Chen C Y, Chang M C, Ke M D, *et al.* A novel high brightness parallax barrier stereoscopy technology using a reflective crown grating[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2008, 50(6): 1610-1616.
- [15] Wang Q, Tao Y, Zhao W, *et al.* A full resolution autostereoscopic 3D display based on polarizer parallax barrier[J]. *Chinese Optics Letters*, 2010, 8(1): 22-23.
- [16] Qi L, Wang Q H, Luo J Y, *et al.* An autostereoscopic 3D projection display based on a lenticular sheet and a parallax barrier[J]. *Journal of Display Technology*, 2012, 8(7): 397-400.
- [17] Kim S K, Yoon K H, Yoon S K, *et al.* Parallax barrier engineering for image quality improvement in an autostereoscopic 3D display[J]. *Optics Express*, 2015, 23(10): 13230-13244.
- [18] Shen X, Wang Y J, Chen H S, *et al.* Extended depth-of-focus 3D micro integral imaging display using a bifocal liquid crystal lens[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(4): 538-541.
- [19] Wang Q H, Ji C C, Li L, *et al.* Dual-view integral imaging 3D display by using orthogonal polarizer array and polarization switcher[J]. *Optics Express*, 2016, 24(1): 9-16.
- [20] Yu X, Sang X, Gao X, *et al.* Large viewing angle three-dimensional display with smooth motion parallax and accurate depth cues[J]. *Optics Express*, 2015, 23(20): 25950-25958.
- [21] Levoy M, Hanrahan P. Light field rendering[C]. *Proceedings of the 23rd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, 1996: 31-42.
- [22] Jones A, McDowall I, Yamada H, *et al.* Rendering for an interactive 360° light field display[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2007, 26(3): 40.
- [23] Lanman D, Hirsch M, Kim Y, *et al.* Content-adaptive parallax barriers: optimizing dual-layer 3D displays using low-rank light field factorization[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2010, 29(6): 163.
- [24] Wetzstein G, Lanman D, Heidrich W, *et al.* Layered 3D: tomographic image synthesis for attenuation-based light field and high dynamic range displays[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2011, 30(4): 95.
- [25] Wetzstein G, Lanman D, Hirsch M, *et al.* Tensor displays: compressive light field synthesis using multilayer displays with directional backlighting[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2012, 31(4): 80.
- [26] Levoy M. Light fields and computational imaging[J]. *Computer*, 2006, 39(8): 46-55.