

文章编号:1007-2780(2014)03-0441-09

视差自由立体显示中莫尔条纹消除的研究进展

孔令胜*, 刘春雨, 张元, 金光

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所

小卫星技术国家地方联合工程研究中心, 吉林 长春 130033)

摘要: 视差自由立体显示中视差生成元件参数的不合理设定会导致影响三维图像的莫尔条纹产生。因此, 莫尔条纹消除是视差自由立体显示中的关键问题之一。本文简单介绍了 3 种视差自由立体显示原理。综述了视差自由立体显示中的避免莫尔条纹产生和莫尔条纹最小化 2 种莫尔条纹消除技术, 着重介绍了莫尔条纹最小化技术, 包括工程实验、莫尔条纹图像仿真、余弦光栅叠加模型近似分析和序数方程方法和傅里叶分析方法的一致性分析等技术。其中后 2 种技术给出了视差自由立体显示中莫尔条纹最小化的详细理论分析和解释, 并为其其他视差自由立体显示技术提供了设计依据。

关键词: 视差自由立体显示; 莫尔条纹消除; 避免莫尔条纹产生; 莫尔条纹最小化

中图分类号: **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/YJYXS20142903.0441

Progress on removing Moiré patterns in parallax autostereoscopic displays

KONG Ling-sheng*, LIU Chun-yu, ZHANG Yuan, JIN Guang

(National & Local United Engineering Research Center of Small Satellite Technology,
Chuangchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: In parallax autostereoscopic displays, the unreasonably designed device for generating parallaxes can result in moiré patterns, which influence 3D images. Thus, removing moiré patterns is a key problem in the parallax autostereoscopic displays. The paper introduces three principles for parallax autostereoscopic displays briefly. Two removing moiré patterns techniques in parallax autostereoscopic displays are demonstrated and reviewed: avoiding moiré patterns and moiré minimization. Moiré minimization technique is mainly introduced including engineering experiment, simulation of moiré patterns, approximate model of superposition of cosine gratings and technique of consistence between indicial equation method and Fourier theory. The latter two techniques provide detailed theoretical analysis and interpretation about moiré minimization in parallax autostereoscopic displays and supply design basis for other parallax autostereoscopic displays techniques.

Key words: parallax autostereoscopic displays; removing moiré; avoiding moiré patterns; moiré minimization

收稿日期: 2013-11-20; 修订日期: 2013-12-30.

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (No. 2012AA121502)

* 通信联系人, E-mail: kongling@mail.ustc.edu.cn

1 引言

由于科学技术的发展,20 世纪末,三维显示技术成为当前世界上显示技术领域研究热点,现今流行的三维显示技术一共有 3 种:体三维显示技术^[1-5]、全息显示技术^[6-8]和视差立体显示技术^[9-20]。其中体三维显示技术和全息显示技术受限于应用和现有技术的限制,一直处于实验室研究阶段。在 20 世纪 90 年代,数字设备的发展引发了基于液晶技术的屏板显示的广泛应用,它成为了基于双目视差的自由立体显示迅速发展的催化剂。目前国内外已有很多原理样机及产品推出。

视差自由立体显示是现今技术最为成熟的三维显示技术,通常是由液晶显示器(LCD)与一维或者二维分光元件(即视差生成光学元件)耦合而成的,应用最为广泛的视差自由立体显示分光元件有视差障栅、柱透镜阵列和二维微透镜阵列^[21-23]。LCD 的像素排列具有周期性,同时分光元件也具有周期性,因此二者耦合的视差自由立体显示器会不可避免的产生莫尔条纹,这种现象严重时则会影响立体图像像质。因此,视差自由立体显示的莫尔条纹消除是非常必要的,一般有 2 种途径来消除莫尔条纹:避免莫尔条纹产生和莫尔条纹最小化^[24]。针对视差自由立体显示中的莫尔条纹消除技术,本文对于国内外研究现状及方法分别进行阐述和讨论。

2 视差自由立体显示原理及莫尔条纹最小化概念介绍

视差自由立体显示是以一维或二维光栅作为分光元件,对原始图像的光线传播的路径进行一定方向的控制,使观察者的左右眼观看到不同的视差图像,从而根据双目视差原理产生立体图像感知。根据视差类型又可分为横向视差自由立体显示和全视差自由立体显示。现今横向视差自由立体显示的分光元件主要是视差障栅和柱透镜阵列,全视差自由立体显示的分光元件主要是二维微透镜阵列^[25]。下面介绍基于这 3 种分光元件的视差自由立体显示原理。

2.1 基于视差障栅的横向视差三维显示^[26-29]

视差障栅在 2D 显示屏与观察者之间,由于视差障栅不透光部分的遮挡,观察者的左眼只能看到显示屏的奇(偶)列像素,而右眼只能看到显

示屏的偶(奇)列像素,如果 2D 显示屏的图像源也经过了相应的奇偶像素处理,则此时观察者双眼接收到了视差立体图像对,由此产生了深度感知。原理图如图 1 所示。

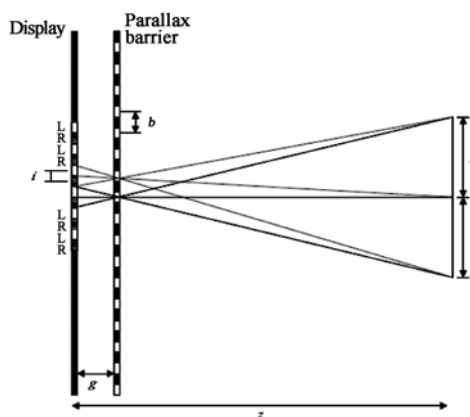


图 1 视差障栅自由立体显示原理图

Fig. 1 Principle of front parallax barrier

图中: i 为 2D 显示屏像素大小, b 为障栅狭缝间的距离, g 为障栅和 2D 显示屏之间的距离, z 为人眼和 LCD 的距离, e 模拟人眼约为 65 mm。由相似三角形得式如下:

$$z = g \left(\frac{e+i}{i} \right) b = 2i \left(\frac{z-g}{z} \right). \quad (1)$$

2.2 基于柱透镜的横向视差三维显示^[30-32]

柱透镜阵列与视差障栅类似,同样具有使奇偶视差图像分别投射到左右眼视区的作用,对于基于柱透镜阵列的多视点视差三维显示技术,如图 2 所示。

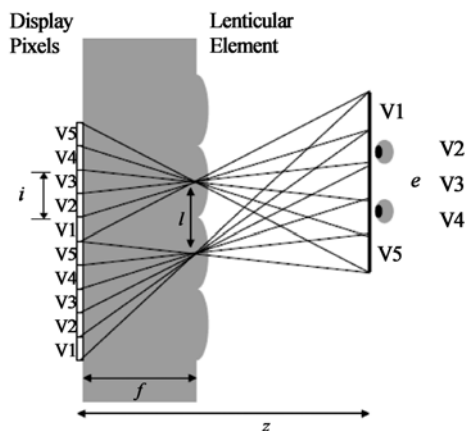


图 2 基于柱透镜的多视点自由显示原理图

Fig. 2 Principle of multi-view front lenticular autostereoscopic display

图中: i 为2D显示屏亚像素大小, f 为柱透镜焦距, l 为柱透镜阵列节距大小, z 为人眼到2D显示屏的最佳观察距离, e 为模拟人眼视窗,约为65 mm, N_v 为观察视点,由三角关系可得:

$$l = N_v i \left(\frac{z-f}{z} \right). \quad (2)$$

2.3 基于二维微透镜阵列的全视差自由立体显示^[33]

全视差自由立体显示利用微透镜阵列对三维场景进行记录和再现。它包含记录和再现两个过程,其基本原理如图3所示。

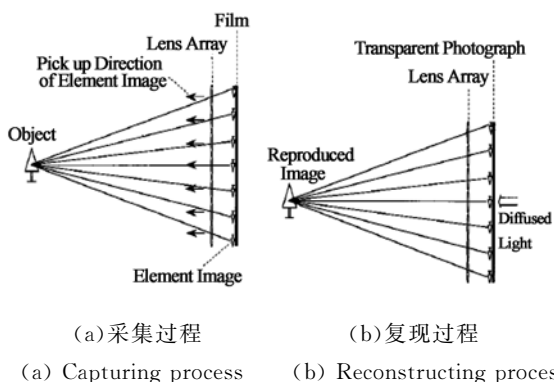


图3 集成成像图像采集和复现过程

Fig. 3 Capturing and reconstructing process in integral image

记录过程就是通过记录微透镜阵列对物空间场景成像,从而获得空间场景多方位视角的视差图像,而再现过程是把记录的全视差图像放在具有同样参数的微透镜阵列的相同位置处,根据光路可逆原理可知,再现微透镜阵列把全视差图像透射出来的光线聚集还原,则在有限的视角内从任意方向可以观看到这个重建像。

2.4 莫尔条纹最小化概念^[34]

为了消除打印技术中的莫尔条纹,瑞士科学家 Isaac Amidror 提出了莫尔条纹的最小化概念(moiré minimization)。打印技术是依靠多层颜色依次打印叠加完成彩色打印的,由此彩色打印术可以看成多层光栅的叠加,因此在打印过程中会出现预料之外的莫尔条纹影响打印质量。根据傅里叶分析可知,一个非余弦光栅的傅里叶展开存在无穷项,所以多层光栅叠加会产生无穷项傅里叶频谱项,然而在打印术中占有主导地位的只有有限的几个组项。通过调节光栅的倾角和周期,保证占有主导地位的傅里叶频谱项对应的莫

尔条纹不能被人眼看到(即在频域内,这几组频率在可见范围圆之外),这样就消除了彩色打印术中的莫尔条纹,实现了莫尔条纹的最小化。

Isaac Amidror 建立多层光栅叠加的数学模型,由于傅里叶级数会随着阶数而迅速减小,因此只考虑3阶以内的傅里叶级数,并用编程方法在频域找到落在人眼可视范围圆(visibility circle)的组项,再找到各个条纹的平衡点。

具体步骤如下:

(1)从无穷个频率项中筛选出一些有可能成为可见莫尔条纹的频率(危险频率 dangerous frequency)。

(2)对于多层光栅叠加,遍历这个多维空间,使得危险频率落在可见范围圆(visibility circle)之外。

(3)对比步骤2找到的一些频率,找到最好的光栅参数状态,并通过仿真保证没有高频莫尔条纹存在。

(4)最终确定最优的光栅参数。

莫尔条纹最小化分析的算法原理是,找到一个点使得人眼不能看到所有的危险频率的条纹,而且在这个点上,所有的危险频率处于一个平衡点,即对于人眼观看具有相同的主导地位。

3 视差自由立体显示中莫尔条纹消除技术

当周期或准周期结构叠加时会产生莫尔条纹,莫尔技术在应力分析、莫尔计量术和莫尔轮廓术等领域有非常广泛的应用。然而在图像成像领域,我们不希望莫尔条纹出现。现今流行的视差自由立体显示器由LCD和具有周期结构的分光

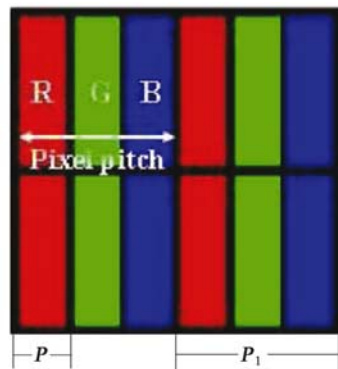


图4 LCD像素排列示意图

Fig. 4 Layout of LCD color filter

元件组成, LCD 像素排列通常为纵横规则排列, 如图 4 所示, 彩色颜色矩阵和黑矩阵交错纵横周期排列, 因此三维显示中也会出现莫尔条纹, 这会降低三维显示图像的质量^[24]。

通常有 3 种途径来消除莫尔条纹: 避免莫尔条纹产生、莫尔条纹最小化和图像处理去除莫尔条纹。视差自由立体显示消除莫尔条纹采用前 2 种途径。下面对这两种莫尔条纹消除技术在视差自由立体显示中的应用进行介绍。

3.1 视差自由立体显示中避免莫尔条纹产生技术

避免莫尔条纹是视差自由立体显示技术初期采用的一种途径, 这种方法主要通过改变 LCD 的周期性排列属性, 使其与视差分光元件的结构相似性降低。

kazuki Taira 等人针对横向视差自由立体显示, 在 LCD 加上一个马赛克式的彩色滤波装置 (mosaic color filter arrangement), 从而降低其像素周期性排列特性, 使得 LCD 和视差分光元件的结构相似性降低, 如图 5 所示^[35]。

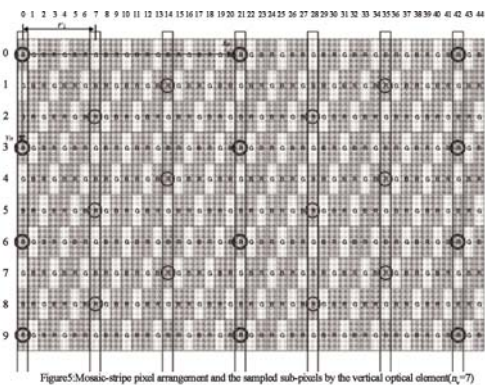


图 5 马赛克条形像素排列装置和分光元件采样后的亚像素

Fig. 5 Horizontal-stripe pixel arrangement and the sampled sub-pixels by the vertical optical element

这种方法有很好的显示效果, 但由于要对 LCD 进行亚像素级操作, 难度较大, 难以商业化, 因此这种成本较高的方法仅限于实验室研究。

Makoto Okui 等人针对基于柱透镜阵列和二维微透镜阵列的视差自由立体显示器, 采用 2 种低通光学滤波器: 散射和离焦^[36]。散射低通光学滤波如图 6, 离焦则是通过调整透镜与二维显示屏的距离实现。通过散射和离焦, 使得莫尔条纹变得模糊, 从而使得条纹对比度降低。

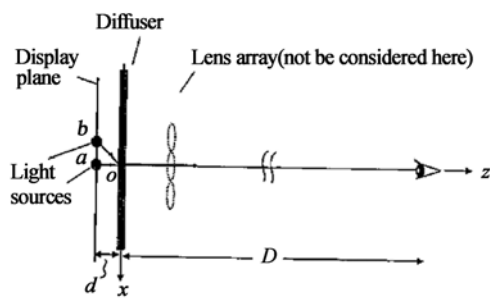


图 6 散射低通光学滤波器

Fig. 6 Diffuser as a spatial optical filter

然而这种方法在模糊莫尔条纹的同时, 也使得立体图像质量下降。

另外, 为了消除视差自由立体现实中的由 RGB 彩色矩阵产生的彩色莫尔条纹, R. Borner 把 LCD 旋转 90° 消除彩色莫尔条纹^[31], 但这同时不可避免会出现由于黑矩阵而产生的黑白莫尔条纹。

3.2 视差自由立体显示中莫尔条纹最小化技术

为了消除打印技术中的莫尔条纹, 瑞士科学家 Isaac Amidror 提出了莫尔条纹的最小化 (moiré minimization) 分析概念^[34]。对于多层光栅叠加, 通过莫尔条纹最小化分析可以找到合适的光栅参数, 使得占主导的莫尔条纹细到人眼不可辨的程度。

3.2.1 基于柱透镜视差自由立体显示的莫尔条纹最小化研究和实验^[38]

现在的视差自由立体显示器多通过调整分光元件的节距和相对 LCD 的倾角, 使条纹变细到人

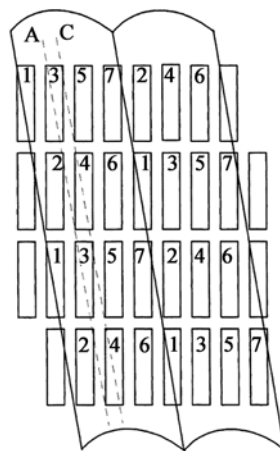


图 7 柱透镜和 LCD 呈一定角度的 3D-LCD

Fig. 7 Slanted Lenticular 3D-LCD

眼不能感知。首先提出并应用的是 Philips 研究实验室的 Cees van Berkel, 针对基于柱透镜阵列的视差自由立体显示, 通过柱透镜阵列和 LCD 形成一定的角度, 如图 7 所示。这种方法削弱了左右视区交界的黑条纹对比度, 使得交界黑线不明显。此外, 这种像素排列方法, 使得水平和竖直方向的像素均降低, 图像比例变形问题减弱。

通过实验, Cees van Berkel 得出莫尔条纹最小时对应的视点数, 如图 8 所示。可知, 视点数为 4 和 9 时, 莫尔条纹最小; 视点数为 3 和 6 时, 莫尔条纹最大。

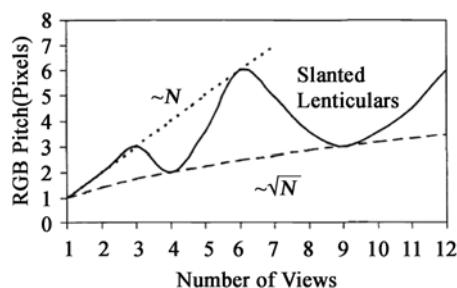


图 8 斜柱镜排列的莫尔条纹图

Fig. 8 Slanted lenticular colour stripe pitch

Cees van Berkel 给出了符合实际工程需求的莫尔条纹最小化结果, 但并未给出相应的理论计算和证明。

3.2.2 视差自由立体显示中莫尔条纹最小化的仿真及分析

2009 年, Yunhee Kim 等人针对三维集成成像进行了彩色莫尔条纹仿真, 通过建立相应的多

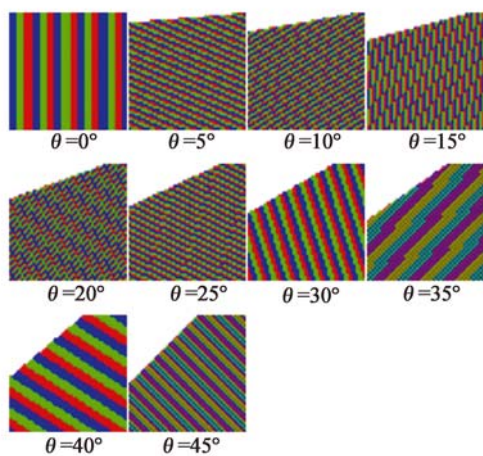


图 9 彩色莫尔条纹仿真图

Fig. 9 Simulation of color moiré patterns

层光栅叠加模型, 得出二维微透镜阵列倾斜不同角度的莫尔条纹仿真图, 如图 9 所示。Yunhee Kim 通过对仿真结果进行傅里叶频谱分析, 得出一定条件的莫尔条纹最小化结果, 并实验验证了其仿真和分析的有效性^[39]。

同时, 天马微电子股份有限公司的朱燕林等人对光栅式自由立体显示器中莫尔条纹的形成规律进行研究, 建立了一套简化的分析模型, 深入研究了 BM (Black Matrix) 的节距、观察距离、光栅倾斜角度对莫尔条纹的走向及其节距的影响, 并进行了理论推导与试验验证, 结果表明, 该理论能有效地揭示莫尔条纹的形成机理与形成规律^[40]。

上述方法主要还是以光栅叠加仿真为主, 再根据仿真莫尔条纹变化趋势, 找出莫尔条纹最小变化时, 分光元件的参数变化趋势。

3.2.3 视差自由立体显示中莫尔条纹最小化的余弦光栅叠加模型近似分析^[41-42]

Vladimir V. Saveljev 针对基于二维微透镜阵列的视差自由立体显示系统, 通过假设和近似, 把上述系统看做 4 层黑白光栅的叠加, 进一步可以简化为 4 层余弦光栅的叠加, 其中 LCD 简化为两个相互垂直且同频的余弦光栅叠加, 同样, 二维微透镜阵列简化为两个相互垂直且同频的余弦光栅的叠加, 4 层余弦光栅叠加的数学表达式如下:

$$T = \frac{1}{16} (1 + \cos \mathbf{k}_{1x} \cdot \mathbf{x}_1) (1 + \cos \mathbf{k}_{1y} \cdot \mathbf{y}_1) \times (1 + \cos \mathbf{k}_{2x} \cdot \mathbf{x}_2) (1 + \cos \mathbf{k}_{2y} \cdot \mathbf{y}_2). \quad (3)$$

其中前两项因子代表 LCD 等效光栅, 后两项代表二维微透镜阵列等效光栅。把式 (3) 利用积化和差展开成 41 项波数, 因为波数和莫尔条纹的周期成反比, 经分析最小项为:

$$\begin{cases} F_4(\rho, \alpha) = \sqrt{\rho^2 - 2\rho \cos \alpha + 1} \\ F_8(\rho, \alpha) = \sqrt{\rho^2 - 2\rho(\sin \alpha + \cos \alpha) + 2} \end{cases}. \quad (4)$$

通过分析可得, 当二维微透镜阵列倾角为 26.261° 时, 人眼观察莫尔条纹最不明显。

Vladimir V. Saveljev 对全视差自由立体显示建立了简化的四层余弦光栅叠加模型, 并通过分析计算, 给出了莫尔条纹不明显的解析条件。

3.2.4 视差自由立体显示中莫尔条纹最小化的序数方程方法和傅里叶分析方法的一致性分析^[34-35, 43-44]

通过序数方程方法和傅里叶分析方法的一致

性分析,长春光机所课题组分别对横向视差自由立体显示和全视差自由立体显示进行分析,并在图像域,直观的给出分光元件参数变化的物理意义。

首先对于基于视差障栅的横向视差自由立体显示系统,它可以看成三层黑白光栅叠加,根据傅里叶频谱理论可知,3 个黑白光栅的透过率函数的傅里叶分析如下:

$$\begin{cases} T_1(x, y) = \sum_{r=-\infty}^{\infty} \alpha_r \cos(2\pi r x) \\ T_2(x, y) = \sum_{s=-\infty}^{\infty} b_s \cos(2\pi s y) \\ T_3(x, y) = \sum_{h=-\infty}^{\infty} c_h \cos\left(\frac{2\pi h [x \cos \theta + y \sin \theta]}{\rho}\right) \end{cases} \quad (5)$$

则三层光栅叠加后的透过率函数为:

$$T(x, y) = T_1(x, y) T_2(x, y) T_3(x, y). \quad (6)$$

可知 $T(x, y)$ 包括无穷多项,直接分析比较困难,这里我们引入一种特定辐射光栅模型来等效周期和倾角逐渐变化的视差障栅,其与 LCD 等效黑白光栅的叠加图如图 10 所示,通过图 10 的条纹趋势分析,并利用傅里叶理论和序数方程方法的一致性,计算出 3 种叠加状态:异常莫尔状态(singular moiré state)、过渡状态(transition state)和稳定莫尔自由状态(stable moiré free-state)。

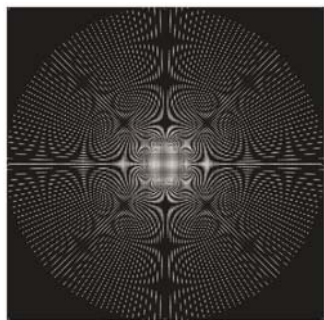


图 10 特定辐射光栅和 LCD 等效黑白光栅叠加图

Fig. 10 Superposition of the special grating and the equivalent grating of LCD

对于全视差自由立体显示系统,它可以看成四层黑白光栅叠加,这里我们引入一种特定辐射网格光栅模型来等效周期和倾角逐渐变化的二维分光元件,如图 11。

其与 LCD 等效黑白光栅的叠加图如图 12 所示。

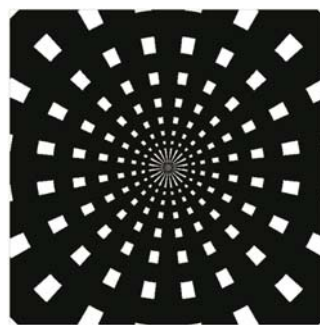


图 11 特定辐射网格光栅

Fig. 11 Special radial grid grating

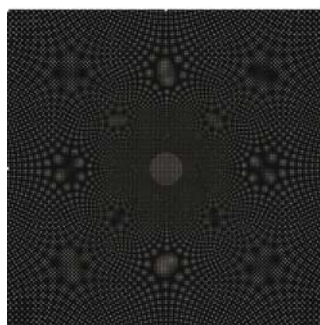


图 12 特定辐射网格光栅和 LCD 等效黑白光栅的叠加图

Fig. 12 Superposition of the special radial grid grating and the equivalent grating of LCD

通过类似的分析计算,可得出 3 种叠加状态,其中稳定莫尔自由状态和 Vladimir V. Saveljev 工作的 26.57° 相一致。

4 视差自由立体显示中莫尔条纹消除的技术发展方向

自液晶显示屏技术迅速发展以来,视差自由立体显示逐渐成为研究热点,现在已有多种基于视差自由立体显示理论的原理样机或产品。然而通过以上介绍可知,现在关于视差自由立体显示中莫尔条纹消除的研究很少,我们认为有 3 个原因:

(1) 避免莫尔条纹产生的方法成本太高,且影响三维图像质量,不符合市场规律;(2) 莫尔条纹最小化是现今最常用的方法,然而分光元件只有节距和倾角两个变量,研究者可以通过遍历这两个参数的变化,找出莫尔条纹最不明显的参数区间,正如 Philips 实验室前期的工作,虽然未给出

解析解,但其实验结果已满足使用需求;(3)视差自由立体显示是当今市场热点,出于保密和商业利益的考虑,相关研究成果未发布。

现今视差自由立体显示的分光元件主要为一维和二维光栅,Vladimir V. Saveljev 和我们的研究对其给出了详细的研究,并给出了不产生影响图像的莫尔条纹的条件,这一结论对 Philips 实验室的实验结果给出了直观地理论解释。根据视差自由立体显示原理可知,分光元件必定是具有周期性的,视差自由立体显示的一个发展方向即为分光元件的变化,比如正六边形周期排列的蝇眼透镜阵列,此时会出现新的莫尔条纹情况,其分析过程同样可以依据 Isaac Amidror 莫尔最小化条件。

5 结 论

视差自由立体显示是当今市场研究和应用的热点,其原理决定了影响图像的莫尔条纹是不可避免的。避免莫尔条纹的方法由于成本较高,而且会使得三维图像质量下降,因此只在前期有相关的实验室探索,一直未能市场化。依据莫尔条纹最小化思想,结合傅里叶频谱理论分析,可得视差自由立体显示的莫尔条纹不明显的解析解,直观地给出了视差三维立体显示中避免莫尔条纹产生的物理解释,对于以视差原理为基础的其他自由立体显示系统,这种方法依然有广泛的借鉴和应用意义。

参 考 文 献:

- [1] Blundell B G, Schwarz A. The classification of volumetric display system: characteristics and predictability of the image space [J]. *IEEE Transactions on Visualization and computer Graphics*, 2002, 8(1): 66-75.
- [2] Downing E A, Hesselink L, Ralston J, et al. A three-color solid-state three-dimensional display [J]. *Science*, 1996, 273(5279): 1185-1189.
- [3] Soltan P, Trias J, Robinson W, et al. Laser based 3-D volumetric display system [J]. *SPIE*, 1992, 1664: 177-192.
- [4] Favalora G E, Napoli J, Hall D M, et al. 100 Milliton-voxel volumetric display [J]. *SPIE*, 2002, 4712: 300-312.
- [5] 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.
Lin Y F, Liu X, Liu X D, et al. Three-dimensional volumetric display system utilizing a rotating two-dimensional LED array [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, 23(10): 1158-1162. (in Chinese)
- [6] Downing. Method and system for three-dimensional display of information based on two-photon upconversion; US, 5,684,621 [P]. 1997.
- [7] Soltan P, Lasher M, Dahlke W, et al. Laser projected 3-D volumetric displays [C]. *Proc. SPIE*, 1997, 3091: 96-109.
- [8] 沈川, 张成, 刘凯峰, 等. 基于像素结构空间光调制器的全息再现像问题研究[J]. *光学学报*, 2012, 32(3): 0309001.
Shen C H, Zhang C H, Liu K F. Research on issues about reconstructed holographic image based on a pixelated spatial light modulator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(3): 0309001. (in Chinese)
- [9] Wang Q H, Tao Y H, Zhao W X, et al. Lenticular lens based 3D autostereoscopic liquid crystal display [C]. *Proc. of International Display Research Conferenee*, 2008: 306-308.
- [10] Wang Q H, Tao Y H, Li D H, et al. 3D autostereoscopic liquid crystal display based on lenticular lens [C]. *Proc. of Asia Display, Shanghai*, 2007: 453-455.
- [11] 周磊, 王琼华, 陶宇虹等. 自由立体显示用柱面透镜光栅的优化设计[J]. *光学学报*, 2009, 29(12): 3506-3510.
Zhou L, Wang Q H, Tao Y H, et al. Optimum design of lenticular lens for autostereoscopic display [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(12): 3506-3510. (in Chinese)
- [12] 赵仁亮, 赵悟翔, 王琼华, 等. 狭缝光栅自由立体显示器立体可视区域的研究[J]. *光子学报*, 2008, 37(5): 960-963.

- Zhao R L, Zhao W X, Wang Q H, *et al.* Research on stereo viewing zone in autostereoscopic display based on parallax barrier [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, 37(5):960-963(in Chinese)
- [13] 王嘉辉, 邓玉桃, 苏剑邦, 等. 全高清裸眼 3D 显示效果的评价与测量[J]. 液晶与显示, 2013, 28(5):805-809.
Wang J H, Deng Y T, Su J B, *et al.* Evaluation and measurement of display effect in full high resolution autostereoscopic display [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2013, 28 (5): 805-809. (in Chinese)
- [14] 周雄图, 陈思果, 姚剑敏, 等. 用于集成成像的针孔/微透镜组合阵列设计与仿真[J]. 液晶与显示, 2013, 28(6): 855-859.
Zhou X T, Chen E G, Yao J M, *et al.* Design and simulation of combined pinholes/microlens array for integral imaging [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2013, 28 (6): 855-859. (in Chinese)
- [15] 张雷, 杨勇, 赵星, 等. 多级投影式集成成像三维显示视场角拓展[J]. 光学精密工程, 2013, 21(1):1-6.
Zhang L, Yang Y, Zhao X, *et al.* Enhancement of viewing angle of multi stage projection type integral imaging 3D display [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(1):1-6. (in Chinese)
- [16] 马建设, 夏飞鹏, 苏萍, 等. 数字全息三维显示关键技术与系统综述[J]. 光学精密工程, 2012, 20(5):1141-1152.
Ma J S, Xia F P, Su P, *et al.* Survey on key techniques and systems of digital holographic 3D display [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(5):1141-1152. (in Chinese)
- [17] 焦小雪, 赵星, 杨勇, 等. 基于相机阵列的三维集成成像记录系统[J]. 光学精密工程, 2012, 20(8):1653-1660.
Jiao X X, Zhao X, Yang Y, *et al.* Pick-up system for three-dimensional integral imaging with camera array [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(8):1653-1660. (in Chinese)
- [18] 焦小雪, 赵星, 杨勇, 等. 基于最佳记录距离的三维集成成像光学获取技术[J]. 光学精密工程, 2011, 19(11): 2805-2811.
Jiao X X, Zhao X, Yang Y, *et al.* Optical acquiring technique of three-dimensional integral imaging based on optimal pick-up distance [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(11):2805-2811. (in Chinese)
- [19] 谢宏斌, 杨勇, 赵星, 等. 狭缝光栅、柱面透镜光栅及其新构型在三维显示中的应用[J]. 中国光学, 2011, 4(6): 562-570.
Xie H B, Yang Y, Zhao X, *et al.* Applications of parallax barrier, lenticular lens array and their modified structures to three-dimensional display [J]. *Chinese Optics*, 4(6):562-570. (in Chinese)
- [20] 赵星, 王芳, 杨勇, 等. 集成成像三维显示系统显示性能的研究进展[J]. 中国光学, 2012, 5(3):209-221.
Zhao X, Wang F, Yang Y, *et al.* Research progress of display performance of integral imaging three-dimensional display system [J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(3):209-221. (in Chinese)
- [21] Wang A H, Wang Q H, Li D H, *et al.* Three Dimensional Display Technology [J]. *Chinese Journal of Electron Devices*, 2008, 31(1): 299-301.
- [22] 王元庆. 基于 LCD 的自由立体显示技术[J]. 液晶与显示, 2003, 18(2): 116-120.
Wang Y Q. Auto-stereoscopic display based on LCD [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2003, 18(2): 116-120. (in Chinese)
- [23] 周磊, 王琼华, 李大海, 等. 立体显示用柱面透镜光栅的设计[J]. 光子学报, 2009, 38(1): 30-33.
Zhou L, Wang Q H, Li D H, *et al.* Design of lenticular lens in autostereoscopic display [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(1): 30-33. (in Chinese)
- [24] 孔令胜, 金光, 蔡盛, 等. 三维显示中基于彩色叠栅条纹的视差障栅参数设计[J]. 光学学报, 32(1):0105001(1-6).
- Kong L S, Jin G, Cai S, *et al.* Parameter design of parallax barrier based on color moiré fringe in three-dimensional displays [J]. *Acta Optica Sinica*, 32(1):0105001(1-6). (in Chinese)
- [25] 孔令胜. 莫尔条纹及其最小化的理论和应用研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2012.
Kong L S. Research on theory and application of Moiré patterns and Moiré minimization [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, 2012. (in Chinese)
- [26] Woodgate G J, Harrold J, Jacobs M, *et al.* Flat panel autostereoscopic displays characterization and enhancement [J]. *SPIE*, 2000, 3957, 0277-786x/153-164.
- [27] Montgomery D J, Woodgate G J, Ezra D. Parallax barrier for an autostereoscopic display; China, GB 2352573

- [P]. 2001-01.
- [28] Kaplan S. Theory of parallax barriers [J]. *Journal of the SMPTE*, 1952, 59(1):11-21.
- [29] 孔令胜,南敬实,荀显超. 平面三维显示技术的研究现状[J]. *中国光学与应用光学*, 2009, 2(2):112-118.
Kong L S, Nan J S, Xun X C. Research status quo of flat 3-D display technology [J]. *Chinese Journal of Optics and Applied Optics*, 2009, 2(2):112-118. (in Chinese)
- [30] Berkel C V, Parker D W, Franklin A R. Multi-view LCD [J]. *SPIE*, 1996, 2653:32-39.
- [31] Berkel C V, Clarke J A. Characterization and optimization of 3D-LCD module design [J]. *SPIE*, 1997, 3012:179-186.
- [32] Berkel C V, Clarke J A. Autostereoscopic display apparatus:US,6,064,424 [P]. 2000-05.
- [33] Poon T C. *Digital Holography and Three-dimensional Display* [M]. New York: Springer, 2005.
- [34] Amidror I. *The Theory of the Moiré Phenomenon* [M]. New York: Springer, 2009.
- [35] Taira K, Fukushima R, Saishu T, *et al.* Autostereoscopic liquid crystal display using mosaic color pixel arrangement [J]. *Proc SPIE*, 2005, 5664:349-359.
- [36] Okui M, Kobayashi M, Arai J, *et al.* Moiré fringe reduction by optical filters in integral three-dimensional imaging on a color flat-panel display [J]. *Appl. Opt.*, 2005, 44(21): 4475-4483.
- [37] Börner R. Four autostereoscopic monitors on the level of industrial prototypes [J]. *Displays* 1999, 20:57-64.
- [38] Berkel C V. Image preparation for 3D-LCD [J]. *Proc. SPIE*, 1999, 3639:84-91.
- [39] Kim Y, Park G, Jung J H, *et al.* Color moiré pattern simulation and analysis in three-dimensional integral imaging for finding the moiré-reduced tilted angle of a lens array [J]. *Appl. Opt.*, 2009, 48(11):2178-2187.
- [40] 朱燕林,陈瑞政,谢佳,等. 光栅式自由立体显示器中莫尔条纹的形成规律[J]. *液晶与显示*, 2009, 24(6):911-915.
Zhu Y L, Chen R G Xie J, *et al.* Principle of Moiré Fringe in autostereoscopic display based on parallax barrier and lenticular lens [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2009, 24(6):911-915. (in Chinese)
- [41] Saveljev V V, Son J Y, Javidi B, *et al.* Moiré minimization condition in three-dimensional image displays [J]. *J. Display Tech.*, 2005, 1(2): 347-353.
- [42] Saveljev V V, Son J Y, Chun J H, *et al.* About a Moiré-less condition for non-square grids [J]. *J. Display Tech.*, 2008, 4(3):332-339.
- [43] Kong L S, Jin G, Wang T C, *et al.* Parameter design of a parallax barrier based on the color moiré patterns in autostereoscopic display [J]. *Appl. Opt.*, 2011, 50(34):H153-H158.
- [44] Kong L S, Jin G, Wang T C. Analysis of Moiré minimization in autostereoscopic parallax displays [J]. *Opt. Express*, 2013, 21(22):26068-26079.

作者简介:孔令胜(1983—),男,河南濮阳人,博士,助理研究员,主要从事光学检测方面工作。E-mail:kongling@mail.ustc.edu.cn