

交互式全息显示进展

王国庆, 桂进斌*, 姜智翔, 金晓宇
昆明理工大学理学院, 云南 昆明 650500

摘要 交互式全息显示因其独特的真三维(3D)显示能力,能够给用户带来自然、真实的人机交互方式。作为交互式全息显示系统的重要组成部分,手势识别模块影响交互过程是否成功、自然和舒适。在交互式全息显示系统中,手势识别方式主要有基于穿戴设备的识别、基于视觉检测的识别和基于全息 3D 显示的 3D 触摸检测。综述了交互式全息显示系统的进展,讨论了 3 种交互方式的发展情况与优缺点,分析了交互式全息显示系统目前面临的问题和发展前景,为交互式全息显示的进一步研究提供了参考。

关键词 图像处理;交互全息;手势识别;视觉检测;3D 触摸

中图分类号 O438.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.080004

Progress of Interactive Holographic Display

Wang Guoqing, Gui Jinbin*, Jiang Zhixiang, Jin Xiaoyu

College of Science, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650500, China

Abstract The interactive holographic display technology, due to its unique true three-dimensional (3D) display ability, can bring users a natural and real human-computer interactive mode. As an important part of the interactive holographic display system, the gesture recognition module has an important impact on the success, nature and comfort of the interaction process. There are mainly three gesture recognition ways in the interactive holographic display system, recognition based on wearable devices, recognition based on visual inspection, and 3D touch detection based on holographic 3D display. The research progress of the interactive holographic display system is firstly reviewed, then the development, merits and faults of these three interactive modes are discussed, and the current problems and development prospects of the interactive holographic display system are finally analyzed. This study can provide a reference for the further research on the interactive holographic display.

Key words image processing; interactive holography; gesture recognition; visual detection; three dimensional touch

OCIS codes 100.3008; 090.1995; 150.6910

1 引言

人机交互正朝着更自然和直观的方式发展,从多点触摸到手势,从二维(2D)到三维(3D)。将 3D 显示与手势控制界面结合,可以使用户与 3D 空间中的图像直接交互,使交互更加轻松愉快。交互式全息显示具有独特的真三维显示能力,有助于提供生动准确的视觉感知和自然的交互体验,其在图像/信息演示相关方面具有广泛的应用,如医学图像可视化、工业设计建模、游戏和广告等。

实时的交互式全息显示,需要足够快的全息图

像获取能力和强大的空间三维显示能力。研究人员通过改进算法来提高计算全息图像(CGH)的获取能力^[1-8],或采用专用的图形处理器(GPU)^[9]和开发专用的现场可编程阵列(FPGA)^[10-11]来进行计算。为了获取大尺寸、宽视角和高分辨率的全息显示,通常对空间光调制器(SLM)采用空分复用^[12-15]、时分复用^[16]和空分时分相结合^[17-20]的方法进行全息显示。但是,要实现大尺寸、高分辨率和实时的全息显示仍具有较大的难度。随着云计算服务的日渐成熟,通过云计算快速获取计算全息图像或许是一种可行的解决方案,但这需要快速数据传输

收稿日期: 2018-10-15; 修回日期: 2018-11-11; 录用日期: 2018-11-13

基金项目: 国家自然科学基金(61565011,61465005)、云南省自然科学基金(2014FB132)

* E-mail: jinbingui@163.com

能力的支持。

交互式全息显示系统中手势识别能力关乎用户能否成功、舒适和自然地交互。在现实中,手势识别容易受到环境光线、背景、肤色和运动物体的影响。为了提高手势识别能力和丰富手势命令,科研人员对其进行了积极探索。目前手势的控制主要分为3种:基于穿戴设备、基于视觉检测和基于3D触摸的交互方式。基于穿戴设备的手势识别具有较高的精确度,但受穿戴设备的限制,难以进行舒适的交互。基于视觉和基于3D触摸的交互方式不需要佩戴任何设备,能够自然地表达手势,是未来交互方式发展的趋势。本文主要从基于视觉手势检测和基于3D触摸方式出发,分析交互式全息显示系统,重点描述交互过程中抵抗环境光线、变化背景和类肤色运动物体影响的研究方法和在3D触摸交互时面临的指尖与3D图像配准的问题。通过总结这些研究方法,展望了今后的研究方向。

2 基于穿戴设备的全息交互系统

早期的手势识别系统通常借助穿戴设备。1997年 Presniak 等^[21]、1998年 Pappu 等^[22]利用主动力反馈的触针触摸由视觉显示器再现的全视差静态3D图像,并且手部能够感受到应有的力,实现了交互式的全息显示。由于受当时计算机性能和算法的限制,交互过程缓慢,该交互系统也是最早出现的触摸交互方式。文献[23-24]采用具有加速度仪或地磁仪的数据手套(Data Glove)采集用户的手势信号,通过电磁或惯性跟踪设备把手部的位置信息和旋转信息输入到计算机中,之后采用隐马尔科夫模型(HMMs)算法进行手势识别。其优点在于能够更精确地获取多个自由度的手势信息,易于手势的3D重建。然而,这些系统昂贵且笨重,其依靠外骨骼或将十几个传感器嵌入手套中,这可能会限制手部的运动。Wang 等^[25]从佩戴彩色手套的图像中推断手势,首先对佩戴彩色手套的手势采样生成标准化数据库,然后把摄像机拍摄到的手势数据进行标准化处理,之后将其与数据库进行查询比较,进而推断出手势。此方法使手部运动更加便捷,并且降低了系统成本。Just 等^[26]通过对指尖佩戴的特殊标记物的运动状态进行跟踪识别,达到检测手势的目的。文献[27]将指尖佩戴标记物的方法应用到交互式全息显示中,以发光二极管作为指尖标记物,顶部和侧部的双目摄像机分别检测标记物 x , y 和 z 方向的移动,根据坐标随时间 t 的变化,得到手指的位

置和运动信息。之后将手势变化与全息再现系统建立映射关系,实现了简单的孔雀全息影像开屏、闭屏的手势控制。

基于穿戴设备的交互方式主要出现在早期研究中,由于当时的全息显示技术尚处在发展初期,因此相关研究较少。总的来说,以上手势控制的实现需要借助触摸装置、数据手套和指尖标记物等辅助设备。外部设备的介入虽使得手势识别的精确度和稳定性得以提高,但却掩盖了手势的自然表达方式。

3 基于视觉检测的全息显控系统

随着对手势识别的深入研究,通过数据手套或对手部做特殊标记的手势识别已经越来越不能满足要求。基于视觉的手势识别方式应运而生,其原理是基于手势外观的识别,通过提取手势图像特征并且使用特征向量的机器学习技术来识别手势。最早是基于肤色的检测方法^[28],文献[29]采用支持向量机算法进行肤色建模并进行肤色检测,通过该方法获得的手部信息被用于手部跟踪,在特定环境下较好地实现了手部检测。但是单纯的基于肤色检测方法容易受到环境光线、背景色和肤色差异的影响。因此基于图像差分的方法^[30]更适用于静态背景情况下的手势检测,但在实际的交互过程中,静态背景是难以实现的。

上海大学的于瀛洁等^[31]提出了一种基于视觉的手指与全息影像交互系统,该系统如图1所示。通过肤色检测和利用背景差分相结合的方法检测图像中的人手区域,分析手部轮廓曲率,定位指尖位置,并通过指尖位置引导3D全息实像的旋转。全息显示系统由以 PLUTO-VIS-016 空间光调制器为核心的数字全息光电再现系统和离子雾生成器组成。此交互系统对变化背景具有一定的抗干扰能力,但当有类肤色物体出现时,容易出现手势识别错误。

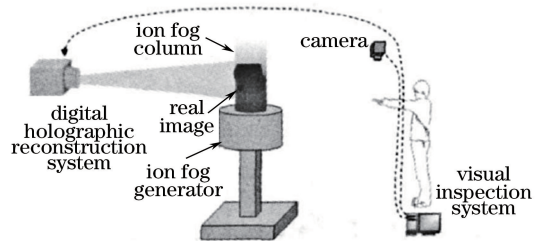


图1 基于视觉检测的手指与全息影像交互系统^[31]

Fig. 1 Interactive system of finger and holographic image based on visual detection^[31]

为解决类肤色物体在交互过程中的影响,文献[32]提出基于手掌手势的识别算法,由于手掌手势含有的特征更为复杂和独特,其能够有效地避免类肤色的运动物体对手势识别的影响。该方法虽然没有在全息交互显示中应用,但是在体三维显示中进行了交互实验,获得了93%的手势识别成功率。

2009年,微软发布3D体感摄像机Kinect。Kinect可以简单方便地获取人体相关的骨架节点^[33-34],常被作为获取特征信息的有效工具。2014年,文献[35]使用Kinect构建了跟踪模块系统,并利用光束投影仪和透明屏幕构建了反射全息显示单元,该系统投影架构如图2所示,实现了多通道(动作捕捉、语音识别、面部识别)的全息交互显示。中国空军工程大学的史小龙等^[36]利用Kinect的手势识别开发包(Kinect for Window SDK)和语音识别开发包(Microsoft Speech SDK),实现了手势和语音的双通道座舱全息显控,3D地图的场景由Unity 3D平台构建,这种全息显控系统比传统操控方法效率提高了17.5%。基于Kinect的交互系统对于任何种族和肤色的用户均可以使用,它不仅具有基于肤色检测技术的优势,还提高了系统的识别精度和稳定性。但当交互环境光线较弱时,容易出现识别错误。

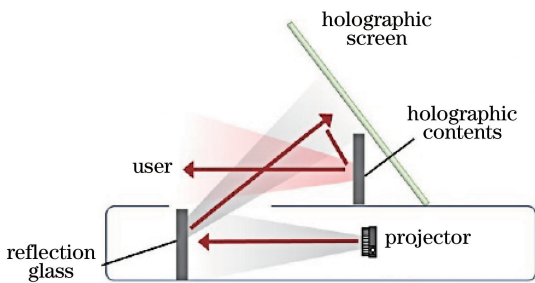


图2 全息投影系统架构^[35]

Fig. 2 Architecture of holographic projection system^[35]

2018年,文献[37]实现了实时交互式全息显示,通过图形处理单元(GPU)并行计算方式获取红、绿、蓝3种全息图,每个全息图的计算时间为22.6 ms,使用运动传感器(leap motion)检测手指手势(划动和捏拢),并将其转换为全息图像的旋转和放大/缩小,利用运动传感器的深度信息检测手指在虚拟平面中的坐标位置,并将其转为全息图像的颜色变换,最终实现了由1709个点光源组成的全息全息图像的实时交互处理。相比于Kinect系统,运动传感器的识别精度更高,在一定程度上提升了

在环境光线较弱时的识别准确率,并且降低了成本。

应用方面,文献[38-39]将交互全息显示技术应用在博物馆展览上,交互式投影系统基于佩珀尔幻象(Pepper's Ghost),通过使用与观众成45°角放置的玻璃或聚酯薄膜反射图像来创建全息图错觉。另外配备了基于运动传感器的非接触式用户界面,用户可以通过单手动作以无接触的方式旋转和放大全息3D影像,并于2016年7—11月在那不勒斯国家考古博物馆展出。

总的来说,基于视觉的手势检测能够给人们带来更自然的交互方式,但目前能识别的手势单一,只有具有丰富的手势命令识别能力,才能让用户自然、真实、不受限制地与全息3D图像进行交互。另外,基于视觉的检测方法往往在图像获取的过程中对周围环境中的光线、背景甚至拍摄角度都有一定的依赖性。虽然目前的研究已经取得一定的进展,但与基于数据手套的方法相比,还需要进一步提高识别精度,并提高对环境光线和背景变化对手势识别影响的抵抗能力,以增加系统的稳健性。

4 基于3D触摸的全息交互系统

与前两种交互方式相比,人们更希望能够和3D图像直接触摸交互。在与全息图像的自然交互中,3D图像能够被重建在屏幕的前方,用户可以直接触摸并操作重建的图像。触摸交互的方式需要把3D图像浮动在真实空间中,因此需要3D空间成像系统的支持。另外,触摸检测的关键要素是指尖位置与3D图像位置的精确配准^[40],如果指尖位置与重建图像之间没有精确的配准,交互界面会变得混乱和不舒服,可用性将受到相当大的影响。

1997年,Plesniak等^[21-22]首先实现了对全息3D图像的触摸交互。在这项工作中,触觉界面提供了静态的全视差全息立体图像,利用反馈触触再现的全息图像,触觉和视觉显示器经过精心缩放和对齐提供了重合显示,实现了对全息图像的触摸交互。

2009年,Kim等^[41]提出基于积分成像的3D实时交互系统,该系统如图3所示。在该系统中,元素图像被加载在透镜阵列前面的显示装置上,每个像素通过透镜阵列呈现3D光学重建,然后使用两个摄像机进行手部检测,分割提取两个图像指尖的位置,利用立体几何计算指尖的3D坐标,以检测与3D图像的相互作用。为了解决指尖和3D图像的配准问题,增加了系统的搭建难度和算法计算时间。

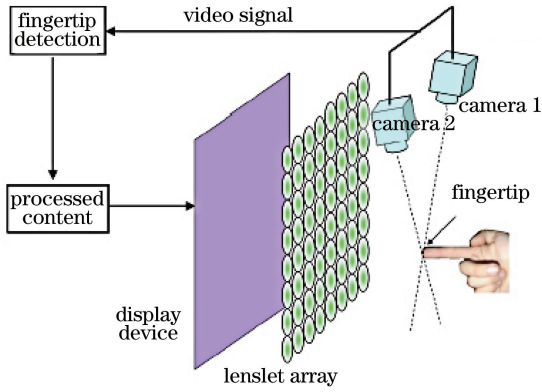


图 3 交互式积分成像系统^[41]

Fig. 3 Interactive integral imaging system^[41]

另外,在传统的积分成像系统中,通过透镜观察元素图像时,观察者的眼睛会感觉到严重的失真,这会导致较小的视角、较低的显示分辨率和较差的连续显示深度。2018年,Sang等^[42]在3D光场显示器中利用微小透镜提高了横向空间分辨率,利用复合透镜阵列抑制像差,使用全息功能屏幕^[43]调制来自复合透镜阵列的光分布。最终以45°视角展示具有9216个视点的实时交互式浮动全视差3D光场显示器,得到了连续清晰的3D影像,提高了连续3D图像的显示深度和分辨率。

文献^[44]提出了另一种直接交互的3D触摸系统,如图4所示,3D图像通过旋转定向漫射器和高帧率的投影机再现,由于其使用半反射镜提供虚拟图像,用户需要通过半反射镜查看图像并与图像交互,用户的手部交互由其他红外(IR)相机捕获。该交互系统的优点在于包括手在内的物理对象不会阻挡重建的图像,另外使用红外原理检测消除了背景颜色和其他物体的影响,但该成像系统体积过大、红

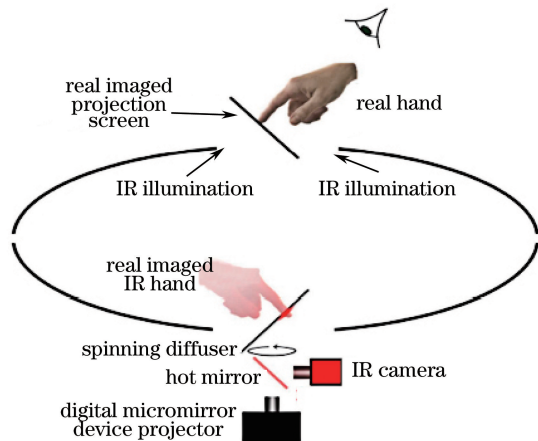


图 4 直接交互的3D触摸系统^[44]

Fig. 4 3D touch system with direct-interaction^[44]

外摄像机价格昂贵,限制了其发展。

2016年,Yamaguchi等^[45-46]进行基于颜色信息的3D触摸实验,如图5所示^[45]。利用全息屏幕和高清投影仪将真实的3D图像重建在3D光场显示器前方的半空中,通过检测指尖触摸3D图像时散射的光线判断指尖与3D图像触摸的位置,进而将信息反馈给3D重建系统,实现用户对简单全息指令界面的操作。该实验过程中只有两种颜色可以区分,笔者深入研究了更多颜色^[47],使用红、绿、蓝(RGB)三色空间中的欧几里得距离(Euclidean Distance)或马式距离(Mahalanobis Distance)实现了对7种颜色的识别。目前这种方法还无法对自然3D图像进行触摸检测,这是因为自然3D图像的颜色分布复杂且具有不确定性。但该系统能够让用户使用手势很好地处理3D指令界面,增加了交互方式的多样性,并且无须关心手势位置和3D图像位置的配准问题,这是因为根据3D图像的颜色信息就可以解决这一问题。

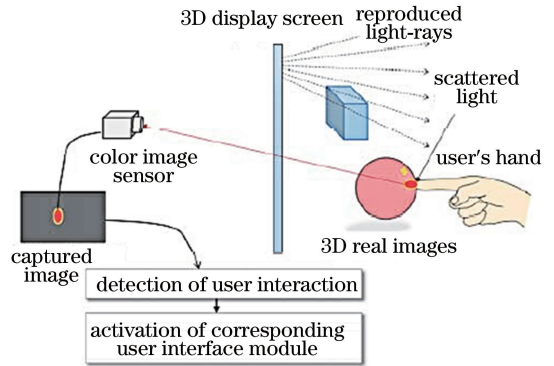


图 5 使用投影仪和全息屏幕的3D触摸显示系统^[45]

Fig. 5 3D touch display system with projector and holographic screen^[45]

上述基于触摸检测的全息交互系统主要基于各种摄像机,难以被集成到便携式设备中。为了解决手势位置与3D图像位置精确配准的问题,文献^[48-49]提出了一种将光学传感器嵌入到平板液晶显示器的系统,如图6所示^[48]。白色发光二极管(W-LED)提供照明光源,红外发光二极管(IR-LED)发出的光被指尖反射, θ_n 为指尖与每个IR传感器的连线和屏幕的夹角。将光学传感器嵌入显示器中,并将角度扫描器添加到显示器的边缘,平板显示器可以感测到从裸露的手指反射的图像,通过反射的图像确定指尖的三轴(x, y, z)信息,从而检测出指尖触摸图像的位置。由于感应系统集成在显示系统中,手势与3D图像的配准无关紧要,因此系统

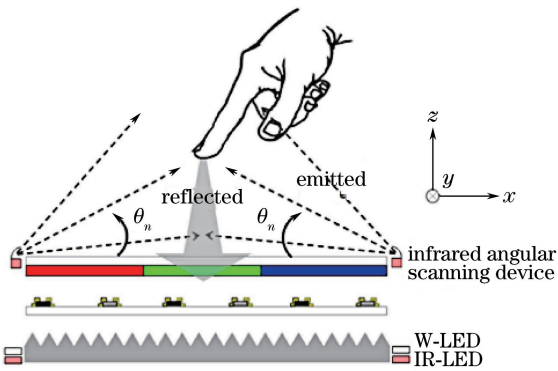


图6 嵌入光学传感器阵列的3D触摸界面系统^[48]

Fig. 6 3D touch interface system embed with optical sensor array^[48]

具有高稳健性。另外,交互系统的集成化使该系统便于应用到便携式设备中。

基于触摸的全息交互方式尚处于发展早期,目前能够实现的触摸交互指令还比较简单。但触摸交互的方式不仅限于此,还会有更多的触摸方式有待开发,如使用手指选取3D图像的某区域进行放大或缩小、对空间中显示的3D文档信息进行复制、粘贴等。

5 结束语

目前,基于视觉检测的交互系统对静态的和简单的手势具有较高的识别率,但对复杂手势的识别算法还需要进一步研究,以提高对复杂手势的识别成功率。并且目前的交互系统都是在特定环境下进行实验,对环境光线的要求较高,强光线和弱光线都容易导致交互系统识别错误,因此需要开发出高精度的3D感测设备解决这一问题。除此之外,动态手势的识别算法的实时性要求较高,给相关算法限定了时间复杂度。基于触摸的交互系统为交互方式提供了更多的选择,但手势位置和3D图像的位置需要精确配准才能提供准确的触摸检测,这增加了搭建系统的复杂程度和算法的计算成本,而将光学传感器嵌入到3D光场显示器中的方法将有助于解决这一问题,并且这是未来系统小型化和便携化发展的重要方向之一。触摸交互系统依靠3D光场重建系统的支持,而基于波前重构的全息显示器是目前具有较好发展前景的3D光场显示器。未来基于视觉手势检测和基于触摸检测的交互方式相结合将能够为用户提供更多样化的交互方式,使交互更加自由和人性化。

实时交互式全息显示是未来显控人机界面发展

的终极目标,这是一门集光学、材料、计算科学、通信技术交叉的技术,相信随着科技的发展,实时交互式全息显示技术将会前所未有地改变人们的人机交互方式。

参 考 文 献

- [1] Matsushima K, Takai M. Recurrence formulas for fast creation of synthetic three-dimensional holograms [J]. *Applied Optics*, 2000, 39(35): 6587-6594.
- [2] Barabas J, Jolly S, Smalley D E, *et al.* Diffraction specific coherent panoramagrams of real scenes [J]. *Proceedings of SPIE*, 2011, 7957: 795702.
- [3] Ikeda K, Takaki Y. Calculation technique for a holographic stereogram generation from multi-view images [J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, 8644: 86440G.
- [4] Lucente M E. Interactive computation of holograms using a look-up table [J]. *Journal of Electronic Imaging*, 1993, 2(1): 28-34.
- [5] Pan Y, Xu X, Solanki S, *et al.* Fast CGH computation using S-LUT on GPU [J]. *Optics Express*, 2009, 17(21): 18543-18555.
- [6] Jin X Y, Gui J B, Liu C, *et al.* Progress of fast generation algorithm of computer-generated hologram based on point source model [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(10): 100005.
金晓宇, 桂进斌, 刘超, 等. 基于点源模型计算全息图快速生成算法的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(10): 100005.
- [7] Yang D, Liu J, Zhang Y X, *et al.* The optimizations of CGH generation algorithms based on multiple GPUs for 3D dynamic holographic display [J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 10153: 101530R.
- [8] Liu C, Gui J B, Li J C, *et al.* Fast generation algorithm of computer-generated hologram based on triangular surface light source frequency spectrum analytic solutions [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(1): 010901.
刘超, 桂进斌, 李俊昌, 等. 基于三角形面光源频谱解析解的计算全息图快速生成算法[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(1): 010901.
- [9] Petz C, Magnor M. Fast hologram synthesis for 3D geometry models using graphics hardware [J]. *Proceedings of SPIE*, 2003, 5005: 266-275.
- [10] Shiraki A, Yoshimura K, Masuda N, *et al.* Special-purpose computer HORN-5 for a real-time electroholography[J]. *Optics Express*, 2005, 13(6): 1923-1932.

- [11] Ichihashi Y, Nakayama H, Ito T, *et al.* HORN-6 special-purpose clustered computing system for electroholography [J]. *Optics Express*, 2009, 17(16): 13895-13903.
- [12] StHilaire P, Lucente M E, Jepsen M L, *et al.* Electronic display system for computational holography [J]. *Proceedings of SPIE*, 1990, 1212: 174-183.
- [13] Stanley M, Smith M A G, Smith A P, *et al.* 3D electronic holography display system using a 100 mega-pixel spatial light modulator [J]. *Proceedings of SPIE*, 2004, 5249: 297-309.
- [14] Yaraş F, Kang H, Onural L. Circular holographic video display system [J]. *Optics Express*, 2011, 19(10): 9147-9156.
- [15] Xu X W, Liang X N, Pan Y C, *et al.* Development of full-color full-parallax digital 3D holographic display system and its prospects [J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, 8644: 864409.
- [16] Chen R H Y, Wilkinson T D. Field of view expansion for 3-D holographic display using a single spatial light modulator with scanning reconstruction light [C] // 2009 3DTV Conference on the True Vision-Capture, Transmission and Display of 3D Video, May 4-6, 2009, Potsdam, Germany. New York: IEEE, 2009: 1-4.
- [17] Sasaki H, Yamamoto K, Wakunami K, *et al.* Large size three-dimensional video by electronic holography using multiple spatial light modulators [J]. *Scientific Reports*, 2014, 4: 6177.
- [18] Li F Z, Wang D, Wang C, *et al.* Method of large-size holographic reconstruction based on spatial multiplexing [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(4): 0409001.
李芳转, 王迪, 王翠, 等. 基于空分复用的大尺寸全息再现方法 [J]. *中国激光*, 2015, 42(4): 0409001.
- [19] Wang D, Tang W H, Wang J, *et al.* A method of wide-viewing angle holographic display in color [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(6): 060901.
王迪, 唐文华, 王君, 等. 大视角的全息真彩色显示方法 [J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(6): 060901.
- [20] Chang S Q. Holographic three-dimensional display technology based on time-space multiplexing [J]. *Journal of the Graduates Sun Yat-Sen University (Natural Sciences-Medicine)*, 2014, 35(3): 40-60.
常胜倩. 基于时-空复用的全息三维显示技术 [J]. *中山大学研究生学刊(自然科学·医学版)*, 2014, 35(3): 40-60.
- [21] Plesniak W J, Klug M A. Tangible holography: Adding synthetic touch to 3D display [J]. *Proceedings of SPIE*, 1997, 3011: 53-60.
- [22] Pappu R, Plesniak W J. Haptic interaction with holographic video images [C] // *Proceedings of the IS&T/SPIE's Symposium on Electronic Imaging*, March 18, 1998, San Jose, CA, USA. [S. l. : s. n.], 1998: 38-46.
- [23] Zimmerman T G, Lanier J, Blanchard C, *et al.* A hand gesture interface device [C] // 1987 Conference on Human Factors in Computing Systems and Graphics Interface, May 13, 1987, NY, USA. New York: ACM, 1987: 189-192.
- [24] Sturman D J, Zeltzer D. A survey of glove-based input [J]. *IEEE Computer Graphics & Applications*, 1994, 14(1): 30-39.
- [25] Wang R Y, Popović J. Real-time hand-tracking with a color glove [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2009, 28(3): 1-8.
- [26] Just A, Marcel S. A comparative study of two state-of-the-art sequence processing techniques for hand gesture recognition [J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2009, 113(4): 532-543.
- [27] Yu Y J, Li Y L, Zheng H D. Interaction between people and opt-electronic reconstructed real images of digital hologram [J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2009, 24(6): 61-65.
于瀛洁, 李雨浪, 郑华东. 数字全息光电再现实像与人的交互 [J]. *光电技术应用*, 2009, 24(6): 61-65.
- [28] Yuan M, Farbiz F, Manders C M, *et al.* Robust hand tracking using a simple color classification technique [C] // 2008 Conference on Virtual-Reality Continuum and Its Applications in Industry, December 8-9, 2008, NY, USA. New York: ACM, 2008: 7-12.
- [29] Han J, Awad G, Sutherland A. Automatic skin segmentation and tracking in sign language recognition [J]. *IET Computer Vision*, 2009, 3(1): 24-35.
- [30] Hardenberg C V, Berard F. Bare-hand human-computer interaction [C] // *Proceedings of the 2001 Workshop on Perceptive User Interfaces*, November 15-16, 2001, Orlando, Florida, USA. New York: ACM, 2001: 1-8.
- [31] Yu Y J, Li Y L, Zheng H D. Research of vision-based interaction method between finger and

- holographic images[J]. *Laser & Infrared*, 2010, 40(4): 447-452.
- 于瀛洁, 李雨浪, 郑华东. 一种基于视觉的手指与全息影像交互研究[J]. *激光与红外*, 2010, 40(4): 447-452.
- [32] Pan W P, Shen C L, Zhang Z X, *et al.* Interactive volumetric three-dimensional display based on dynamic hand gesture control [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2010, 37(12): 88-95.
- 潘文平, 沈春林, 张赵行, 等. 基于动态手势控制的交互式体三维显示[J]. *光电工程*, 2010, 37(12): 88-95.
- [33] Zhang Y Y, Guo X. Research and realization of dynamical gesture recognition algorithm based on Kinect[J]. *Computer Technology and Development*, 2017, 27(12): 11-15.
- 张莹莹, 郭星. 基于 Kinect 动态手势识别算法的研究与实现[J]. *计算机技术与发展*, 2017, 27(12): 11-15.
- [34] Bao Z Q, Lü C G. Real-time gesture recognition based on Kinect [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(3): 031008.
- 鲍志强, 吕辰刚. 基于 Kinect 的实时手势识别[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(3): 031008.
- [35] Lim S, Kim S. Holographic projection system with 3D spatial interaction [C] // Herawan T, Deris M, Abawajy J. 2014 Conference on Advanced Data and Information Engineering (DaEng-2013). Singapore: Springer, 2014, 285: 409-416.
- [36] Shi X L, Li X L, Gao H N, *et al.* Multimodal interaction technology in the holographic display and control interfaces[J]. *Packaging Engineering*, 2016, 37(4): 120-124,167.
- 史小龙, 李晓玲, 高虹霓, 等. 全息显控界面中多通道人机交互技术研究[J]. *包装工程*, 2016, 37(4): 120-124,167.
- [37] Yamada S, Kakue T, Shimobaba T, *et al.* Interactive holographic display based on finger gestures[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 1-7.
- [38] Bovier F, Caggianese G, de Pietro G, *et al.* An interactive 3D holographic pyramid for museum exhibition[C] // 2016 12th International Conference on Signal-Image Technology & Internet-Based Systems (SITIS), November 28-December 1, 2016, Naples, Italy. New York: IEEE, 2016: 428-434.
- [39] Caggianese G, Gallo L, Neroni P. Evaluation of spatial interaction techniques for virtual heritage applications: A case study of an interactive holographic projection [J]. *Future Generation Computer Systems*, 2018, 81: 516-527.
- [40] Chen J S, Chu D. Realization of real-time interactive 3D image holographic display [Invited] [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(3): A127-A134.
- [41] Kim N W, Shin D H, Kim D J, *et al.* Vision-based 3D fingertip interface for spatial interaction in 3D integral imaging system [C] // 2009 International Conference on Complex, Intelligent and Software Intensive Systems, March 16-19, 2009, Fukuoka, Japan. New York: IEEE, 2009: 1006-1011.
- [42] Sang X Z, Gao X, Yu X B, *et al.* Interactive floating full-parallax digital three-dimensional light-field display based on wavefront recomposing[J]. *Optics Express*, 2018, 26(7): 8883-8889.
- [43] Sang X, Fan F C, Jiang C C, *et al.* Demonstration of a large-size real-time full-color three-dimensional display[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(24): 3803-3805.
- [44] Butler A, Hilliges O, Izadi S, *et al.* Vermeer: Direct interaction with a 360° viewable 3D display[C] // 2011 Proceedings of ACM UIST'11, October 16-19, 2011, Santa Barbara, CA, USA. New York: ACM, 2011: 569-576.
- [45] Yamaguchi M. Holographic 3D touch sensing display [C] // 2015 Digital Holography & 3-D Imaging Meeting. OSA Technical Digest, May 24-28, 2015, Shanghai, China. Washington: OSA, 2015: DM3A.1.
- [46] Yamaguchi M, Higashida R. 3D touchable holographic light-field display [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(3): A178-A183.
- [47] Sakurai S, Nakamura T, Yamaguchi M. The use of color in scattered light for 3D touchable holographic light-field display [C] // 2016 Proceedings of JSAP-OA Joint Symposia Abstracts, September 13-16, 2016, Niigata, Japan. Washington: OSA, 2016: 13a_C301_4.
- [48] Ting C H, Jen T H, Chen C H, *et al.* 3D air-touch user interface with high touch accuracy on stereoscopic displays [J]. *Journal of Display Technology*, 2016, 12(5): 429-434.
- [49] Wang G Z, Huang Y P, Chang T S, *et al.* Bare finger 3D air-touch system using an embedded optical sensor array for mobile displays [J]. *Journal of Display Technology*, 2014, 10(1): 13-18.