

·信号与信息处理·

立体显示技术的研究进展

王程, 朱向冰

(安徽师范大学光电技术研究中心, 安徽 芜湖 241000)

摘要: 立体显示技术从观看者是否佩戴设备进行观看可以分为头戴式和裸眼式两种类型。其中头戴式又可以分为偏振眼镜、互补色眼镜、快门眼镜、头盔等技术;裸眼式可以分为光栅式、全息式、集成成像和体显示。分类介绍头戴式和裸眼式立体显示技术的原理、结构、各自的优缺点以及最新研究进展,分析了当前立体显示技术的现状,展望了立体显示的未来。

关键词: 立体显示; 双目视差; 自由立体显示; 集成成像; 数字全息

中图分类号: TN27

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2014)-01-0032-08

Research Development of Stereoscopic Display Technology

WANG Cheng, ZHU Xiang-bing

(Photoelectric Technology Research Centre, Anhui Normal University, Wuhu 241000, China)

Abstract: Stereoscopic display technology can be classified as head type and nakedness-eye type according to whether viewers wear the equipment or not. Head type is classified as polarized glasses, color complementary glasses, shutter glasses and helmet. Nakedness-eye type is classified as grating display, holographic display, integral imaging and volumetric display. The principles, structure, advantages, disadvantages and the art-of-state research development of stereoscopic display technology for head type and nakedness-eye type are introduced respectively. The status of stereoscopic display technology is analyzed. And the future of the technology is forecasted.

Key words: stereoscopic display; binocular parallax; auto-stereoscopic display; integral imaging display; digital holography

目前主流的显示技术是平面显示技术,平面显示技术渐渐地不能满足人们的视觉需求,因为现实世界的物体都是三维的。与传统的平面显示技术相比,立体显示技术有明显的优势。

可以让观看者看到物体的各个方面,能在一定程度上让观察者有身临其境的感受,更加具有真实感。立体显示技术被认为是显示技术的最终形式。近几年来,为了减轻人眼的观看疲劳,立体显示技术在硬件设计和计算图像处理设计上都有一些进展^[1]。

立体显示技术大体可以分为两大类:头戴式和裸眼式。在头戴式立体显示技术中,观看者需要佩戴眼镜、头盔等辅助的设备才可以观看到立体效果,

这类技术目前发展比较成熟,已经被广泛应用于各大电影院;裸眼式立体显示技术是指观看者无需携带任何辅助设备就可以直接观看到立体效果的技术,国内有时候又称之为自动立体显示技术、自由立体显示技术。裸眼式立体显示技术主要有光栅式、全息式、集成成像和体显示技术等。其中全息式、集成成像和体显示又叫真三维立体显示。

从1838年C Wheatstone发明第一台立体图片观赏器开始,立体显示技术已经发展了一百多年的时间^[2]。下面将分类介绍各种技术的近年研究进展并预测发展趋势。

收稿日期: 2013-11-14

基金项目: 安徽省科技攻关项目(1301022058)

作者简介: 王程(1989-),男,安徽六安人,硕士研究生,主要从事光学设计方面的研究。

1 头戴式立体显示技术

头戴式立体显示技术主要基于双目视差原理。双目视差是指因为人的左右眼之间存在距离,同一个物体在左右眼视网膜上成的两个像有着细微的差别,经过大脑融合处理,人们就可以感受到物体深度的立体变化,即立体效果,这是人类产生立体感的主要因素。根据该因素,显示两幅有细微差别的平面图像,通过光学方式分配给左右眼,人类也会产生立体感,左眼得到的图像叫做左视差图像,右眼得到的图像叫做右视差图像。但人眼的聚焦、图像的对比度、图像之间的相互遮挡、运动等因素亦会影响立体感,所以双目视差技术有缺陷,长时间使用后,用户可能会感到头晕。

头戴式立体显示技术比较成熟,所以近十年来进展很少。常见的头戴式立体显示技术主要有偏振眼镜、互补色眼镜、快门眼镜、头盔等技术。

偏振眼镜技术可以分为投影仪系统和平板显示器系统两种。双投影仪系统是把两幅图像通过两个投影仪向屏幕上投影,并且在每个投影仪前放上偏振方向不同的偏振片,用户佩戴偏振眼镜,左眼只能看到左侧投影仪放射的图像,右眼只能看到右侧投影仪放射的图像,就可以产生立体感。双投影仪系统需要两个投影仪,所以成本比较高,而且向屏幕投影时需要图像进行校准。该技术已基本成熟。2005年,REIKE I对该技术进行了改进,改用单投影仪系统,该方法是在投影仪前面加上可以旋转的偏振片,不仅可以减少成本而且降低了对图像校准的要求^[3]。

平板显示器系统^[4]主要由台湾工研院在十年前完善的,他们将显示屏分成很多行(也可以分成很多列),奇数行显示一幅图像,偶数行显示另一幅图像,在显示屏前贴上特殊的偏振片——微相位延迟面板,奇数行和偶数行透过的光线偏振方向不一样,两幅图像的出射光的偏振方向不一致,通过佩戴相应的偏振眼镜就可以观看到立体图像了。该技术主要以液晶显示器(LCD)或等离子显示器(PDP)为基础,但微相位延迟面板制作比较复杂、成本高,没有推广。

近五年来,互补色眼镜技术没有得到发展,并且随着其他立体显示技术的发展,该技术的市场空间被压缩了。该技术用两种不同的颜色印刷两幅图像,然后在两只眼睛前放上不同颜色的滤光片,通过

这样的方法就实现了左右眼图像的分离。分色技术制作简单、操作容易、成本低,但是有亮度低、失真、串扰现象严重、易引起眼疲劳等缺点。

另一种头戴式立体显示技术是头盔技术,主要用在虚拟现实的研究中,用户每只眼睛前方都有一个微型显示器,通过成像的方式让用户看到不同的图像。该技术的主要缺点在于:单用户、分辨率低、头盔沉重、易给眼睛带来不适。

快门眼镜技术是把左右视差的图像在显示器上交替的播放,观看者佩戴快门眼镜,当播放左视差图像时,快门眼镜只有左边透光;当播放右侧视差图像时,快门眼镜只有右侧透光。根据视觉的暂留,观看者好像同时看到了左右视差图像,经过大脑融合,产生立体感。但是快门眼镜有成本高、存在串扰、对显示器的帧频要求较高以及运动中观看图像会产生变形等不足,2012年,HONG H针对以上不足提出了修改图像数据的方法^[5]。

2 裸眼式立体显示

裸眼式立体显示技术按原理分为两大类:一类是利用双目视差原理,每次只显示几幅平面图像,然后让两眼分别得到各自的图像,如光栅式立体显示;另一类是在三维空间中产生立体图像,如全息技术等,用户在不同的位置能看到物体的不同侧面。四川大学的王琼华等学者常翻译成“自由立体显示”,而合肥工业大学的学者习惯翻译成“自动立体显示”。

2.1 光栅式立体显示

光栅式立体显示技术是利用光栅的遮挡或成像作用,将左右眼的视差图像分开,在理想的观察区域内,左眼只能看到左视差图,右眼只能看到右视差图,因而产生立体感。此处采用的是线密度非常低的光栅,并非使用光栅的衍射效应。常见的光栅式立体显示系统一般由光栅和液晶显示器组成。根据狭缝光栅与显示器的位置又分为前置式和后置式,如图1所示。由于狭缝使得大部分的光线无法透过,所以亮度下降,采用柱状光栅可以很好地解决亮度低的问题,如图2^[6]。飞利浦公司的产品就使用了柱状光栅。由于液晶显示器显示多视差的图像时存在着观看点少、串扰、分辨率低等问题,因此人们采用投影仪来代替液晶显示器,但是由于加工工艺等问

题,光栅与投影仪匹配很困难,图像容易产生偏差。2009年,TAOYH等提出采用双狭缝光栅或双柱状透镜光栅的方法^[7],在双狭缝光栅系统中,如图3所示。第一个光栅是用来控制图像的尺寸,第二个光栅主要起遮挡作用;在双柱面光栅系统中,采用两个光栅可以有效地消除系统的像差,提高显示效果,但是显示器和柱状光栅组合容易产生莫尔条纹和色彩混淆。EICHENLAUB J等提出柱状透镜和菲涅尔透镜组合的方法可以产生多个同一视点的观察区,使用户在多个位置都可以看到清晰的图像,但是大尺寸的非涅尔透镜价格昂贵^[8]。

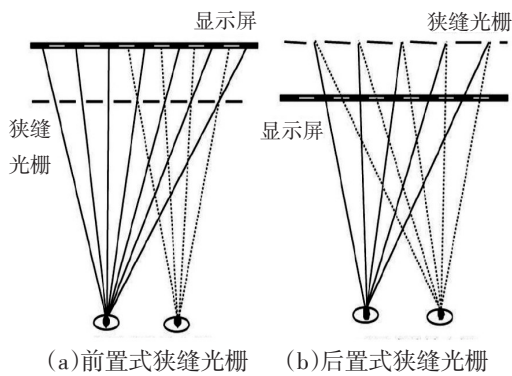


图1 前置式光栅和后置式光栅

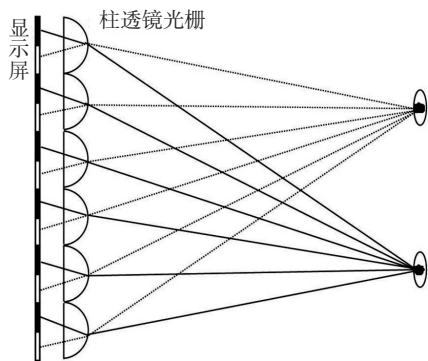


图2 柱状透镜光栅

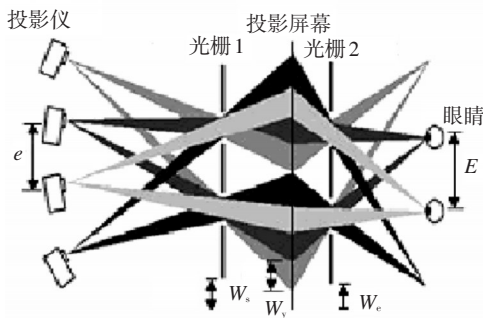


图3 双狭缝光栅

由于单个光栅或同种光栅的同向叠加只能提供水平方向的视差图,所以观看效果不理想。为了能够同时提供水平和垂直方向的视差,即全视差,王琼华等提出了狭缝光栅和柱状透镜光栅叠加的方法,如图4^[9]。该方法是将一个狭缝光栅和柱状光栅叠加起来,通过调节显示器的像素和两个光栅的参数,可以有效地显示具有全视差的图像,但它的不足是图像的亮度降低了。SON J Y等还提出一种交叉透镜阵列的方法,如图5^[10-11]。该方法将两个柱状透镜阵列正交的叠加到一起,形成一个交叉透镜,这种交叉透镜阵列比集成成像所使用的微透镜阵列制造简单,成本相对较低,并且减少了串扰,有很好的应用前景,但是存在一些缺点^[12]。

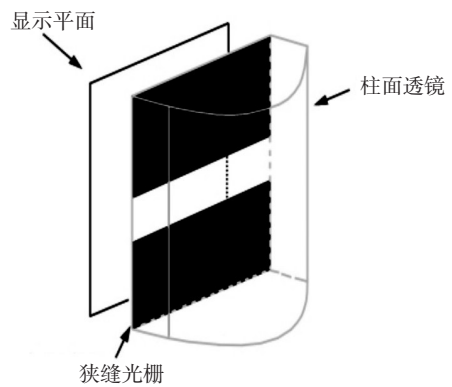


图4 狭缝光栅和柱面透镜的叠加

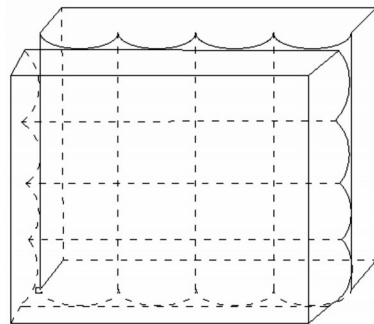


图5 柱状透镜的正交叠加

在大多数基于视差的立体显示技术中,同时显示两幅图像,当用户稍微改变位置时,不能看到物体的不同侧面,会感觉到随着人头部的移动和转动,显示的立体物体也在同步的转动或移动;当用户大幅度运动时,图像不能准确地分配到两眼中,丧失立体感或产生错误的立体感。为了解决上述问题,同时显示多幅图像,发展了多视点技术^[3,10,13],用户在不同

位置能够看到物体的不同侧面,但该技术会显著降低图像的分辨率,另外对于单用户的立体显示器,发展出了头部跟踪技术^[14]。

2.2 全息式立体显示

传统的全息式立体显示一般分为全息记录和波前重建两个相对独立的过程,但是传统技术的缺点在于对环境要求十分苛刻,需要保证无振动,并且还需要相干性好的激光光源,并且难以显示动态图像。

随着电荷耦合器(CCD)和光学调制器(SLM)的发展,形成了一门新的全息技术——数字全息技术。数字全息技术就是用CCD来代替传统全息技术中感光胶片,并且用数字计算的方式再现立体图像。但是传统的SLM的像素大小只能是7~20 mm,即存在分辨率问题,在这种情况下最大的衍射角只有几度左右,这不能使人的左右眼同时观看到立体图像,并且图像中斑点的存在也大大降低了图像的质量^[15]。对于分辨率的问题,人们采取了很多改善的处理措施,如ZHANG YAN等提出的同轴记录方式^[16],但是该方法不适合记录动态过程。HADDAD W S等提出采用无透镜傅里叶变换全息术^[17],但是该方法会存在非傍轴像差和离轴像差。SHERIF H等提出了空间角分复用技术^[18]。对于产生斑点的问题人们也提出了改善措施,如在同轴全息中,ZHANG YAN等提出采用模拟位相恢复算法和双强度记录法^[16-19];JOYEUX D等提出利用光学设备进行滤波处理^[20]。对于图像再现的过程,人们也提出一系列的算法,如MATASUSHIMA K等提出的平面波角谱分析法^[21];Li Y等提出的多视角投影合成法^[22];NAMIAS V等提出的分数傅里叶变换法^[23];LOHMANN A W等提出的菲涅耳波带法^[24];CHOI K等提出的改进的IFTA算法^[25]等。对算法的不断改进和新算法的提出可以减少计算量和提高图像质量。为了解决色彩失真的问题,PATURZO M提出的RGB分离法可以显示物体的真色彩,该方法先将物体分离成RGB三基色,然后分别进行全息计算,最后再现全息图并将三基色叠加^[26]。

近年来,数字全息技术发展很迅速。2003年,HUEBSCHMAN M等人利用DMD搭建了一个动态全息三维图像显示系统^[27],如图6。2005年,韩国首尔国立大学的CHOI K等人利用微透镜阵列构造了一个全视差大视角度的三维全息显示系统^[28],如图7。2008年,GOPINATHAN U等人利用CCD和SLM

构造了一个现实三维物体的全息投影显示系统^[29],如图8。

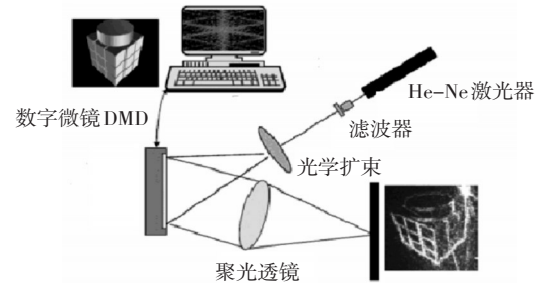


图6 动态全息3D图像投影系统

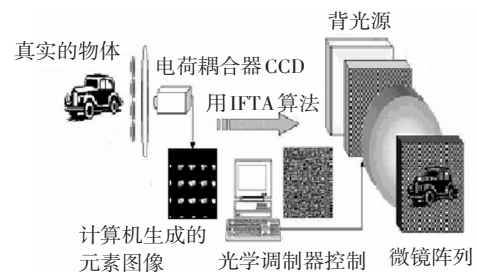


图7 大可视角度全视差全息三维显示系统原理图

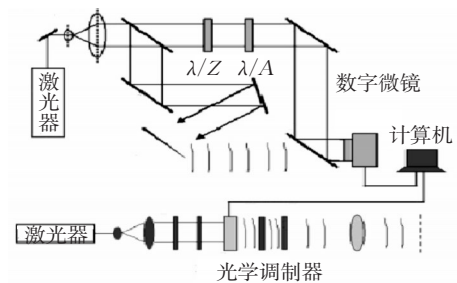


图8 三维物体的全息投影显示系统

2.3 集成成像

集成成像技术一般分为三维信息的记录和光学重构两个过程。系统结构原理如图9。在记录过程中,目标物体的视差不同的平面信息通过微透镜列成像于过渡像平面上,再经过中继透镜的汇聚作用,目标物体的平面信息被CCD所记录,形成平面数字图像。重构过程所用的微透镜阵列的光学参数(物距、孔径、微透镜阵列的焦距等)要和记录过程的相匹配,根据光学可逆原理和人脑的融合,就可以观看到立体图像。记录过程只能是成实像,因为CCD只能记录实像的平面信息;重构过程是供人眼观察的,所以可以通过成实像和虚像两种方式形成立体图

像。集成成像技术可以提供全视差的图像(水平方向和垂直方向),不需要任何的特殊设备就可以提供全彩的图像,提供的观看点是准连续的,在一定的区域内,可以供多人观看。但是集成成像技术也有着观看视角有限、分辨率低、景深不够、平面/立体转换困难等缺点。

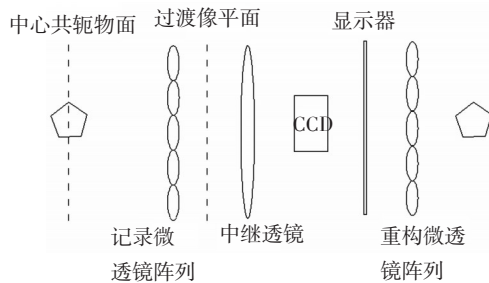


图9 集成成像系统原理图

为了增大观看视角,人们提出了很多方法,比如MIN S W等提出采用光圈数较小的Fresnel透镜阵列来提高观看视角,但是存在像差^[30]。JANG J S等提出用透镜阵列随着快速更新的像素阵列做机械运动可以获得较大的观看视角的方法^[31]。但是当像素更新频率较大时,保持透镜同步运动难度较大,而且由于透镜的运动还会引起噪音等问题。JUNG S等提出在显示器前加上一个正交的偏正器,在透镜阵列后加上正交的偏振薄膜的方法^[32]。但是由于偏正薄膜的使用,图像的亮度明显减弱了。KIM Y等通过将透镜阵列和显示器做成弯曲状来提高水平方向观看视角^[33-34]。

对于景深问题,人们提出了产生多个CDP(central depth plane)方法,如JANG J S等提出的不断改变显示器和透镜阵列之间的间距来产生2个CDP^[35];PRAK J H等提出的用单轴晶体板和LCD快门来产生三个CDP^[36];JUNG S等提出的用镜面阵列来控制光路的长度来产生两个CDP等^[37]。这些方法的不足之处在于体积大、结构复杂、光学效率低。

对于提高分辨率的问题,人们也提出了很多行之有效的办法。其中最典型要属时间或空间的多路复用技术。ARAI等基于时间多路复用技术提出用超过2 000条扫描线的高清晰度的视频系统,这个系统可以及时的拍摄和播放图像^[38]。ISONO等人实现的立体系统也采用了空间多路复用技术^[39],该系统由4台彩色摄像机、一台高分辨率液晶投影仪和柱状透镜光栅板与菲涅尔透镜组合的背投屏幕构成。另外一种时间多路复用技术是通过针孔阵列的电移动和

旋转透镜来实现的^[40-41]。空间多路复用技术主要是采用多个投影仪和显示器来提高分辨率的^[42],但是需要精准的操作。

最近,人们对于集成成像技术的研究也有很大的进展,东芝公司推出了具有480×300像素的24 inch的可以显示高质量图像的平板显示器;日立公司用1 280×768像素的全彩LCD平板显示器实现了集成成像系统^[43]。

2.4 体显示

体显示技术分为扫描式和体积式两种。扫描式主要有Felix立体系统和Perspecta立体显示器系统两种。体积式立体显示的代表产品是SolidFelix和DepthCube系统。

2.4.1 扫描式

扫描式可划分为平移和旋转两种。

平移式立体显示是通过前后高速平移屏幕或反射镜构成。系统控制高速平移的屏幕快速显示物体的剖面图,高速刷新率在空间位置上分布的剖面图融合成一个三维物体整体图像,而反射镜一般为镀有反射面的塑料薄膜,它被安装于扩音器喇叭上。系统控制喇叭的凸和凹使反射镜高速平移并反射显示空间处图像。自20世纪以来,平移式的立体显示技术几乎没有发展。

Felix3D系统^[44]是一种典型的旋转扫描式立体显示,如图10^[44]。它是由一个半球形显示器、RGB激光器、光学元件和计算机等组成。显示器是由马达带动的,可以高速旋转。RGB激光器发出的激光经过光学元件调节后打到显示器上,产生一个亮点,如果显示器旋转的速度够快的话,这个亮点看上去就好像悬浮在空中一样。这个亮点就是一个空间像素,

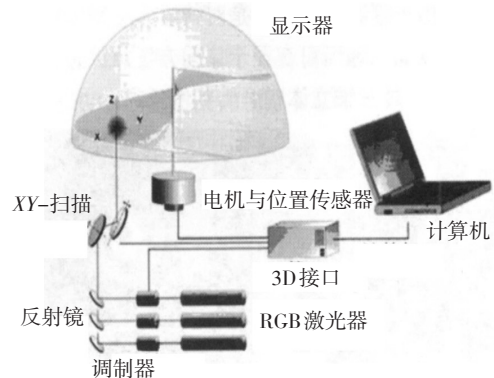


图10 Felix3D系统结构图

多个这样的空间像素就可以构成一个立体物体。

美国的 Actuality 公司推出的 Perspecta 立体显示器是旋转扫描式显示技术领域的代表作。结构图如图 11。Perspecta 显示器是由旋转屏幕和空间投影仪组成。投影仪以 500 帧/s 的速度将物体的图像投影到高速旋转(一般在 600 rpm 左右)的屏幕上,根据视觉的暂留效应,人们就可以在屏幕周围观看到立体效果。Perspecta 显示的整个图像由 198 个分辨率为 768×768 像素的二维图像片段组成,每个直径为 10 inch 的图像包含了 1 亿个“像素卷”并且可以在任意角度观看。但是由于 Perspecta 显示器还存在显示颜色少(只能显示 8 种颜色),亮度和对比度有待提高等问题,所以大面积的普及还需要一定的时间。而且对安置平台的平稳程度要求很高,不能应用于航空、航海等。

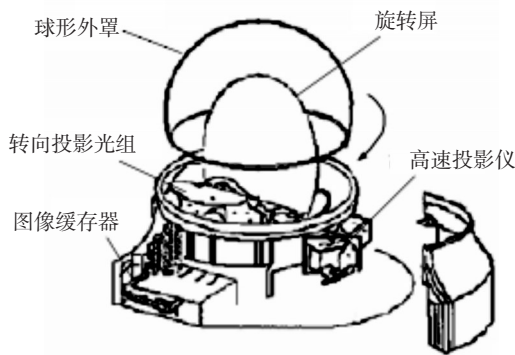


图 11 Perspecta 结构图

2.4.2 体积式

在旋转扫描式技术中,旋转屏幕有很多技术缺陷,并且还存在隐藏区域,于是 Felix3D 公司通过改进而提出的 SolidFelix 系统^[45],它是早期的固态体积式立体显示,原理图如图 12。它具有简洁、高亮度、便于运输等优点。整个装置的核心是用 YLiF₄ 制成的立体型晶体显示介质,用两个红外激光(波长分别是 840 nm 和 1 480 nm)系统来形成立体图像,每一个系统都包含一个光电调制单元和两个扫描器,通过计算机控制,两个红外光相交汇聚足够的能量,激发介质发出可见光,形成一个可见的空间像素点。常用的介质有固体、气体、液体三种,如使用 780 nm 波长激光激励铷气体跃迁到中间能级,使用 630 nm 波长的激光激励铷气体从中间能级再跃迁到高能级^[46],此外,Lewis 等人使用涂有重金属氟化物的介质^[47]。在显示介质内迅速移动空间像素点就可以形成立体

图像,所有成像的部件必须用计算机中的软件同步化处理。这种技术的缺点是成本高、维护难度大、色彩单调。

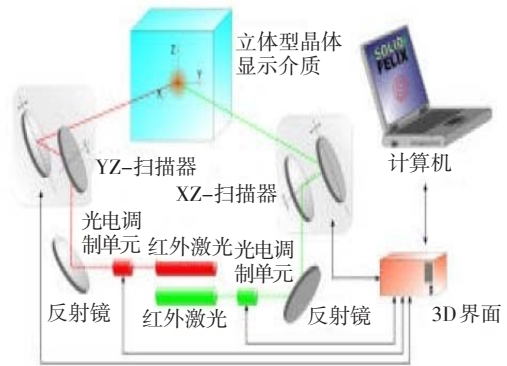


图 12 SolidFelix 系统结构图

LightSpace Technologies 公司推出的 DepthCube 系统^[48]是固态体积式立体显示的代表作。显示体由 20 个聚合物分散型液晶材料制成的液晶屏层叠而成,每个屏的分辨率为 1 024×748,屏与屏之间的距离为 5 mm。始终保持只有一个液晶屏是不透明的,其他为透射状态,基于漫反射原理,通过在这 20 个屏上快速地切换显示三维物体的图像切片从而产生立体感。结构示意图如图 13。它还采用了一种名为“三维深度反锯齿”的显示技术来扩大这 20 个屏所能表现的纵深。

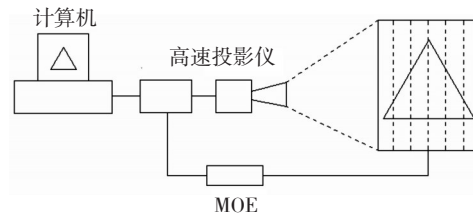


图 13 DepthCube 系统结构图

3 立体显示技术的发展

在立体显示技术一百多年的发展过程中,头戴式的立体显示技术在原理、技术方面都很成熟,也有大量的商业产品,但是由于需要佩戴设备,始终不方便;并且由于它仅仅依赖于双目视差原理,当显示的物体前后尺寸和显示屏的尺寸、观看者到显示屏的距离相差不大时,长时间使用后用户会感到头晕,也不适合儿童和特殊人群。所以无需佩戴设备的自由立体显示技术是未来发展的必然趋势。但自由立体

显示技术还不成熟,仅有少数被小批量的商业应用。

现阶段这些技术具有百家争鸣、百花齐放的特点,各有各的使用场合。光栅式立体显示技术存在的技术难点是左右视差图像不能完全分开,用户的观看区域受到限制,但是该技术成本较低、结构简单、体积小,适合单用户并且运动范围较小的场合,该技术特别适合飞机座舱和个人计算机使用,在这些方面将得到发展。通过在传统的自由立体显示系统中添加各种光栅的灵活组合式结构可以提高立体显示效果,如减小串扰、增大视场角、增大显示亮度、消除莫尔条纹和提供更全面的三维信息等。在当今透镜阵列的制作存在一定困难的情况下,基于这两种光栅的简单叠加就可以构成大面积、参数均匀、价格低廉的新型透镜阵列,亦可实现全视差自由立体显示,这对于推进全视差自由立体显示技术的发展具有重要意义。

集成成像技术和体显示技术还处于实验阶段,距离大规模的推广和应用还有一段距离。受硬件设备及集成成像系统本身的限制,其性能也受到了制约。近年来,许多研究者通过对集成成像三维显示技术理论的探索和研究,提出了多种提高系统性能的方法,使得再现三维立体图像的质量有了明显的改善。下一步的研究方向仍然是改善硬件和提高成像质量。

数字全息式还处于实验阶段,在算法和硬件上将会有所突破。

在未来应加快立体显示有关的标准的制定,推动立体显示的快速发展。相信在不久的将来,人们将会看到一个技术更加成熟的立体显示。

参考文献

- [1] Cho M, Daneshpanah M, Javidi B. Three-dimensional optical sensing and visualization using integral imaging [J]. Proc. IEEE, 2011, 99(4):556-575.
- [2] Kang H, Roh S D, Baik I S, et al. A novel polarizer glasses-type 3D displays with a patterned retarder [J]. Sid Symposium Digest of Technical Papers, 2010, 41(1):1-4.
- [3] Reike I, Riemann B. Three-dimensional multi-view large projection system [C]// Proc of SPIE, 2005, 5664:147.
- [4] 王琼华,梁栋,宋呈群.助视立体显示技术概述[J].真空电子技术,2011,5:7-10.
- [5] Hong H. Reduction of spatially non-uniform 3D crosstalk for stereoscopic display using shutter glasses [J]. Displays, 2012, 33(3):136-141.
- [6] 王琼华,王爱红.三维立体显示综述[J].计算机应用,2010,3:579-581.
- [7] TAO Yu-hong, WANG Qiong-hua, GU Jun, et al. Autostereoscopic three-dimensional projector based on two parallax barriers [J]. Optics Letter, 2009, 34(20):3220-3222.
- [8] Eichenlaub Jesse, Hutchins Jamine. Auto-stereoscopic projection displays [A]. In Proceedings of SPIE[C], San Jose, CA, USA, 1995:48-55.
- [9] WANG Qiong-hua, HUAN Deng, JIAO Tian-tian, et al. Imitating micro-lens array for integral imaging [J]. Chinese Optics Letter, 2010, 8(5):512-514.
- [10] Son J Y, Choi Y J, Ban J E, et al. Multi-view Image Display System [P]. U.S. Patent, 6606078.2003.
- [11] Son J Y, Saveljev V V, Javidi B, et al. A method of building pixel cells with an arbitrary vertex angle [J]. Optical Engineering, 2005, 44:024003.
- [12] XIE Hong-bin, ZHAO Xing, YANG Yong. Cross-lenticular lens array for full parallax 3-D display with crosstalk reduction [J]. Science China Technological Sciences, 2012, 55(3):735-742.
- [13] 王琼华,王爱红.三维立体显示综述[J].计算机应用,2010,3:579-581.
- [14] Choi K, Kim J, Lim Y, et al. Full parallax viewing-angle enhanced computer-generated holographic 3D display system using integral lens array[J]. Optics Express, 2005, 13(26):10494-10502.
- [15] Matoba O, Tananka M. Digital holographic measurement and phase reconstruction of 3D object based on wave front data [J]. 3D Research, 2011, 2:031.
- [16] ZHANG Yan, Pedrini G, Osten W, et al. Reconstruction of in-line digital holograms from two intensity measurements [J]. Optics Letter, 2004, 29(15):1787-1789.
- [17] Haddad W S, Cullen D, Sclem J C. Fourier-transform holographic microscope [J]. Applied Optics, 1992, 31(24):4973-4978.
- [18] Sherif H, Naydenova I, Martin S, et al. Characterization of an acrylamide-based photopolymer for data storage utilizing holographic angular multiplexing [J]. Journal of Optics, 2005, 7(5):255-260.
- [19] ZHANG Yan, Pedrini G, Osten W, et al. Whole optical wave field reconstruction from double or multi in-line holograms by phase retrieval algorithm [J]. Optics Express, 2003, 11(24):323-3241.
- [20] Joyeux D. X-ray holographic microscopy at LURE and institute d'Optique[C]// Proc of SPIE, 1992, 1741:62-77.
- [21] Matasushima K, Kondoh A. Wave optical algorithm for cre

- ating digitally synthetic holograms of three-dimensional surface objects[C]// Proc of SPIE, 2003, 5005:190-197.
- [22] Li Y, Abookasis D, Rosen J. Computer-generated holograms of three-dimensional realistic objects recorded without wave interference [J]. Applied Optics, 2001, 40(17):2864-2870.
- [23] Namias V. The fractional Fourier transform and its application in quantum mechanics [J]. IMA J. Appl. Math., 1980, 25(3):241-265.
- [24] Lohmann A W. Image rotation, wigner rotation and the fractional Fourier transform [J]. J. Opt. Soc. Am. A, 1993, 10(10):2181-2186.
- [25] Choi K, Kim H, Lee B. Synthetic phase holograms for auto-stereoscopic image displays using a modified IFTA[J]. Optics Express, 2004, 12: 2454-2462.
- [26] Paturzo M, Memmolo al. Synthesis and display of dynamic holographic 3D scenes with real-world objects [J]. Optics Express, 2010, 18(9):8806-8815.
- [27] Huebschman M L, Munjulur I B, Garnerh R. Dynamic holographic 3D image projection [J]. Optics Express, 2003, 11:437-445.
- [28] Choi K, Kim J, Lim Y, et al. Full parallax viewing-angle enhanced computer-generated holographic 3D display system using integral lens array [J]. Optics Express, 2005, 13(26):10494-10502.
- [29] Gopinathan U, Monaghan D S. A projection system for real world three-dimensional objects using spatial light modulators [J]. Journal of Display Technology, 2008(4):254-261.
- [30] Min S W, Jung S, Park J H, et al. Three dimensional display system based on computer-generated integral photography [C]// Proc of SPIE, 2001, 4297:187-195.
- [31] Jang J S, Javidi B. Improved viewing resolution of three-dimensional integral imaging by use of non-stationary micro-optics [J]. Optics Letter, 2002, 27:324-326.
- [32] Jung S, Park J H, Choi H, et al. Wide viewing integral three-dimensional imaging by use of orthogonal polarization switching [J]. Applied Optics, 2003, 42:2513-2520.
- [33] Kin Y, Park J H, Choi H, et al. Viewing-angle-enhanced integral imaging system using a curved lens array [J]. Optics Express, 2004, 12:421-429.
- [34] Kim Y, Park J H, Min S W, et al. A wide-viewing-angle integral 3D imaging system by curving a screen and a lens array [J]. Applied Optics, 2005, 44:546-552.
- [35] Jang J S, Jin F, Javidi B. Three-dimensional integral imaging with large depth of focus by use of real and virtual image fields [J]. Optics Express, 2003, 28:1421-1423.
- [36] Park J H, Jung S, Choi H. Integral imaging with multiple image planes using a uniaxial crystal plate [J]. Optics Express, 2003, 11:1862-1875.
- [37] Jung S, Hong J, Park J H, et al. Depth-enhanced integral-maging 3D display using different optical path lengths by polarization devices or mirror barrier array [J]. J. Soc. Inform. Display. 2004, 12:461-467.
- [38] Arai J, Okui M, Yamashita T, et al. Okano (2006) Integral three-dimensional television using a 2000-scanningline video system [J]. Applied Optics, 45:1704-1712.
- [39] Isono H, Yasuda M, Takemori D, et al. 50-inch auto-stereoscopic full color 3D TV display system [A]. In Proceedings of SPIE[C]. San Jose, CA, USA, 1992:176-1851.
- [40] Kim Y, Kim J, Kang J M, et al. Point light source integral imaging with improved resolution and viewing angle by the use of electrically movable pinhole array [J]. Optics Express, 2007, 15:18253-18267.
- [41] Liao H, Dohi T, Iwahara M. Improved viewing resolution of integral videography by use of rotated prism sheets [J]. Optics Express, 2007, 15:4814-4823.
- [42] Liao H, Iwahara M, HATA N, et al. High-quality integral videography using a multiprojector [J]. Optics Express, 2004, 12:1067-1076.
- [43] Kin Y, Hong K, Lee B. Recent researches based on integral imaging display method [J]. 3D Research, 2010, 1(1): 17-27.
- [44] Langhans K, Bahra D, Bezecnya D, et al. Felix 3D Display: an interactive tool for volumetric imaging [C]// Proc of SPIE, 2005, 3805:22-31.
- [45] Langhans K, Guill C, Rieper E, et al. Solid Felix: a static volume 3D-laser display [C]// Proc of SPIE, 2003, 5006: 161-782.
- [46] Korevaar E, H akakha H. Three-dimensional volumetric display in rubidium vapor proceedings of SPIE [C]// San Jose, CA, USA, 1996:274-2841.
- [47] Lewis J D, Verber CM, McGhee R B. A true three-dimensional display [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 1971, 18 (9):724-7321.
- [48] Favalora G E. Volumetric 3D displays and application infrastructure[C]// Computing & Processing (Hardware/Software), IEEE Computer Society, 2005, 38 (8):37-44.