

自由立体显示技术的研究综述^①

胡素珍¹, 姜立军², 李哲林², 谭 军²

¹(华南理工大学 机械与汽车工程学院, 广州 510640)

²(华南理工大学 设计学院, 广州 510640)

摘要: 自由立体显示技术目前大多处于研发阶段, 主要应用在商业和娱乐行业, 并未大规模推广使用. 从技术上来看, 自由立体显示可以分为光屏障式技术、柱状透镜技术和指向光源技术等. 自由立体显示技术的最大优势是摆脱了立体眼镜的束缚, 但是在分辨率、可视角度和可视距离等方面还存在着很多不足之处. 主要介绍了立体显示的基本原理、立体显示技术的种类和各类型的立体显示技术中存在的优缺点, 并重点介绍了几种自由立体显示技术的实现方式.

关键词: 立体显示; 自由立体显示; 超多眼式; 电子全息; 计算机全息合成; 记录面

Overview of Autostereoscopic Display Technology

HU Su-Zhen¹, JIANG Li-Jun², LI Zhe-Lin², TAN Jun²

¹(School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

²(School of Design, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Autostereoscopic display technique currently is in development stage. And it mainly is used in the commercial market and entertainment industry, so it is not used on a larger scale. From a technical point of view, free stereoscopic display can be divided into light barrier technology, cylindrical lens technology and point light source technology etc. Autostereoscopic display's biggest advantage is to get rid of the shackles of glasses. But there are many deficiencies in the resolution, visual angle and visual distance. This paper introduced the stereoscopic display technology and the advantages and disadvantages of various types of stereoscopic display technology in existence and the basic principle of stereo display. And it also introduced several freestereoscopic display technology and its implementation.

Key words: stereoscopic display; autostereoscopic display; super mulit-view; electroholography; computer gengated hologram; recorded plane

1 引言

自由立体显示技术是指观察者不需要佩戴任何观察设备就可以直接观看 3D 立体图像的技术^[1], 相对于传统的立体显示技术, 自由立体显示技术是直接以双眼观看立体影像的技术. 众所周知, 传统的立体显示技术所显示的影像有很好的三维效果, 然而观察者在观看三维影像的时候佩戴辅助工具, 做其他与屏幕无关的工作都十分不便. 除了这一原因外, 最主要的原因在于, 一般人面对不习惯的接口方式, 常常会导致一些潜在的人因问题. 以头盔式显示器为例, 有研究报告指出, 长时间佩戴头盔式显示器会导致头晕、恶

心、呕吐等现象^[1]. 因此配戴眼镜的立体显示技术, 尽管其显示效果特别优良, 但是在许多场合是不适用的.

自由立体显示技术是直接以双眼观看立体影像的技术, 采用左右影像插排融合技术, 直接以双眼观看便有立体深度的效果. 自由立体显示技术在观看图像的时候无需佩戴眼镜等辅助工具, 且能与其他二维显示器相互兼容.

2 历史发展和使用现状

自由立体显示技术因其独特的性能受到一些国家

① 收稿时间:2014-03-24;收到修改稿时间:2014-04-21

的广泛关注,以日本、德国、美国为代表的国家从 20 世纪 80 年代开始着手该技术的基础研究,并随后的 90 年代陆续获得成果并开始应用.自由立体显示技术的主要应用形式是自由立体显示器.在许多场合,采用传统的立体显示技术,在工作和操作难度等方面存在着缺陷,而这时采用自由立体显示技术是十分必要且紧迫的.

自由立体显示技术可以用于一些主要方面:军事、医疗、数据可视化、工程、娱乐(视频游戏、影视动画)、虚拟商务贸易、教育等.数字图像技术及计算机和图形卡等数字图像处理硬件已经相当发达,数据处理速度已经非常快,三维图像信息处理已经变得容易了.采用立体图像的原因在于与通常的二维图像相比,自由立体显示器能显示深度信息,因而能更正确的认识事物的形状和运动情形,其结果是获得了身临其境的感觉,且相对于传统的立体显示技术而言,它的使用更加灵活方便.下面就自由立体技术在各领域中的使用做简单介绍.

2.1 军事领域

自由立体显示技术发展与其在军事领域的重要应用是分不开的.它可以应用在国防军事飞行模拟、军事演习、武器操控、宇航探测、太空训练等方面,例如在飞行模拟中大量使用立体显示系统,与实际驾驶飞机飞行相比,要经济的多.而且可以通过设定各种条件在短时间内学到丰富的经验.DIT(Dimension Technologies Inc.)在这一领域表现的十分出色,它在 1993 年为美国 Wright-Patterson 空军基地研制了驾驶座舱自由立体显示器,主要用于飞行员的模拟训练.1994 年为 NASA(美国国家航空航天局)设计并制造了全动态全系 3D 显示器.1995 年 DTI 立体显示器被用于遥控机器人设备中,这些设备一般用于处理放射性废料、深层采掘等危险领域.1998 年‘DTI2018XL18’3D 显示器被 NASA 采纳为虚拟诊断系统的显示设备.1999 年到 2000 年,DTI 赢得了为美国海军开发高清晰度投影系统的合同,这一系统主要用于模拟飞行^[2].

具体的军事应用还包括潜水艇的水下领航显示、卫星图像分析、座舱/控制显示、夜视侦查、数字化沙盘、飞行模拟、作战模拟训练、风洞试验、航空图像学、图像地理学、痕迹分析(如弹痕)、物证分析对比、夜晚监控、红外监视等^[2]

2.2 医疗领域

X 射线 CT(Computed Tomography)和 MRI(Magnetic Resonance Imaging)给医疗领域的图像诊断技术带来了划时代的变革,使得在医疗诊断中可以利用三维数据.但是由于显示装置还是二维的,无法产生纵深感,病症形状的正确把握仍然很难,因而对立体显示器的潜在需求很大,许多国家和地区现在正在全力以赴的进行这方面的研究和开发.立体显示器在医疗领域的应用包括内窥镜图像显示、眼科学、体内成像、体内造影、外科手术模拟训练、虚拟人体技术、蛋白质、DNA 分子模型显示、所有类型的立体显微镜、医学教学等,它可以作为手术支援设备使手术过程更准确,作为诊断设备使诊断结果精度更高,以及作为现场教学设备使教学更直观.

2.3 数据可视化领域

当前人们需要理解的数据量越来越庞大,数据可视化方便了人们对获得的数据的理解.甚至在有些情况下,缺少了数据可视化技术,人们理解获得的数据变得不可能.传统的二维平面显示丢失了纵深感,是的数据可视化的巨大作用没有得到充分发挥.有了自由立体显示器,人们更加灵活、深刻的理解数据信息.在建模方面,数据可视化极大地帮主研究人员理解模型的各种详细信息.在蓬勃发展的生命科学方面,染色体结构非常复杂,有了数据的立体可视化,科学家们能更好的深入研究生命的奥秘.

2.4 教育文化娱乐领域

立体显示技术在教学中可用于提高学习效率.例如在帮主中小学生学习理解图形、平面等空间概念知识或者物理现象之类的原理时,利用立体图像要比利用二维图像的认识程度高,理解程度深.我们可以把平时难得一见的高价美术作品、工艺品、文物等制成立体图像节目,通过自由立体显示器展现给观众.展示贵重物品时,安全保卫是个很大的问题,其举办管理费用很高,因而相当多的人无法亲眼目睹,用立体显示的技术可以使这些贵重物品广为公开.此外,如果有了自由立体显示系统,就能让很多人方便的及时的看到具有立体感的艺术品,这对于没有接触过艺术品的孩子来说,是一种特别有效的欣赏教育手段.

立体电影的震撼效果使观众久久不能忘怀,自由立体电视的出现是我们在家中就可以观看立体电影及

电视节目. 另一方面, 自由立体显示使传统的三维游戏的精美画面和身临其境的感觉发挥到了极致. 随着自由立体显示技术的发展和生产成本的降低, 其在娱乐领域蕴含着巨大的商机.

3 立体显示技术

人们之所以看到现实世界是立体的, 是因为现实世界给人的双眼提供了两张具有差别的图像, 也就是形成立体视觉所需要的视差如图 1 所示. 对于平面物体, 因为它提供给双眼的图像是一致的, 所以没有“景深”视觉感受.

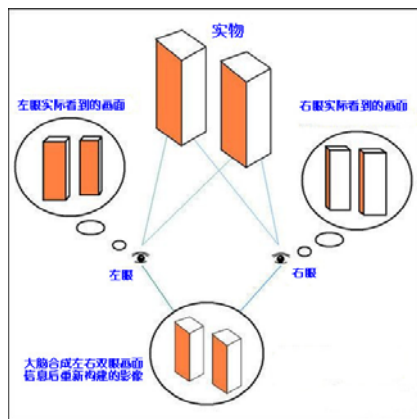


图 1 立体成像原因

3.1 立体显示原理

立体显示技术就是采用类似的原理, 将具有左右眼视差的立体图片对分别提供给左右眼, 使左右眼看到不同的图像, 然后经过视神经中枢的融合, 以及视觉心理反应, 生成三维立体效果.

3.2 几种立体显示技术

立体显示技术的分类和优缺点如下表 1 所示.

表 1 立体显示技术及其优缺点(用三线表)

立体映像的表示方法		优点	缺点
两眼式	眼镜式 (互补色、偏振光、时分割等)	1、原理简单, 容易实现; 2、数据量小; 3、容易实现动画; 4、容易与 HMD 对应.	1、辐辏与焦点调节不一致. 2、需要佩戴特殊眼镜; 3、不能表示运动视差, 当观察者移动时, 运动视差变化困难.
	裸眼式	1、不需要戴眼镜;	1、辐辏和焦点之间

	(视差屏障、柱状透镜等)	2、能实现动画.	的调节不一致; 2、提高分辨率比较困难; 3. 视差屏障式不能表示垂直视差.
	多眼式	1、不需要带眼镜; 2、能实现动画; 3、能表示运动视差.	1、辐辏和焦点调节不一致; 2、提高分辨率困难; 3、试场屏障式不具有垂直视差.
	超多眼式	1、不需要戴眼镜; 2、辐辏和焦点调节一致.	1、装置复杂; 2、数据量大.
	光波面再生式	1、不需要戴眼镜; 2、接近实物视觉; 3、能表示垂直视差.	1、动画表示困难; 2、数据量太大; 3、需要高分辨率材料.
	深度信息表示法 (深度方向垂直断面采样法) Depth-Fused 3-D DFD	1、不需要到戴眼镜; 2、数据量相对较少.	1、需要表示在多个平行平面上; 2、表示照片困难.
	体积扫描法	1、不需要带眼镜; 2、接近实物的观察效果.	1、遮挡困难; 2、表示照片困难.

立体眼镜方式是观察者利用眼镜这一辅助设备、根据眼镜的光学特性, 分离出左右眼图像, 使得进入人们左右眼睛里面的图像不同而产生立体效果.

根据眼镜的光学特性, 立体眼镜又可以分为如下种类:

① 互补色技术

互补色技术中左右眼图像分别用红、青两种颜色重叠表达, 观察者在观看的图像的时候佩戴上带有红色和青色滤色片的眼镜即可完成左右眼图像的分离^[3]. 互补色技术是最简单的低成本的技术, 该技术过去只能融像成单色, 目前的技术可以制作其他的颜色信息, 其缺点是在观看立体图像的时候红青滤片会破坏颜色的平衡.

② 偏振光技术

当光线照射在偏振光滤光片上的时候, 只有指定极化方向的偏振光线可以通过滤光片. 此时, 将左右眼图像定义为正交且重叠的直线偏振光, 观察者通过佩戴具有相应极化方向的滤光片的眼镜, 使左右眼图像通过这种镜片分离, 如图 2 所示, 从而实现左右眼

观看到相应的图片,产生立体效果^[3].

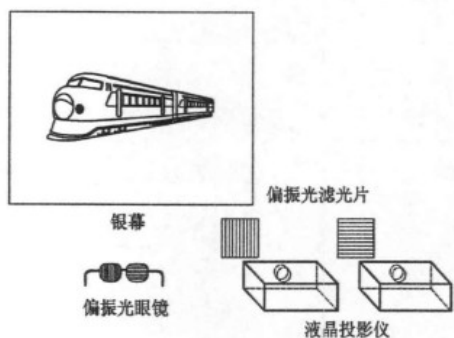


图 2 偏振光方式^[3]

③ 液晶快门技术

以上两种方式属于空间分割方式,而液晶快门技术是采用左右眼图像交替显示的方式来实现的.左右眼图像分别交替显示,同时液晶快门眼镜的左右镜片的快门也相应的打开或者关闭,再通过红外线接收器将所显示的左右眼图像传输给快门,以控制左右眼图像分别进入相应的眼睛中来,从而实现左右眼图像在时间上的分离,以产生立体效果^[3].如图 3 所示.

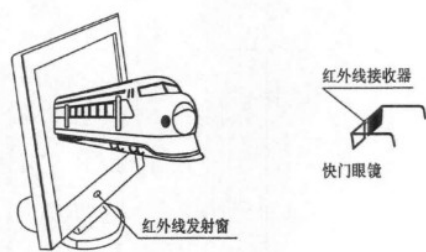


图 3 液晶快门技术^[3]

4 自由立体显示技术

自由立体显示技术有多种,(不要出现第一人称)主要介绍一些常用的技术原理.

4.1 两眼式自由立体显示技术

4.1.1 视差屏障式显示技术

光屏障式技术也被称为视差屏障或者视差障栅技术,是在屏幕表面设置称为“视差屏障”的纵向栅栏状光学屏障来控制奇、偶图像的光线走向,让左右两眼接受不同影像产生视差形成立体视觉效果^[4].如图 4 所示.该方法结构简单,只需根据显示屏像素的大小,设计相应的挡板间距和狭缝宽度即可,但是需要保证

显示面、挡板和眼睛的位置关系,为了获得明显的立体效果,要适时调整图像和视差挡板的位置.

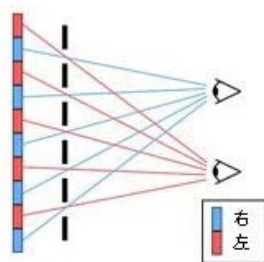


图 4 光屏障式技术立体显示原理

光屏障式的原理与概念虽然简单,但是也存在着不足之处,主要包括:

- ①由于线条遮障的遮蔽作用,使得影像亮度大为减小.
- ②光滑的透明挡板会导致光反射,使得影像看不清楚.
- ③融合影像与线条遮障之间若稍微有倾斜,则容易导致斜纹效应,因此在融合影像的设计与校准上较为困难.

虽然光屏障式有这些缺点,但是也并非无法完全克服,随着自由立体技术的发展,光屏障式技术已经成为了自由立体显示的主要技术之一.

4.1.2 柱状透镜技术

柱状透镜技术最大的优势便是其亮度不会受到影响.其技术原理是在液晶显示屏的前面加上一层柱状透镜,使液晶屏的像平面位于透镜的焦平面上,这样在每个柱透镜下面的图像的像素被分成几个子像素,这样透镜就能以不同的方向投影每个子像素^[5].于是双眼从不同的角度观看显示屏,就看到不同的子像素,如图 5 所示.

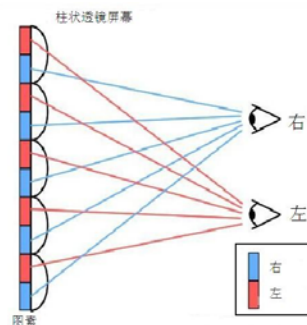


图 5 柱状透镜技术立体显示原理
该方法结构简单,易于实现,且透镜的加工也极

为方便,其关键参数是柱状透镜的节距和曲率.因为柱状透镜不会阻挡背光,因此画面亮度能够得到很好地保障.不过由于它的 3D 显示基本原理仍与视差屏障技术有异曲同工之处,所以分辨率仍是一个比较难解决的问题.

当然该技术也有其缺点,由于柱状透镜与液晶屏固定安装在一起,因此只能用于单一的立体显示,无法兼容平面显示,因相关制造与现有 LCD 液晶工艺不兼容,需要投资新的设备和生产线.

4.1.3 指向光源技术

指向光源技术即线光源照明法是美国 DTI 公司的专利,它是自由立体显示技术中研究最早的一种技术.利用视差照明实现立体显示的原理是:其立体显示器在 LCD 的像素层后使用一系列并排的线状光源给像素列提供背光照明,线光源宽度极小并与液晶屏的列像素平行^[6].密集的线光源照明使奇、偶列像素的图像传输路径分离,使左、右眼看到对应的画面,从而产生立体效果.如图 6 所示.

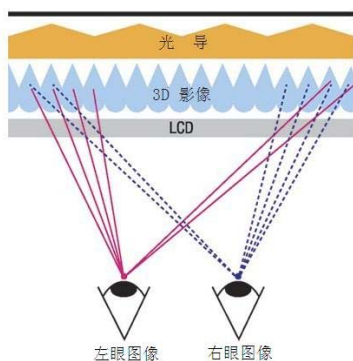


图 6 指向光源技术

视差照明亮线的形成是实现视差照明技术的关键.视差照明技术的亮线有如下几种实现方式:

- ① 运动多光源,再用透镜聚焦形成很细的亮线;
- ② 运用单或者双光源,再利用光导传光、透镜汇聚形成很细的亮线;
- ③ 运用微加工技术制作不同的狭缝实现很细的亮线;
- ④ 用液晶阀的旋光性和偏振片配合形成很细的亮线.

该技术具有实现二维与三维显示模式转化的功能.该技术只能使用透射式的显示源,现在的液晶屏最符合条件.液晶屏的性能指标是对指向光源显示技术的

限制条件.

4.2 多眼式自由立体显示

多眼式自由立体显示的原理是将观看区域分割为多个水平窗口,每个区域窗口只能显示一副图像,观察者在观看的时候,每只眼睛分别看到的是一副不同的图像,而且当观察者头部移动的时候图像会发生相应的改变^[6].这就要求观察者在移动头部或者眼睛的时候要从一个窗口跳跃到另外一个窗口,如此,才能用少量的视图来提供立体视差和水平的移动视差.

多眼自由立体显示优点是观察者可以在可视区域内自由的观看,在移动头部或者眼睛的同时仍然可以观看到连续的立体图像;缺点是其图像的建立比较复杂;为可以多人同时观看而对其观察范围的要求较高;在该技术中视图个数较多,随着立体视角的增加,其图像的分辨率会相应的变小.

图 7 所示为 16 视图的立体显示,该显示技术允许多个观察者在规定的区域内移动位置的时候仍然能感受到立体效果.并且,只要位置合适,不管观察者怎么移动头部,都可以利用一个简单的头部跟踪器观看到完整的图像.该技术的难点是建立多视图,为了减少拼接时视图间的失真,要求视图的数目不能太多,且多视图之间要保留一定的重合区域,因此,该技术目前很难达到人眼的接近 180° ^[6].

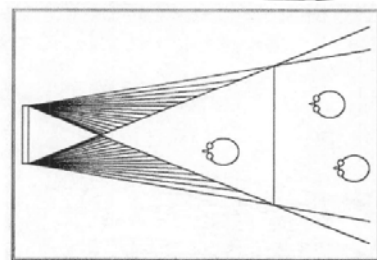


图 7 多眼式自由立体显示

图 8 所示为八眼式柱状透镜立体显示方式.该方法是在显示器前面装置多条柱状透镜,通过光的折射来实现的立体显示技术.一共由八台摄像机拍摄的具有视差的图像被分为两组,然后由两台液晶投影仪将这两组图像投影到屏幕上.并通过技术调整,使第二台摄像机所得图像的像素插入到第一台摄像机所得图像的像素和像素之间,最终使八台摄像机所得的图像以像素的列为单位重新排列显示到屏幕上.屏幕前方的柱状透镜的一个透镜与一组八个像素的像素列相对应,根据设计要求,图像的像素可以呈现到特定的观

看距离的面上。如此一来，在观看位置的某一个位置就只能看到某一列像素而看不到其他像素，而当横向移动观看位置的时候，看到的又是另外的图像的像素，以此类推，就实现了各列像素的分离，在指定的观看范围内，无论在那个位置，观察者都能观看到连续的图像，形成连续的立体效果^[6]。

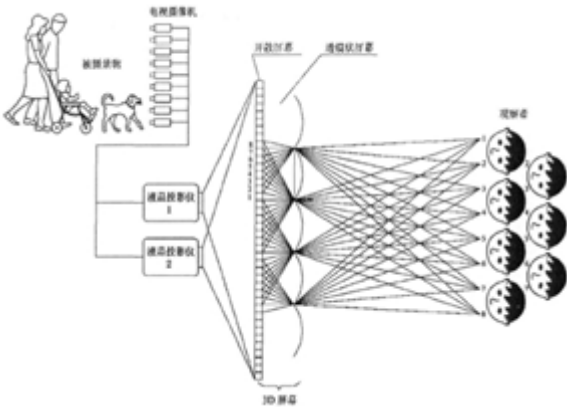


图 8 八眼式柱状透镜自由立体显示方式

4.3 超多眼式自由立体显示

超多眼式技术是在多眼式技术上的延伸，在多眼式立体显示中，分别只有一个左右眼视图进入到人的左右眼中，而在超多眼显示中，将有复数个左右眼图像进入到观察者的左右眼中，并结合正在观察的图像进行焦点调节。在超多眼技术中，将代表图像的视点间隔设置为比两眼瞳孔直径更下的距离。是两个以上的视点进入到单只眼镜的瞳孔中，也即使通过空间某一个点的光线有两条或者以上进入人的眼睛，因为人的瞳孔直径大约在 5mm 左右，所以复数个视差图象的间隔应该小于 2mm^[7]。如图 9(a)所示。

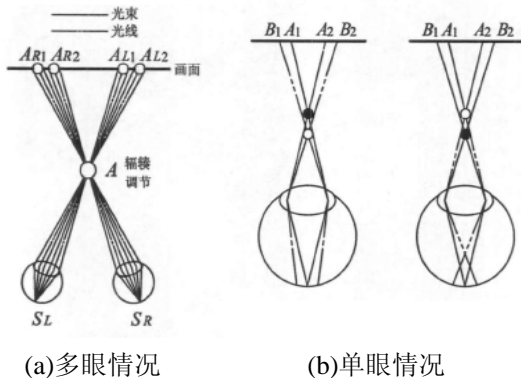


图 9 超多眼及单眼方式

在观察超多眼立体图像时，在调整立体效果时，焦点调节可能不在画面上，如此一来，避免了焦点调

节和辐辏的不一致的问题，缓解了视觉疲劳的问题。图 9(b)所示为人单眼观察两个视差图像时候的情况，当人的眼睛聚焦在 A 点的时候，B 点会出现聚焦错位的情况，同样，当人眼聚焦在 B 点的时候，A 点会出现聚焦错位的情况，如此，就可以避免了观看时的多重像的问题。

4.4 头部跟踪显示

头部跟踪显示的基本原理是通过跟踪观察者头部的位置来调节具有视差的左右眼图像，使其显示在合适的显示区域，以防止产生立体幻觉。目前存在的大量头部跟踪的技术如：电磁跟踪功能、红外线跟踪功能、摄像头跟踪功能等解决了这一问题^[8]。但是头部跟踪还必须要严格防止跟踪滞后的问题，以防止观察者注意到头部跟踪的存在。

立体监控器跟踪头部运动，将头部运动信息反馈给计算机，计算机根据头部位置或者眼睛位置，透镜组根据接收到的位置信息计算出此时应该看到的图像和图像应该显示的区域位置，将图像显示偏振到相应的位置，此时显示单元显示相应的图像。如果确定了观察者头部和眼睛的位置，那么合适的图像就能显示在合适的显示区域，保持左右眼能看到连续的不同图像，这样就可以让观察者观看到正确的立体图像。

4.5 全息式自由立体显示

全息技术是利用再生光线的波面，将视差图呈现给观察者，所以，该技术也称为光波面再生技术。是将物体反射光完全再现的一种方式。目前，作为可以同时供多人观看的立体显示电视方式，成为一个活跃的话题。

4.5.1 全息的基本概念

全息的基本概念包括全系信息的输入、传输、表示。

①全息的输入

输入是以实际存在的物体为客观对象，通过物体反射的散乱光作为参考光制作干涉条纹，通过 CCD 相机对干涉条纹的输入变换成电子信号，然后通过光学的方法制作全息。

②信息的传输

电子信号以 NTSC 等方式制作后再传送。为了应对巨大的全息信息量，还要使用到信息的压缩技术。传送出去电子信号，由高精细的表示装置输出，然后根据再生光生成直接的三维图像。

③全息的表示方法

表示全息信息的设备要使用高分辨率的空间光变调器。目的是为了为了更好的表示全息的干涉条纹。目前使用的有音响光变调器、液晶光变调器和微小反射镜设备等。

4.5.2 全息表示的原理

①全息的记录和再生

根据菲涅尔关于全息的记录和再生的设想,如图 10 所示,激光在 HM 上被分成了两个方向,一个光束到达了物体的表面,经过反射后到成为了球面光然后到达记录面(物体光)。另外一束光成为了同样的波到达了记录面(参考光)。在记录面上面,引起了干涉,产生了干涉条纹^[9]。此时,如果在记录面上附着上感光剂,就能拍摄到干涉条纹。这种记录条纹的方式称为全息。

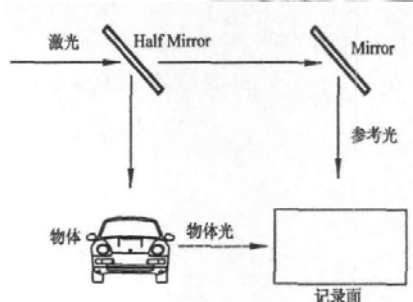


图 10 菲涅耳全息记录原理

②计算机合成全息

计算机合成全息的操作图 11 所示,通过强力激光,在计算机中干涉物体波和参考波,通过计算机的数值计算和信息处理将虚拟的物体变成全息信息,即采用电子的方法摄影。

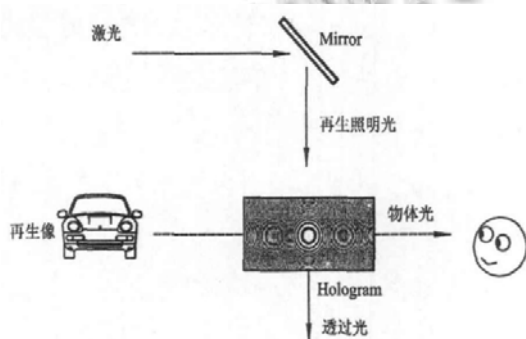


图 11 全息的再生

其制作方法跟光学全息的制作方法相同:将从空间点出发的物体波和参考波在指定平面上干涉,所得

的干涉条纹即为全息。因为全部处理都是在计算机中来完成,所以此方法有以下优点:因为拍摄时不需要激光,所以就可以避免激光的动力和相干性影响;不需要考虑像光学全息一样的减震;因受光噪音的影响小;其再生过程可以由计算机模拟出来。

由于立体显示技术正处于飞跃的发展阶段,并且目前计算机的处理能力也非常强大,全息立体电视技术作为优秀的立体显示技术正逐渐被世人重视,目前被认为是终极的立体显示。

参考文献

- 1 王飞,王晨升,刘晓杰.立体显示的原理、体视因素和术语.工程图学学报,2010,5:69-73.
- 2 郭乃林,王建辉.军事训练想定中的三维航迹仿真模型.系统仿真学报,2002,14(4):534-535.
- 3 孙超.几种立体显示技术的研究.计算机仿真,2008,25(4):213-217.
- 4 张宗福.基于裸眼 3D 技术的数码相框.计算机系统应用,2014,23(5):235-240.
- 5 王元庆.光栅式自由立体显示器光学构成的理论研究.现代显示,2003,(3):29-32.
- 6 Hill L, Jacobs A. 3-D liquid crystal displays and their applications. Proceedings of the IEEE, 2006, 94(3): 575-590.
- 7 3D 显示器离我们有多远. <http://www.cce.com.cn/diy/gaoshou/200708/20070806172754.html>.
- 8 新技术应用广泛 立体显示颠覆平面视界. <http://it.sohu.com/20070413/n249414039.shtml>.
- 9 罗鹏,吕晓旭,钟丽云.数字全息技术研究进展及应用.激光杂志,2007,27(6):8-10.
- 10 王淑仙.基于单片 DMD 的裸眼立体显示系统研究[博士学位论文].上海:华东师范大学,2007.
- 11 Meesters LMJ, Jsselsteijn WA, Seuntjens PJH. A survey of perceptual evaluations and requirements of 3-dimensional TV. IEEE Trans. on Circuits and Systems for Video Technology, 2004, 14(3): 381-391.
- 12 Relkeand I, Riema B. Three Dimensional Multiview Large Projection System. Proc, SPIE, SPIE-Int, ISoe.for OPTical Eng, 2005, 5664: 167-174.
- 13 王元庆.基于 LCD 的自由立体显示技术.液晶与显示,2003,18(2):116-120.
- 14 宋世军,王琼华,李大海,赵仁亮,张超.变焦纳米液晶透镜的

- 体三维立体显示器的初步研究.现代显示,2008,(83/84):63-65.
- 15 郝敦博,李大海,王琼华,周磊,方恩博,张浩.柱面透镜自由立体显示器的分辨率损失研究.液晶与显示,2008,23(4):484-498.
- 16 张兆杨,安平,刘苏醒.3D多视点立体显示及其关键技术.电子器件,2008,31(1):303-307.
- 17 张晓媛,黄红梅,魏臻.LED显示屏的裸眼立体影像研究.天津理工大学学报,2006,22(6):20-22.
- 18 熊显涛,王业权.LED立体显示器的设计.机电产品开发与创新,2008,21(3):63-65.
- 19 李莉,李玉峰,沈春林,龚华军,杨忠.基于数字微镜的旋转体三维显示装置研究.仪器仪表学报,2008,29(1):67-72.
- 20 梁发荣.彩色立体显示关键技术研究[博士学位论文].合肥:合肥工业大学,2005.
- 21 Dual Lenticular-Lens Based 2D/3D Convertible Autostereoscopic Display. <http://www.hatsushiba.com.tw/EDM/june2008/3dtext/3Dtext3-5.pdf>.
- 22 Mobile3DTV. <http://sp.cs.tut.fi/mobile3dtv/>.
- 23 寇志起,沈奕,李永忠,李功军.中小尺寸自动立体显示器结构及视差栅栏设计的研究.现代显示,2007,71:41-44.
- 24 侯春萍,阿陆南,俞斯乐.立体成像系统数学模型和视差控制方法.天津大学学报,2005,38(5):455-460.
- 25 文江涛.光栅立体显示器重影问题的研究[硕士学位论文].合肥:合肥工业大学,2007.
- 26 Hong HK, Park J, Lee SC, Shin HH. Autostereoscopic multi-view 3D display with pivot function using the image display of the square subpixel structure. Displays, 2008, (29): 512-520.
- 27 Kang H, Hur N, Lee S, Yoshikawa H. Horizontal parallax distortion in toed-in camera with wide-angle lens for mobile device. Optics Communications, 2008, 281: 1430-1437.
- 28 Seuntiëns PJH, Meesters LMJ, IJsselsteijn WA. Perceptual attributes of crosstalk in 3D images. Displays, 2005, 26: 177-183.
- 29 Iwasaki T, Kubota T, Tawara A. The tolerance range of binocular disparity on a 3D display based on the physiological characteristics of ocular accommodation. Displays, 2009, 30: 44-48.
- 30 Yano S, Emoto M, Mitsunashi T. Two factors in visual fatigue caused by stereoscopic HDTV images. Displays, 2004, 25: 141-150.
- 31 Yano S, Emoto M, Mitsunashi T. Visual comfort of binocular and 3D displays. Displays, 2004, 25: 99-108.
- 32 王修晖,陆慧娟,林海.多投影显示墙画面校正技术综述.计算机应用研究,2008,25(7):1944-1947.
- 33 孙阳.三维视频的关键技术研究[硕士学位论文].上海:上海交通大学,2008.