

具有平滑运动视差的三维显示技术

桑新柱 于迅博 赵天奇 邢树军 高鑫 王鹏 孙蕾 余重秀 徐大雄

(北京邮电大学信息光子学与光通信国家重点实验室, 北京 100876)

摘要 为了实现自然的三维显示,需要按照真实物体呈现方式同时具有双目视差和平滑的运动视差。增加视点数量并提供平滑运动视差通常需要大量的空间信息,依靠大量的数据信息最终可以实现模拟真实场景效果的目的。全息立体图可用于显示三维离散图像或一组三维的空间数据,具有良好的观测效果。给出了三种实现平滑运动视差的三维显示方法,显示效果等同于全息立体图。基于液晶显示屏生成的数字蒙版与高精度柱镜阵列,实验实现了 56° 角内 1200 个视点连续的三维显示。在 $50.7\text{ cm}\times 28.5\text{ cm}$ 的显示屏幕上实现超过 40 cm 的景深。利用尺寸为 $1.3\text{ m}\times 1.8\text{ m}$ 的全息功能屏幕、视频服务器、相机-投影机阵列,可以实现高连续性三维场景再现,深度超过 1 m。利用分辨率为 $3840\text{ pixel}\times 2160\text{ pixel}$ 的 50 inch(1 inch=2.54 cm)液晶显示面板生成的数字断层图像实现了具有连贯运动视差的三维显示。

关键词 全息; 三维显示; 运动视差; 全息功能屏; 蒙版; 断层图像; 超多视点

中图分类号 TN27 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0209011

Three-Dimensional Display with Smooth Motion Parallax

Sang Xinzhu Yu Xunbo Zhao Tianqi Xing Shujun Gao Xin Wang Peng
Sun Lei Yu Chongxiu Xu Daxiong

(State Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communications, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract To simulate the natural three-dimensional (3D) display, both binocular parallax and smooth motion parallax are required. Normally, it requires a huge amount of spatial information to increase the number of views and to provide smooth motion parallax for natural 3D display similar to real life. Holographic stereogram can be used to display a description of 3D discrete images or a set of 3D data points. Here, three methods are used to realize natural 3D displays with smooth motion parallax, which are functionally equivalent to the holographic stereogram. With digitally generated active partially pixelated masks in the liquid crystal panel combining with a precision lenticular lens array, the 3D display with 1200 views from a computer numerical model is demonstrated in 56° viewing angle. The displayed depth is more than 40 cm and the screen size is $50.7\text{ cm}\times 28.5\text{ cm}$. With a holographic functional screen with a size of $1.3\text{ m}\times 1.8\text{ m}$, a demonstrated system including optimally designed camera-projector arrays and a video server can display the fully continuous 3D scene with more than 1 m image depth. Based on the digitally generated tomographic images, a 3D display with smooth motion parallax is demonstrated in a 50 inch (1 inch=2.54 cm) LCD panel with the resolution of $3840\text{ pixel}\times 2160\text{ pixel}$.

Key words holography; three-dimensional display; motion parallax; holographic functional screen; mask; tomographic image; super view

OCIS codes 100.6890; 110.6955; 120.2040

收稿日期: 2013-11-04; 收到修改稿日期: 2013-12-16

基金项目: 国家自然科学基金(61177018)、北京市科技计划重点项目(D121100004812001)、教育部新世纪优秀人才项目(NECT-11-0596)、北京市科技新星项目(2011066)

作者简介: 桑新柱(1977—),男,教授,博士生导师,主要从事三维显示、光信息处理和新型光电子器件等方面的研究。

E-mail: xzsang@gmail.com

1 引 言

近年来,三维(3D)显示技术吸引了人们的广泛关注,它可以提供给观看者接近真实自然环境的显示效果。随着科技的发展,各种三维立体显示出现并得到应用^[1-2],如柱镜光栅或视差挡板立体显示^[3-4]、全息显示^[5-6]、体三维显示^[7-8]以及光场三维成像显示^[9]等。但现有的自由立体显示技术大部分都存在其缺点或局限性。光栅立体显示会在空间中形成循环视区,在视区交界处出现立体匹配错误并跳跃。传统全息显示难以实现大尺寸、真彩色、高分辨率的动态三维显示。体三维显示具有机械旋转机构,难以满足大场景的需求。

为了实现大尺寸、真彩色、动态且具有平滑运动视差的三维显示,本文进行了探索研究。利用大尺寸全息功能屏以及 64 个微型投影机组成的投影机阵列,实验实现了 1.3 m×1.8 m 的三维显示,深度超过 1 m^[10-11]。基于液晶显示屏生成的数字蒙版与高精度柱镜阵列,实验实现了 56°角内 1200 个视点连续的三维显示。使用软件调整代替了复杂的光学结构变化,在 50.7 cm×28.5 cm 的显示屏幕上实现超过 40 cm 的深度显示^[12]。采用分辨率为 3840 pixel×2160 pixel 的液晶显示器和高精度透镜阵列,利用周期性结构,实现数字断层的三维显示,具有连贯的运动视差。

2 平滑视差的三维显示

全息立体图可用于以三维方式显示一组序列

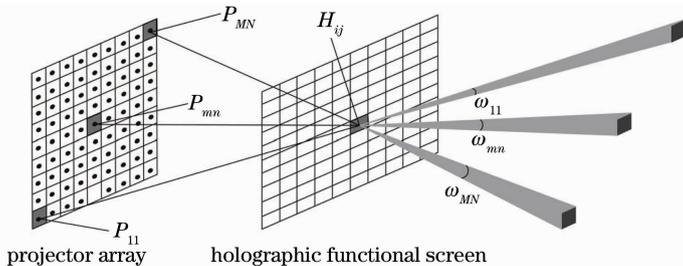


图 2 全息功能屏控制光束输出示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the holographic functional screen to manipulate light beams

全息功能屏是散斑全息光学元件,通过控制制作散斑全息图的光束可以自由地调整出射光线方向,使其空间角度为 ω_{mm} 。可以方便地制作大尺寸全息功能屏。

基于全息功能屏的三维显示系统结构示意图如图 3 所示,包括三维场景采集单元、视频服务器、三维显示单元。实验中为了减少摄像机与投影机的数

量,摄像机与投影机仅在水平方向上排列。三维场景采集设备由 64 路摄像机组成,三维场景再现设备由 64 路投影机以及全息功能显示屏组成。显示效果如图 4 所示,全息功能屏获得的立体效果在水平方向上具有 64 幅视差图,由 64 个不同方向的视点图像实现连续的运动视差。

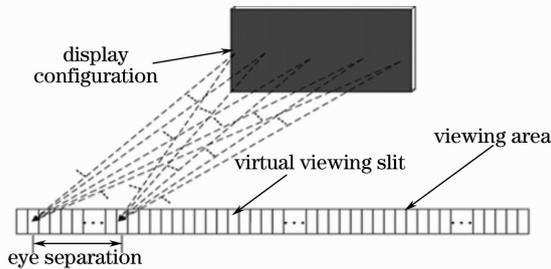


图 1 具有平滑运动视差的三维显示示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the 3D display with smooth motion parallax

3 基于全息功能屏的三维显示

全息功能屏的实现原理如图 2 所示^[10-11], P_{MN} 为投影机阵列, H_{ij} 为投影屏上一点, ω_{mm} 为出射光线空间角度。为了准确还原空间三维信息,需要经过全息功能屏使投影机投射过来的光按照正确的空间角度 ω_{mm} 出射。由 H_{ij} 出射的光束集合 Ω_{ij} 可以表示为^[7]

$$\Omega_{ij} = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \omega_{nm} \quad (1)$$

量,摄像机与投影机仅在水平方向上排列。三维场景采集设备由 64 路摄像机组成,三维场景再现设备由 64 路投影机以及全息功能显示屏组成。显示效果如图 4 所示,全息功能屏获得的立体效果在水平方向上具有 64 幅视差图,由 64 个不同方向的视点图像实现连续的运动视差。

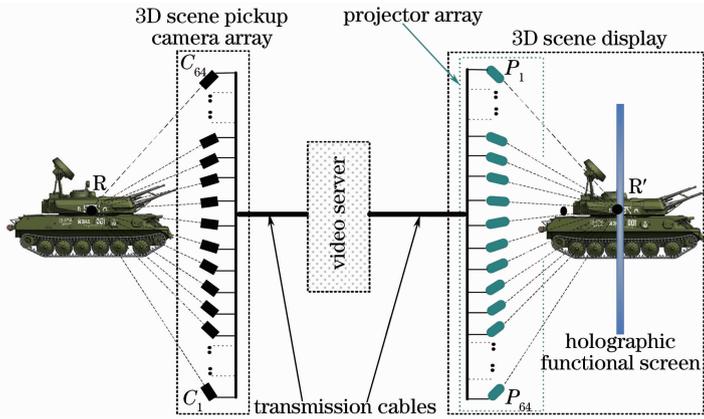


图 3 三维场景采集与显示结构图

Fig. 3 Schematic configuration for 3D scene pickup and display



图 4 基于全息功能屏的三维显示照片

Fig. 4 Pictures of the displayed 3D images

4 基于部分子像素蒙版变化三维显示

利用柱透镜光栅实现的自由立体显示有观看区域的限制,视区之间存在伪立体并有跳跃现象。提出采用动态蒙版根据人的位置信息为观看者提供不同方向的立体图像对从而获得连续的运动视差。改变像素排布是通过调整蒙版的顺序实现的,蒙版是记录像素位置信息的一张位图,用于和视差图做运算。每一路蒙版按照覆盖每个子像素面积比进行设

计^[12]。在实现过程中利用 $2N$ 路蒙版与柱镜阵列配合将空间中的每一个周期性的视区划分为 $2N$ 份,如图 5 所示,其中 N 份用于显示左视差图导入左眼,另外 N 份用于显示右视差图导入右眼,当观看者在水平方向上移动时,根据人眼的位置实时调整蒙版与左右视差图的组合,保持人的左右眼分别位于左右视区中心。 N 取的数值越大,虚拟狭缝越窄,表示空间视区划分的密度越高,导入人眼的光强

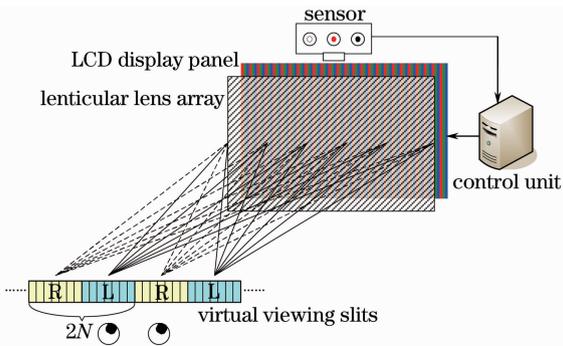


图 5 三维显示系统结构示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the 3D display system architecture

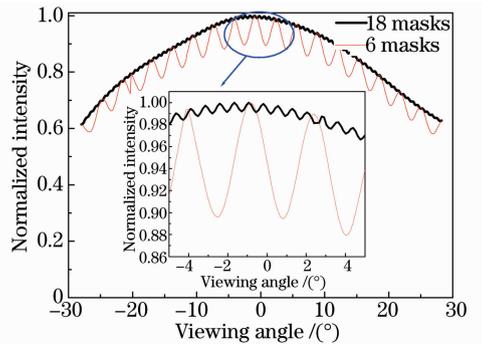


图 6 6 路蒙版与 18 路蒙版光强波动对比

Fig. 6 Comparison of the fluctuation of the light intensity with 18 active pixelated masks and 6 masks

变化就越平缓。图 6 为 6 路蒙版与 18 路蒙版形成的视区光强度波动对比,从图中可以看出当采用 18 路蒙版时,进入人眼光强的强度波动小于 0.9%。

实验中在计算机里预先存入不同角度的视差序列图或三维模型。使用传感器获取人的位置,根据位置信息由计算机实时获取适当的立体图像对,将

立体图像对与动态蒙版组相结合形成理想的双目视差与运动视差。实验中采用虚拟相机从三维模型实时获取的不同的立体图像对作为显示内容。从不同角度拍摄自由立体显示设备的效果如图 7 所示。在 56°视角范围内具有平滑的运动视差,可以观察 1200 视点的序列图组成的三维显示。

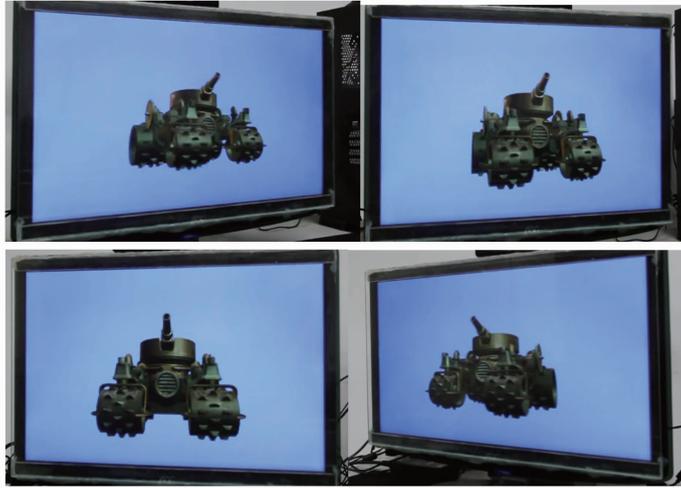


图 7 不同位置拍摄效果图

Fig. 7 Pictures taken at different positions

5 基于数字断层成像的三维显示

透镜阵列三维显示利用透镜阵列将不同的视差图在空间中不同的断层显示,形成不同的视点。随着视差图序列数的增加,视差逐渐变大,视区之间会

出现跳跃。为实现连续的运动视差,在不同虚拟断层引入了循环视差图结构,前景断层植入三维视频。视差图序列图如图 8 所示,从图中可以看出视差序列图具有视差循环结构。

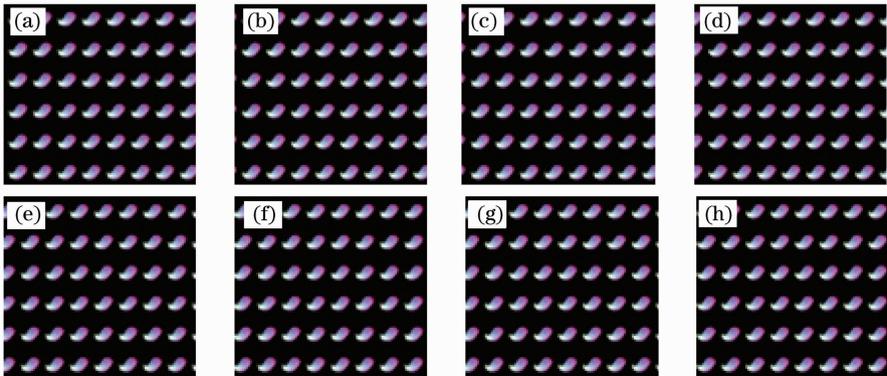


图 8 循环视差序列图

Fig. 8 Series of cycle parallax images

将图 8 中的循环视差序列图合成数字断层视差图时可以在一个深度上实现无跳变的三维效果,获得具有连续运动视差的三维显示。实验中采用 50 inch(1 inch=2.54 cm)分辨率为 3840 pixel×2160 pixel 的液晶面板与透镜阵列结合,实现三维显示。为了消除摩尔纹,透镜阵列倾斜 8.1°。显示

的后景数字断层使用 8 幅具有循环结构的视差序列图,前景断层采用三维视频。图 9 给出了在不同角度拍摄的显示照片,当观看者在显示装置前水平方向移动观看时,可以观察到荷叶始终位于花瓣背景前方,且断层三维显示不会出现匹配错误,具有平滑的运动视差。

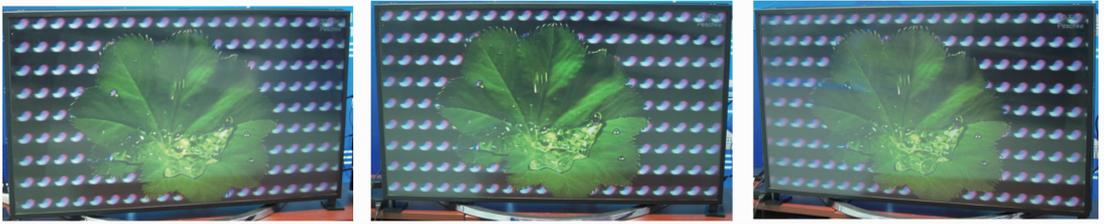


图9 基于数字断层三维显示的不同角度拍摄的照片

Fig. 9 Pictures taken at different positions for 3D display with digitally generated tomographic images

6 结 论

平滑运动视差对实现高质量的三维显示具有重要作用,可以增加人们观看三维图像的现场沉浸感,降低观看疲劳。结合全息立体图三维再现的方式,结合投影、液晶等动态数字显示设备对具有平滑运动视差的大尺寸、动态、真彩色三维显示方式进行了探索,并进行了实验验证,具有较好的显示效果。三种显示方式分别为投影阵列全息功能自由立体显示、蒙版变化自由立体显示和循环图分层自由立体显示。投影阵列全息功能屏三维显示实现了 $1.3\text{ m} \times 1.8\text{ m}$ 真彩色、动态的显示。动态部分像素蒙版变化的三维显示具有 1200 视点。断层三维显示利用循环结构的消除了伪立体和跳跃现象。三种三维显示方式均可提供平滑的运动视差,具有广阔的发展空间。

参 考 文 献

- 1 J Hong, Y Kim, H J Choi, *et al.*. Three-dimensional technologies; principles, status, and issues[J]. *Appl Opt*, 2011, 50(34): H87-H116.
- 2 H Urey, K V Chellappan, E Erden, *et al.*. State of the art in stereoscopic and autostereoscopic displays[J]. *Proc IEEE*, 2011, 99(4): 540-555.
- 3 Y C Chang, L C Tang, C Y. Yin. Efficient simulation of intensity profile of light through subpixel-matched lenticular lens array for two- and four-view auto-stereoscopic liquid-crystal display [J]. *Appl Opt*, 2013, 52(1): A356-A359.
- 4 Cao Zisheng, Li Haifeng, Yao Zhenning, *et al.*. Simulation and crosstalk analysis of 360° three-dimensional display system based

on rotating LED line array[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(5): 0508001.

曹子盛, 李海峰, 姚振宁, 等. 基于旋转 LED 线阵列全景三维显示系统的模拟及串扰分析 [J]. *中国激光*, 2012, 39(5): 0508001.

5 Pochi Yeh, Claire Gu. 3D displays; toward holographic video displays of 3D images[J]. *Chin Opt Lett*, 2013, 11(1): 010901.

6 Jia Jia, Wang Yongtian, Liu Juan, *et al.*. Progress of dynamic 3D display of the computer-generated hologram[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(5): 050002.

贾 甲, 王涌天, 刘 娟, 等. 计算全息三维实时显示的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(5): 050002.

7 Lin Yuanfang, Liu Xu, Liu Xiangdong, *et al.*. Three-dimensional volumetric display system utilizing a rotating two-dimensional LED array[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, 23(10): 1158-1162.

林远芳, 刘 旭, 刘向东, 等. 基于旋转二维发光二极管阵列的体三维显示系统[J]. *光学学报*, 2003, 23(10): 1158-1162.

8 A Jones, H I McDowd, H Yamada, *et al.*. Rendering for an interactive 360° light field display[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2007, 26(3): 40.

9 Dai Zhihua, Xu Yuping, Bu Jing, *et al.*. Light field microscope to achieve three-dimensional real-time naked-eye display[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(10): 1022005.

戴志华, 徐于萍, 步 敬, 等. 光场显微镜实现裸眼三维实时显示[J]. *光学学报*, 2012, 32(10): 1022005.

10 X Sang, F Fan, C Jiang, *et al.*. Demonstration of a large-size real-time full-color three-dimensional display[J]. *Opt Lett*, 2009, 34(24): 3803-3805.

11 X Sang, F Fan, S Choi, *et al.*. Three-dimensional display based on the holographic functional screen[J]. *Opt Eng*, 2011, 50(9): 091303.

12 X Yu, X Sang, S Xing, *et al.*. Natural three-dimensional display with smooth motion parallax using active partially pixelated masks[J]. *Opt Commun*, 2013, 313: 146-151.

栏目编辑:何卓铭