

三维显示中基于彩色叠栅条纹的视差障栅参数设计

孔令胜^{1,2} 金光¹ 蔡盛¹ 徐开¹ 王天聪¹ 钟兴¹

(¹ 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

² 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘要 为确定三维显示中视差障栅(PB)的最优参数,提出一种基于彩色叠栅条纹的 PB 参数设计方法。液晶显示器(LCD)和 PB 简化为相应参数的黑白光栅模型,而具有特定参数的特定辐射光栅作为周期和倾角变化的 PB 模型,通过序数方程和傅里叶分析方法分析特定辐射光栅和 LCD 单色等效黑白光栅的叠加图样,由此推断出不同 PB 周期的低频主导条纹频率组项,然后利用傅里叶理论的部分和提取方法(PSE)分析不同 PB 周期的低频主导叠栅条纹的强度轮廓,得出 PB 的最佳节距和相应倾斜角度。实验结果表明,所设计的 PB 三维显示系统没有出现降低像质的叠栅条纹,具有较好的三维显示效果。

关键词 彩色叠栅条纹;视差障栅;特定辐射光栅;序数方程方法;傅里叶分析;部分和提取;低频主导叠栅条纹

中图分类号 O438

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201232.0105001

Parameter Design of Parallax Barrier Based on Color Moiré Fringe in Three-Dimensional Displays

Kong Lingsheng^{1,2} Jin Guang¹ Cai Sheng¹ Xu Kai¹ Wang Tiancong¹ Zhong Xing¹

(¹ Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

² Graduate University, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract In order to confirm appropriate parameters of parallax barrier (PB), a parameter design of PB based on a color Moiré condition in autostereoscopic displays is proposed. Liquid crystal display (LCD) and PB are approximated as the two corresponding binary gratings. Special radial grating is considered as the equivalent model of PB with varying periods and angles. Superposition of the equivalent grating for display device and special radial grating can be analyzed by indicial equations method and Fourier theory. Different predominant low-frequency terms in case of different period of PB can be confirmed. The Moiré-fringe intensity profile in all cases can be obtained by partial sum extraction in Fourier theory. Optimal period and corresponding angle of PB are obtained. Experiment result shows that the autostereoscopic displays have almost invisible Moiré patterns and show good autostereoscopic image.

Key words color Moiré fringe; parallax barrier; special radial grating; indicial equations method; Fourier analysis; partial sum extraction; low-frequency predominant Moiré patterns

OCIS codes 050.2770; 070.4790; 110.6880; 330.5000

1 引言

周期或准周期结构叠加时会产生叠栅条纹。叠栅条纹对于微小位移及变形有很高的灵敏度,因此莫尔技术在应力分析、莫尔计量术和莫尔轮廓术等

领域有着非常广泛的应用^[1~5]。而有些情况并不希望叠栅条纹出现,例如彩色打印术则要避免叠栅条纹的产生^[6]。同时,现今流行的立体显示器由液晶显示器(LCD)和具有周期结构的分光元件组成,因

收稿日期: 2011-07-14; 收到修改稿日期: 2011-08-04

作者简介: 孔令胜(1983—),男,博士研究生,主要从事三维立体显示方面的研究。E-mail: lingshengkong@hotmail.com

导师简介: 金光(1958—),男,研究员,博士生导师,主要从事星载一体化方面的研究。E-mail: jing@ciomp.ac.cn

(通信联系人)

此三维显示中也会出现叠栅条纹,导致三维显示图像质量的下降。

通常有两种途径来消除三维显示中的叠栅条纹:避免叠栅条纹产生和使叠栅条纹不明显。避免叠栅条纹产生通常借助改变显示屏像素的周期性排列,具体来说就是通过改变 LCD 彩色滤波器轮廓来实现消除彩色叠栅条纹^[7,8],然而改变 LCD 彩色滤波器将会增加成本。使叠栅条纹不明显的方法有很多种。最简单的方法是把 LCD 旋转 90° 以消除彩色叠栅条纹^[9],但这同时不可避免会出现由于黑矩阵而产生的黑白叠栅条纹。另外一种方法是把分光元件相对 LCD 倾斜一定的夹角^[10],使条纹变细达到人眼不能感知的地步,此种方法还可以均衡像素的纵横分配比,是目前最为常用的方法。在基于微透镜阵列的集成成像中,使叠栅条纹变细的方法也被广泛研究和应用^[11~13]。

目前最为常用的三维显示分光元件有视差障栅(PB)、柱镜阵列和微透镜阵列。基于微透镜阵列的集成成像被认为是最有前景的三维显示方法,该方法可以提供全视差,因此它的视点是连续的。然而由于像素在全视差中都有贡献,导致集成成像的三维图像像素非常低^[14~16]。因此对于现今的技术水平,具有横向视差的三维显示技术依然不可或缺。

对于具有横向视差的障栅三维显示技术,可以以障栅的周期和倾斜角度为变量分析彩色叠栅条纹。利用傅里叶理论定量分析叠栅条纹的周期和强度轮廓,进而找出合适的障栅周期和倾斜角度。首先,LCD 的彩色滤波矩阵和障栅都可以等效为具有相应参数的黑白光栅。为了找出不同障栅周期的低频主导傅里叶频谱项组项,利用序数方程方法和傅

里叶理论的一致性来分析特定辐射光栅和 LCD 等效黑白光栅叠加的图样^[17~19]。然后,利用傅里叶频谱理论定量分析 LCD 等效黑白光栅和不同周期障栅叠加的低频主导叠栅条纹的傅里叶频谱组项^[20]。同时考虑多视点三维显示理论,最终得到在障栅三维显示中最佳的障栅周期和相应倾角。

2 方法原理及仿真分析

2.1 LCD 和 PB 的等效模型

通常 LCD 通过红绿蓝三基色组合产生彩色图像,每个方形像素都有红绿蓝矩形亚像素组成,亚像素宽度 P 为像素宽度的 $1/3$,如图 1(a)所示。红绿蓝各自产生的叠栅条纹的周期和强度轮廓是一样的,只是位置相互有一个平移,由此在考虑彩色叠栅条纹时只需考虑任意一种颜色即可^[11]。LCD 在叠栅条纹的分析中可简化为其中一种颜色的显示,其一维等效黑白矩阵如图 1(b)所示。其中矩阵的亮条宽度为 LCD 亚像素宽度 P ,周期等于 LCD 像素宽度 P_1 。

根据三维显示理论可得,障栅的狭缝宽度 P_2 可近似为亚像素的宽度 P ^[21],所以这里设定 PB 狭缝宽度为 P ,根据文献^[18]可知,PB 倾角影响彩色叠栅条纹的周期和倾角,而其开口率影响彩色叠栅条纹的振幅和轮廓。由此为了全面分析彩色叠栅条纹,PB 的周期和倾角都需要优化。PB 的周期和倾角分别用 P_2 和 θ 表示。为了观察障栅周期和倾角变化时彩色叠栅条纹的变化趋势,考虑一种特定辐射光栅模型,辐射光栅的狭缝宽度恒定为亚像素宽度 P ,由此这种辐射光栅可以看成周期和倾角在不断变化的障栅如图 1(c)所示^[17]。

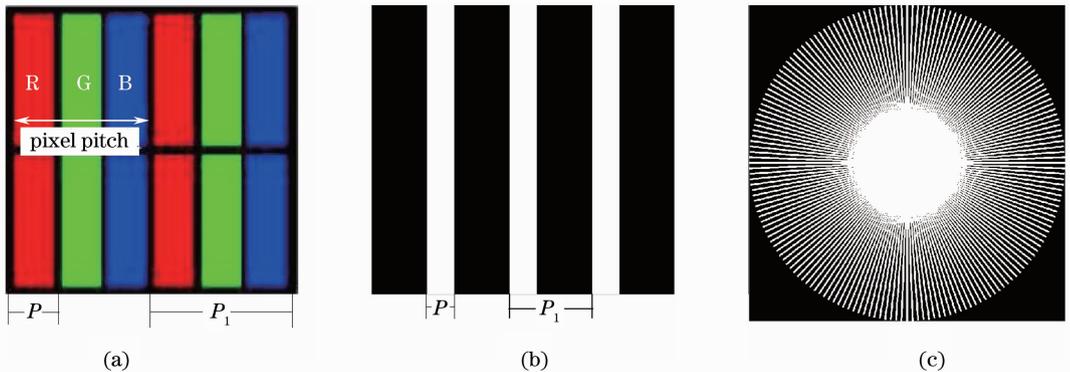


图 1 (a) LCD 结构彩色滤波结构;(b) LCD 单色等效黑白矩阵;(c) 特定辐射光栅

Fig. 1 (a) Layout of LCD color filtering; (b) equivalent monochrome binary matrix of LCD; (c) special radial grating

2.2 彩色叠栅条纹仿真

在障栅三维显示中,PB 以一定距离和一定的倾

角与 LCD 耦合。为简化运算给出假设:1)假设观察者位于无穷远处,这样 LCD 和障栅可看成紧贴的叠

加。由于 LCD 和 PB 有一定的距离,当观察者的距离发生变化时,LCD 单色等效黑白矩阵和 PB 的相对周期也在变化,由三维显示理论可知,LCD 和 PB 的间隔远小于最佳观察距离,由此观察距离从最佳观察距离到无穷远时,LCD 单色等效黑白矩阵和 PB 的相对周期变化很小,由此可假设观察者位于无穷远。2)忽略 LCD 中的黑矩阵,红绿蓝的几何形状为竖条形相间排列^[11]。3)检测图像为红绿蓝全亮图即白图。4)由于 PB 具有遮光效应,为保证图像亮度假定障栅开口率不小于 0.1,即障栅周期小于 10 倍的 LCD 亚像素宽度。

根据 2.1 的简化模型,彩色叠栅条纹可以简化为两相应的黑白等效光栅叠加,其中 LCD 的等效黑白光栅的表达式为

$$T_1(x, y) = \sum_{r=-\infty}^{r=\infty} a_r \cos(2\pi r x / P_1), \quad (1)$$

式中 a_r 为 $T_1(x, y)$ 的傅里叶展开系数。同样 PB 的表达式为

$$T_2(x, y) = \sum_{s=-\infty}^{s=\infty} b_s \cos\left[\frac{2\pi s(x \cos \theta + y \sin \theta)}{P_2}\right], \quad (2)$$

式中 b_s 为 $T_2(x, y)$ 的傅里叶展开系数。LCD 和 PB 耦合的简化模型为 $T_1(x, y)$ 和 $T_2(x, y)$ 的乘积^[18]:

$$T(x, y) = T_1(x, y)T_2(x, y) = \sum_{r=-\infty}^{r=\infty} \sum_{s=-\infty}^{s=\infty} a_r b_s \times \cos\left(\frac{2\pi r x}{P_1}\right) \cos\left[\frac{2\pi s(x \cos \theta + y \sin \theta)}{P_2}\right]. \quad (3)$$

可以看出,LCD 和 PB 耦合有无穷项的傅里叶级数,不过随着障栅周期变化,只有不同的部分傅里叶级数项是占主导地位的。为了找出不同障栅周期的主导傅里叶频率项,需对特定辐射光栅和 LCD 等效光栅的叠加图样进行分析比较。首先,根据序数方程方法和傅里叶理论的一致性^[19],对于两黑白光栅叠加,得出一些必要的结论如表 1 所示。

表 1 一些曲线族和与之对应的傅里叶频率项
Table 1 Unification of families of curves and corresponding Fourier frequency terms

Families of curves	Partial Fourier frequency terms
$l - m = n$	$R_1 = T(x, y) \quad (r = -s)$
$l - 2m = n$	$R_2 = T(x, y) \quad (r = -2s)$
$l - 3m = n$	$R_3 = T(x, y) \quad (r = -3s)$

表中不同的 R 表示与不同线族对应的部分傅里叶频率组项。

根据序数方程方法首先画出平行线族和辐射线族的叠加图如图 2 所示,图 2(a)~(c)分别为 $l - m = n$

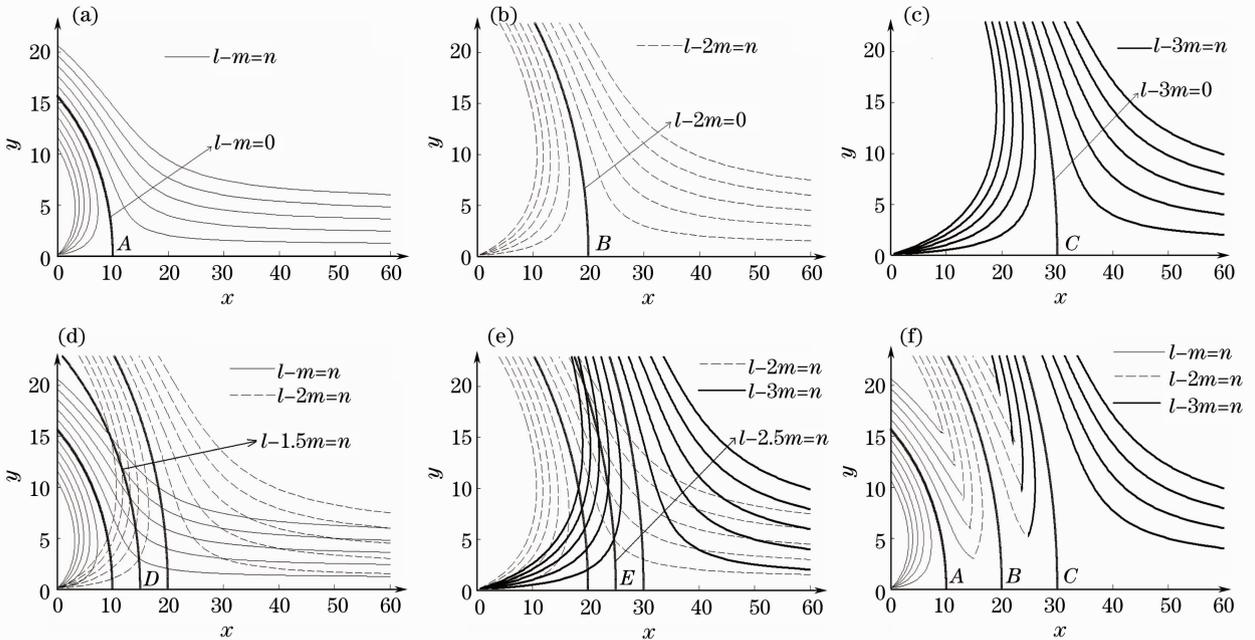


图 2 (a) $l - m = n$ 线族;(b) $l - 2m = n$ 线族;(c) $l - 3m = n$ 线族;(d) $l - m = n$ 和 $l - 2m = n$ 线族;
(e) $l - 2m = n$ 和 $l - 3m = n$ 线族;(f) $l - m = n, l - 2m = n$ 和 $l - 3m = n$ 线族

Fig. 2 Indexed family of $l - m = n$; (b) indexed family of $l - 2m = n$; (c) indexed family of $l - 3m = n$; (d) indexed family of $l - m = n$ and $l - 2m = n$; (e) indexed family of $l - 2m = n$ and $l - 3m = n$; (f) indexed family of $l - m = n, l - 2m = n$ and $l - 3m = n$

$n, l-2m=n, l-3m=n$ 的曲线族,图中粗线为 $n=0$ 的曲线,它们与 x 轴的交点分别为 A, B, C ,辐射光栅在 A, B, C 三个点的局部等效周期分别为平行线族周期的1,2和3倍。图2(d)为 $l-m=n$ 和 $l-2m=n$ 两个线族, $l-1.5m=0$ 线族的线通过两个线族的某些交点,它与 x 轴交点 D 横坐标为平行线族周期的1.5倍,同样图2(e)对于 $l-2m=n$ 和 $l-3m=n$ 两个线族的某些交点连线为 $l-2.5m=0$ 的曲线,其与 x 轴交点 E 横坐标为平行线族周期的2.5倍。根据图3轮廓和三个曲线族 $l-m=n, l-2m=n, l-3m=n$ 的局部相似性,三个线族图形分别被相应的部分提取如图2(f)所示, $l-m=n$ 曲线族取 $l-1.5m=0$ 曲线的以左部分, $l-2m=n$ 取曲线 $l-1.5m=n$ 和 $l-2.5m=n$ 之间部分, $l-3m=n$ 取曲线 $l-2.5m=n$ 以右部分。

特定辐射光栅和LCD等效黑白光栅叠加如图3所示,根据图2(f)和图3的相似性以及参考文献[4],得到以下结论:

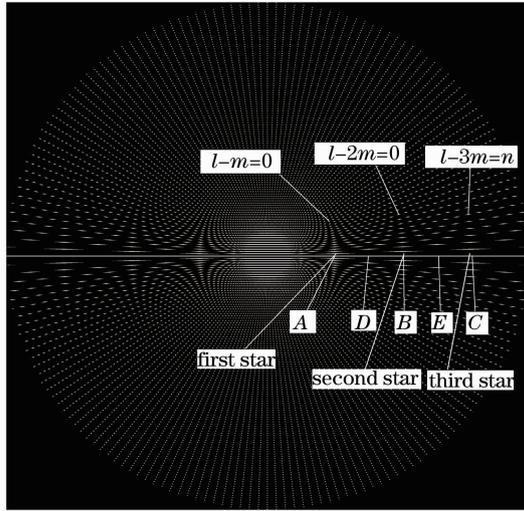


图3 特定辐射光栅和LCD等效黑白光栅叠加图
Fig. 3 Superposition of special radial grating and equivalent binary grating of LCD

三个星形图形附近区域分别和曲线族 $l-m=n, l-2m=n$ 和 $l-3m=n$ 相对应。另外可以看到在相邻的星形图形之间存在过渡区域,图3的两个过渡区域分别为曲线 $l-1.5m=0$ 和 $l-2.5m=0$ 附近区域。在 $l-1.5m=0$ 附近过渡区域,曲线族 $l-m=n$ 和 $l-2m=n$ 有相同的主导地位;同样,在 $l-2.5m=0$ 附近过渡区域,曲线族 $l-2m=n$ 和 $l-3m=n$ 有相同的主导地位。

结合上述推论和表1,可以得出不同障栅周期时彩色叠栅条纹的低频主导组项如表2所示。

表2 不同障栅节距的低频主导傅里叶组项
Table 2 Predominant Fourier low-frequency terms with different period of PB

Period of PB	Predominant frequency terms
3P	R_1
4P	R_1
4.5P	R_1, R_2
5P	R_2
6P	R_2
7.5P	R_2, R_3
8P	R_3
9P	R_3

其次分析不同障栅周期的叠栅条纹变化,为方便讨论,这里分析障栅对于亚像素整数倍情况,即 $P_2 = 3P, 4P, 5P, 6P, 7P, 8P, 9P$ 。由整数倍叠栅条纹的对比可以定性分析非整数倍的趋势。根据经验公式,条纹周期大于1mm的情况对于人眼需要避免^[18],这里分析叠栅条纹周期 P_m 均为1mm的不同障栅周期的条纹轮廓图,用 P 归一化障栅周期,不同障栅周期存在不同的低频傅里叶频谱组项,根据不同的低频傅里叶频谱组项,可以求出各自低频主导叠栅条纹的强度轮廓(各个条纹峰值用 $P=3$ 的峰值归一化)。下面根据傅里叶理论的部分和提取(PSE)方法给出各个条纹的波形轮廓信息如表3所示^[20],根据表2画出各自波形如图4和图5所示。

表3 障栅和叠栅条纹参数

Table 3 Parameters of PB and Moiré fringes

PB		Low-frequency predominant Moiré fringes					
P_2	P_s	Opening ratio	$\theta/(^\circ)$	P_m/mm	I_{\min}	I_{\max}	Waveform
3		1/3	16.91			1	Triangle
4		1/4	10.29			3/4	Trapezoid
5		1/5	11.27			1/2	Trapezoid
6	1	1/6	16.91	1	0	1/2	Triangle
7		1/7	15.97			3/7	Trapezoid
8		1/8	14.41			1/3	Trapezoid
9		1/9	16.91			1/3	Triangle

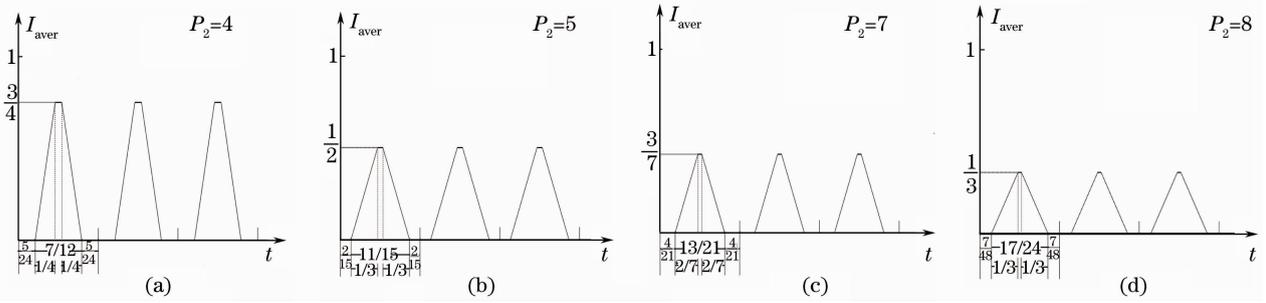


图4 障栅周期为4,5,7和8的低频主导叠栅条纹强度轮廓

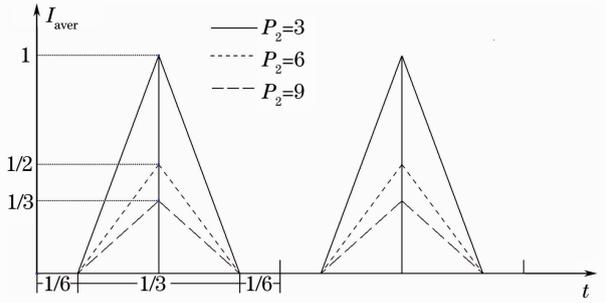
Fig. 4 Moiré-fringe intensity profile when periods of PB are equal to $4P$, $5P$, $7P$ and $8P$, respectively

图5 障栅周期为3,6和9的低频主导叠栅条纹强度轮廓

Fig. 5 Moiré-fringe intensity profile when periods of PB are equal to $3P$, $6P$ and $9P$, respectively

根据对比度公式^[22]

$$C = (I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min}). \quad (4)$$

所有情况的叠栅条纹对比度都为1,但是 P_2 为8和9时条纹峰值最小,所以此时的条纹最不明显,而且根据多视点立体显示理论可知^[21,23],节距越大

则视点数越多且观察视角越大,此时人眼观看的不舒适度也越弱。对于 P_2 为8和9情况,障栅倾角相同时,由表1可推知, P_2 为8的低频主导叠栅条纹周期较小,因此 $P_2=8$ 为整数情况的最佳选择。

现分析非整数情况,由前述低频条纹分析可知, $P_2=4.5, 7.5$ 为过渡区域,此时低频主导条纹有两个,再根据上述条纹轮廓分析可推断, $P_2=7.5$ 时条纹最不明显。由于过渡区域低频主导条纹有两个,可以推断过渡区域的非整数情况条纹比两边的整数情况条纹不明显。

结合上述整数和非整数情况,同时考虑三维显示的视点数和观察视角两参数时, $P_2=7.5$ 为最佳的障栅周期选择。

3 实验结果及讨论

根据上述讨论的结论并结合三维显示理论设计障栅参数^[21,23]。三维显示器参数如表4所示。

表4 PB立体显示器元器件参数表

Table 4 Parameters of autostereoscopic display components based on PB

Components	Parameters	Parameters value
LCD	Size /inch	19
	Resolution /pixel	1280×1024
	P_1 /mm	0.294×0.294
PB	P_s /mm	0.095
	P_2 /mm	0.756
	θ	$\arctan(4/15)$
	Distance from LCD to PB /mm	1.1
Three-dimensional displays	View zone width /mm	45
	View numbers	8
	View distance /mm	500

此时的低频主导傅里叶项为 R_2 和 R_3 ,与之对应的叠栅条纹周期分别为0.89 mm和0.93 mm。平面显示器加障栅前后的对比图如图6所示,由图6(a)~(c)可知,加障栅前后的红绿蓝三基色图亮度减低,但并未有明显的叠栅条纹出现。同样,

图6(d)的全白图在亮度有所降低的情况下也未看到明显的叠栅条纹。

加障栅前后的三维显示图像如图7所示,图7(a)为加障栅后某一视点的图像。图7(b)为未加障栅的八视点图像,因没有障栅的分光作用,所以

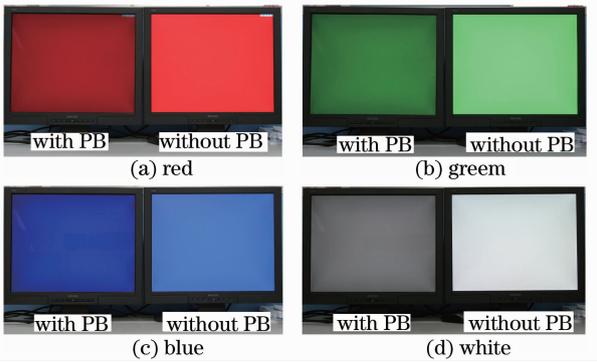


图 6 LCD 加障栅前后的红绿蓝白图的对比图
Fig. 6 Comparison of LCD image with and without PB when LCD image are red, green, blue and white

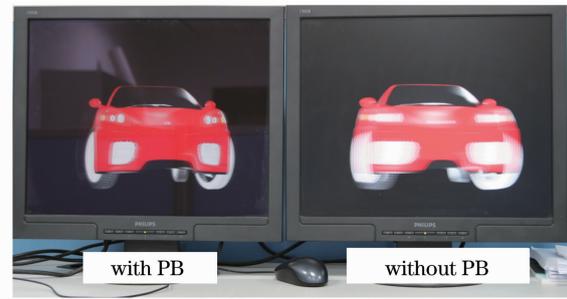


图 7 LCD 加障栅前后的立体显示图像
Fig. 7 Autostereoscopic image comparison of LCD with and without PB

看到是重影图像。图 7(a)显示很好的三维显示效果,从而验证了障栅设计参数的有效性。

4 结 论

彩色叠栅条纹是三维液晶显示中降低图像像质的一个因素。以往研究大都只着眼于分光元件与 LCD 的倾角来讨论彩色叠栅条纹的削弱。对于障栅三维显示,本文根据 LCD 和 PB 的结构特性建立了它们的等效黑白光栅模型,利用特定的辐射光栅和 LCD 等效黑白光栅叠加图得出不同障栅周期的低频主导叠栅条纹,并利用傅里叶理论对不同障栅周期情况分析低频主导叠栅条纹信息,结合障栅三维显示理论得出最佳障栅周期和相应的倾角。实验验证了结论的可行性和有效性。对于同样具有横向视差的柱镜阵列三维显示^[24],此方法同样可以应用。

参 考 文 献

1 K. Patorski. Handbook of the Moiré Fringe Technique [M]. Amsterdam: Elsevier, 1993. 186~216
2 O. Kafri, I. Glatt. The Physics of Moiré Metrology [M]. New York: John Wiley & Sons, 1989. 19~38, 75~87
3 H. Takasaki. Moiré topography [J]. *Appl. Opt.*, 1970, **9**(6):

1467~1472
4 A. J. Durelli, V. J. Parks. Moiré Analysis of Strain. Prentice-Hall [M]. New Jersey: Englewood Cliffs, 1970. 148~193
5 J. C. Wyant. Moiré and Fringe Projection Techniques in. Optical Shop Testing 2nd ed [M]. New York: Wiley, 1992, ch. 16: 653~681
6 J. P. Allebach. Random nucleated halftone screen [J]. *Photographic Science and Engineering*, 1978, **22**(2): 89~91
7 K. Taira, R. Fukushima, T. Saishu *et al.*. Autostereoscopic liquid crystal display using mosaic color pixel arrangement [C]. *SPIE*, 2005, **5664**: 349~359
8 M. Okui, M. Kobayashi, J. Arai *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
9 R. Börner. Four autostereoscopic monitors on the level of industrial prototypes [J]. *Displays*, 1999, **20**: 57~64
10 L. Lipton, M. Feldman. A new autostereoscopic display technology: the syntha gram [C]. *SPIE*, 2002, **4660**: 229~235
11 Y. Kim, G. Park, J. H. Jung *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
12 V. V. Saveljev, J. Y. Son, B. Javidi *et al.*. Moiré minimization condition in three-dimensional image displays [J]. *J. Display Technol.*, 2005, **1**(2): 347~353
13 V. V. Saveljev, J. Y. Son, J. H. Chun *et al.*. About a Moiré-less condition for non-square grids [J]. *J. Display Technol.*, 2008, **4**(3): 332~339
14 G. Lippmann. La photographie integrale [J]. *C. R. Acad. Sci.*, 1908, **146**: 446~451
15 F. Okano, H. Hoshino, J. Arai *et al.*. Real-time pickup method for a three-dimensional image based on integral photography [J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(7): 1598~1603
16 H. Hoshino, F. Okano, H. Isono *et al.*. Analysis of resolution limitation of integral photography [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1998, **15**(8): 2059~2065
17 P. S. Theocaris. Radial gratings as Moiré gauges [J]. *J. Phys. E*, 1968, **1**: 613~618
18 I. Amidror. The Theory of the Moiré Phenomenon [M]. New York: Springer, 2009. 24, 26, 62
19 M. Abolhassani, M. Mirzaei. Unification of formulation of Moiré fringe spacing in parametric equation and Fourier analysis methods [J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(32): 7924~7926
20 K. Patorski, S. Yokozeki. Moiré profile prediction by using Fourier series formalism [J]. *Jap. J. Appl. Phys.*, 1976, **15**(3): 443~456
21 Zhao Renliang, Zhao Wuxiang, Wang Qionghua *et al.*. Research on stereo viewing zone in autostereoscopic display based on parallax barrier [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(5): 960~963
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
22 M. Born, E. Wolf. Principles of Optics [M]. Yang Jiasun Transl.. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005. 249
马科斯. 玻恩, 埃米尔. 沃耳夫. 光学原理 [M]. 杨葭孙译. 北京: 电子工业出版社, 2005. 249
23 王琼华. 3D 显示技术与器件 [M]. 北京: 科学出版社, 2011. 93~94
24 Zhou Lei, Wang Qionghua, Tao Yuhong *et al.*. Optimum design of lenticular lens for autostereoscopic display [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(12): 3506~3510
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