

doi: 10.3788/gzxb20144305.0512001

多视点自由立体显示串扰分析与视区仿真

侯春萍¹, 许国^{1,2}, 沈丽丽¹

(1 天津大学 电子信息工程学院, 天津 300072)

(2 天津科技大学 电子信息与自动化学院, 天津 300222)

摘 要: 对多视点自由立体显示的串扰成因进行了分析, 推导出了无串扰观看点与光栅参数之间的关系; 然后分别对垂直于显示器方向和平行于显示器方向的串扰进行了分析与计算, 得到了屏前三维空间的串扰分布情况. 仿真结果表明, 沿显示屏垂直方向的视区范围大于水平方向的视区范围, 而且在水平平行于屏幕的方向上, 每一个视点存在多个理论无串扰观测点, 但在垂直于屏幕方向上, 每个视点只存在一个理论无串扰观测点. 最后通过对屏前三维区域视点光强进行仿真, 进一步验证了串扰计算的准确性, 为自由立体显示系统的最佳设计与具体实现奠定了仿真基础.

关键词: 多视点; 自由立体显示; 液晶显示器; 串扰; 狭缝光栅; 建模; 视区仿真

中图分类号: TP391.4

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)05-0512001-6

Analysis of Viewing Zone and Simulation of the Crosstalk Based on Multi-view Autostereoscopic Display

HOU Chun-ping¹, XU Guo^{1,2}, SHEN Li-li¹

(1 School of Electronic Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

(2 School of Electronic Information and Automation, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300222, China)

Abstract: The cause of crosstalk based on multi-view autostereoscopic display was analyzed. The relation between sweet spots and parallax barrier parameters was deduced. Then, analysis of the model of crosstalk was processed respectively in vertical and horizontal directions to the flat-panel displays, which aimed to obtain the distribution characteristics of crosstalk in three-dimensional space before the screen. The simulation results show that viewing zone in vertical direction along the screen is greater than it in horizontal direction. And, each view has multiple observation points without any crosstalk in a horizontal direction parallel to the screen, but in the direction perpendicular to the screen, each view has only one such point. Through the simulation analysis of viewing zone, the accuracy of the crosstalk calculation was further validated. The research results of this paper establish a simulation basic platform for the optimum design and concrete realization of autostereoscopic display system.

Key words: Multi-view; Autostereoscopic display; Liquid crystal displays; Crosstalk; Parallax barrier; Modeling; Viewing zone simulation

OCIS Codes: 120.2820; 350.2770; 330.7327

0 引言

与传统平面显示器相比, 立体显示能够给观看者提供真实的临场感和景物的深度层次感, 具有身临其境的感觉, 因此被越来越多地应用于娱乐、军事、广告

和建筑等诸多领域. 而自由立体显示系统不需要佩戴额外的辅助设备就可以让观看者欣赏到 3D 效果. 主流的裸眼立体显示技术包括基于光栅和基于集成成像的立体显示技术. 目前, 市场上出现的裸眼立体显示器, 相当一部分采用了基于光栅的立体显示技术. 夏普、三

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (No. 60932007)、国家高技术研究发展计划 (No. 2012AA011505) 和教育部博士点基金 (No. 20110032110029) 资助

第一作者: 侯春萍 (1957-), 女, 教授, 博士, 主要研究方向为立体信息显示技术. Email: hcp@tju.edu.cn

收稿日期: 2013-09-29; 录用日期: 2013-12-18

<http://www.photon.ac.cn>

星、LG 和爱国者等公司都相继推出了相应的产品。但是,在基于光栅的立体显示技术中,存在着两个必须从理论上解决的问题。首先是视点间的串扰问题,串扰会引起立体感知质量的大幅度下降,造成观看的不舒适,当串扰大到一定程度时,会使观看者无法获得立体感^[1-3];再者,狭小的视区将用户局限在一个很小的范围内,造成活动的不自由。因此,视点间串扰和立体视区狭小是妨碍光栅式自由立体显示技术发展和生存的瓶颈问题。目前尚没有确切的视点间串扰和立体视区理论模型,系统的串扰水平和视区范围大多只能等待系统制造完成后,通过实际测量来确定,若不符合设计要求,还需要重新设计和制造。为了降低设计成本,利用仿真指导自由立体显示器的设计,一些学者已经开始针对串扰和视区分布开展了初步的建模和仿真工作。Boher 在文献[4]中对屏前空间串扰一致性进行了实际测量,但在 Boher 采用的实验方法中,采用了定点测量技术,由于选取的空间点十分有限,无法完全反映屏前空间的串扰分布情况。Park 在文献[5]中基于混合现实技术提出了一种 3D 显示仿真器,该仿真器通过融合仿真的虚拟空间与用户所在的真实场景,以达到确定最佳观看区域的目的。遗憾的是,该仿真器只能定性的估计最佳观看区域,没有对串扰分布状况进行仿真研究。Son 在文献[6]中提出了联合视区分布的概念,但并未给出串扰的准确分布等关键问题。

因此建立一套完整的串扰和视区仿真系统,对于自由立体显示系统的设计具有重要的意义。本文从理论上对基于狭缝光栅的自由立体显示系统串扰进行分析,并对其屏前视区分布进行三维仿真,为自由立体显示系统的最佳设计与具体实现提供了仿真基础。

1 狭缝光栅工作原理

基于狭缝的液晶显示(Liquid Crystal Display, LCD)自由立体显示器由 LCD 显示屏和狭缝光栅屏组成。根据狭缝与 LCD 显示屏的相对位置可以分为狭缝前置式和狭缝后置式两种类型^[7]。狭缝前置光栅位于平板显示屏与人眼之间。由于光栅的遮挡作用,可将屏幕上显示的图像分成左、右图像,分别提供给人的左眼和右眼,所以又被称之为左、右眼图像。理想情况下,透过狭缝光栅,人的左眼只能看到屏幕上提供的左图像,右眼只能看到屏幕上提供的右图像。根据双眼视差融像原理,观看者的大脑会融合视差合适的左、右眼图像,获得立体感知,形成立体“显示”效果^[8]。

在理想情况下,通过狭缝光栅的分像作用,屏幕上每个视点所属的像素可以在空间形成该视点独立的可视区域,即立体视区。在立体视区内,观看者前后左右自由移动都能观看到正确的 3D 显示效果,这时观看者的一只眼睛仅能看到一个视点的图像,另一只眼睛也

仅能看到另一个视点的图像。假设自由立体显示器能显示 N_v 个视点的图像,那么沿着屏前水平方向,会顺序交替出现每一个视点的视区^[9],如图 1 所示。本文中视区或者独立视区是指一个区域,在这个区域中,观看者只能看到某一个视点的图像信息^[10]。图 2 给出了两个视点的情况,假设有三个观看者在立体显示器前观看立体图像。由于 User1 的左眼接收到了右视点的图像,大脑接收到的深度信息是错误的,因此无法融合成立体图像,称之为反视立体图像^[11]。User2 位于远离最佳观看距离的位置,两个视点的光路混叠在一起,人眼接收到的是模糊的混合图像。只有 User3 处于最佳观看位置,而且两只眼睛处在正确的立体视区内,可以看到正确的立体影像。

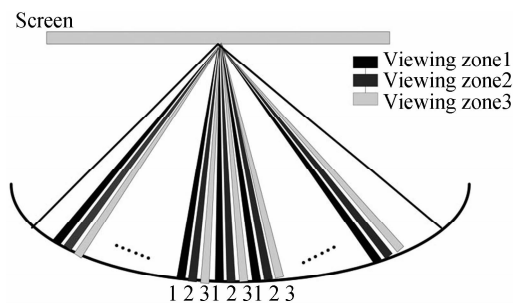


图 1 三视点立体显示器视区分布

Fig. 1 Viewing zone distribution diagram of three view-point stereoscopic display

由于左、右视点图像经光栅分离后,经过一定距离才能完全分离,导致实际的立体视区分布更为复杂。在距离显示器过近或者过远的位置上看到的是左、右视点混叠后的图像,无法形成立体视觉。即使在最佳观看距离上,也可能受到左、右图像串扰的影响^[12]。

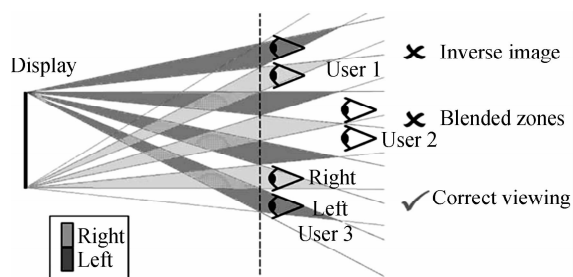


图 2 立体视区示意图

Fig. 2 Diagrammatic drawing of stereoscopic viewing zone

由分析可知,对于自由立体显示器来说,串扰对立体感和舒适度的影响很大,是评价自由立体显示器性能的重要指标^[13]。

2 串扰分析

狭缝光栅立体显示器利用挡光条对光线的遮挡作用对不同视点像素的光路进行分离。由于狭缝光栅的固有技术原理限制及其制作尺寸、贴装位置等不可能 100% 精确,所以导致屏前空间大部分区域都会受到串扰的影响,观看者只能在几个有限的位置上观看到无

串扰的正确立体图像,这几个位置称为“Sweet Spots”^[14].本文在图3所示的三维坐标下对串扰进行分析.其中,Z轴为深度方向,而LCD显示屏则位于 $Z=0$ 的平面上,且屏的左下角与坐标原点重合.

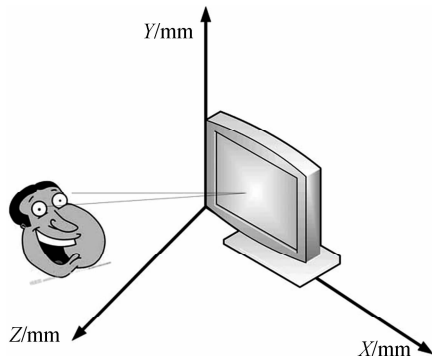


图3 三维坐标系

Fig.3 Schematic diagram of three-dimensional coordinate system

2.1 无串扰观看点分析

假设屏前空间任意 P 点坐标为 (X_o, Y_o, Z_o) ,固定 Y_o 为显示器中心高度.分析时,略去点坐标和公式中的 Y_o .假设人眼此时处于 P 点,根据光路方程,可以推导出人眼透过任意一个狭缝单元 i 能够看到的显示屏上的水平宽度值 Δx_i , Δx_i 为固定值,如式(1)和图4所示.

$$\Delta x_1 = \Delta x_2 = \dots = \Delta x_n = \dots = P_{B_i} + \frac{P_{B_i} \times B_D}{Z_o - B_D} \quad (1)$$

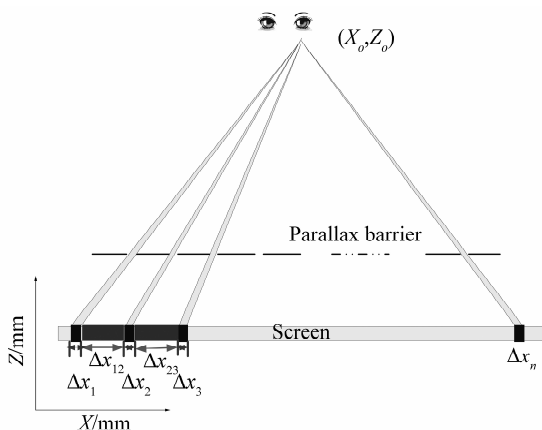


图4 无串扰点模型分析图

Fig.4 Analysis diagram of point model without crosstalk

利用图4,计算出任意两个相邻狭缝间挡光条挡住的显示屏像素宽度为

$$\Delta x_{12} = \Delta x_{23} = \dots = \Delta x_{n(n+1)} = \dots = P_{B_i} + \frac{B_D \times P_{B_i}}{Z_o - B_D} \quad (2)$$

式中, Δx_n 是空间点 (X_o, Z_o) 透过第 n 个狭缝看到的显示屏上的水平宽度, $\Delta x_{n(n+1)}$ 是指第 n 个狭缝和第 $n+1$ 个狭缝间挡光条挡住的显示屏像素长度. P_{B_i} 是指光栅栅距透明部分宽度, P_{B_i} 指光栅栅距不透明部分宽度, B_D 是光栅与显示器屏幕之间的距离.

设 P_D 为像素点间距, N_V 为显示视点数,则显示器和光栅参数满足式(3).

$$\begin{cases} P_D = P_{B_i} + \frac{P_{B_i} \times B_D}{Z_o - B_D} \\ (N_V - 1) \times P_D = P_{B_i} + \frac{B_D \times P_{B_i}}{Z_o - B_D} \end{cases} \quad (3)$$

这样,在屏前空间点 (X_o, Z_o) 就能看到组成某一个视图图像的全部像素,且不会受到其他视点光线的串扰,即串扰值为0,那么这个点就是该视点的最佳观看位置点(Sweet Spot).同理,其他视点在屏前空间也存在着各自的最佳观看位置点.

从式(3)出发,当显示屏像素参数和光栅参数确定后,可以得出无串扰点在深度方向上的位置,即最佳观看距离为

$$Z_{\text{Optimal}} = B_D + \frac{B_D \times P_{B_i}}{P_D - P_{B_i}} \approx \frac{B_D \times P_{B_i}}{P_D - P_{B_i}} \quad (4)$$

由于像素点间距 P_D 近似等于 P_{B_i} ,导致 $B_D \times P_{B_i} / P_D - P_{B_i}$ 值远大于 B_D ,可以将式(4)近似为

$$Z_{\text{Optimal}} \approx \frac{B_D \times P_{B_i}}{P_D - P_{B_i}} \quad (5)$$

2.2 观看者沿X轴方向(水平)移动串扰分析

当观看者保持观看高度与屏幕中心高度一致,沿着屏幕的水平方向(X 轴方向上)移动,偏离最佳观看位置时,感知到的立体图像通常会受到两个或者是两个以上其他视点图像的干扰.如图5所示,设视点1的最佳观看位置点坐标是 (X_o^1, Z_o^1) ,观看者保持与屏幕的距离不变,沿着与屏幕水平方向向点 (X_o^1, Z_o^1) 左、右两侧分别移动到点 (X_R, Z_R) 和 (X_L, Z_L) ,其中, $Z_L = Z_R = Z_o^1$.为了便于说明问题,只考虑相邻像素点的干扰情况,即假设 $|X_R - X_o^1| < 65 \text{ mm}$ 和 $|X_L - X_o^1| < 65 \text{ mm}$.

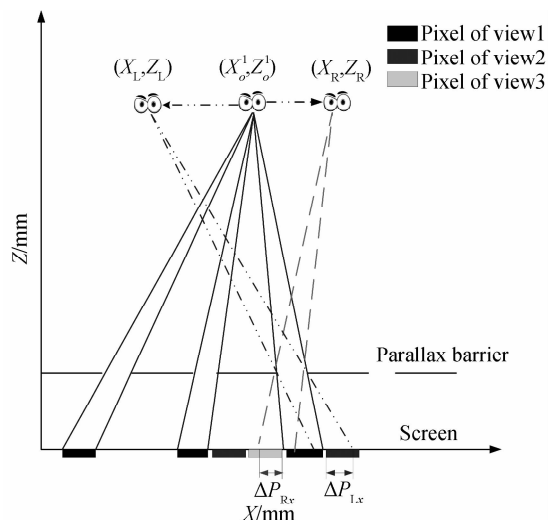


图5 水平方向串扰分析

Fig.5 Crosstalk Analysis in horizontal direction

在这种情况下,观看者在点 (X_R, Z_R) 除了看到属于视点1的像素之外,还能看到属于视点2的像素,透

过一个狭缝看到的属于视点 2 的像素长度范围为

$$\Delta P_{R_x} = \left| (X_R - X_0^1) \times \frac{B_D}{Z_0 - B_D} \right| \quad (6)$$

同理, 观看者在 (X_L, Z_L) 点除了看到属于视点 1 的像素之外, 还能看到属于视点 3 的像素, 透过一个狭缝看到的属于视点 3 的像素长度范围为

$$\Delta P_{L_x} = \left| (X_L - X_0^1) \times \frac{B_D}{B_D - Z_0} \right| \quad (7)$$

ΔP_{R_x} 和 ΔP_{L_x} 具体含义如图 5. 结合式(6)和(7), 只要观看者稍微偏离最佳观看点, 就会看到串扰图像.

2.3 观看者沿 Z 轴方向(垂直)移动串扰分析

仍然假设无串扰观测点坐标为 (X_0^1, Z_0^1) . 观看者沿着垂直屏幕方向分别远离和靠近显示器平面, 且移动到达的两点坐标分别为 (X_U, Z_U) 和 (X_D, Z_D) , 如图 6.

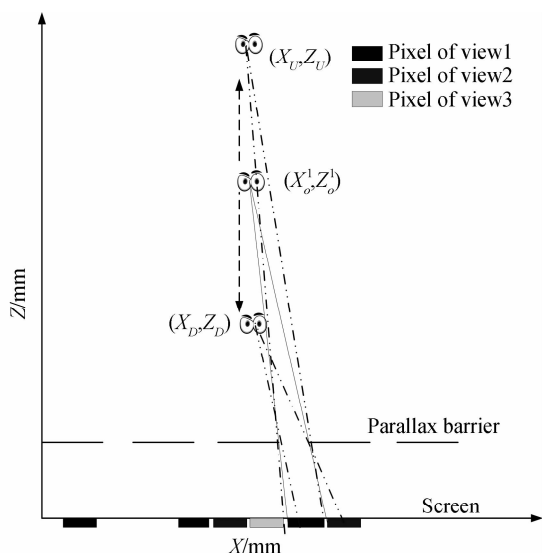


图 6 垂直方向串扰分析

Fig. 6 Crosstalk Analysis in vertical direction

设光栅的狭缝单元编号为 $1, 2, 3 \dots m \dots$, 则来自于无串扰观测点 (X_0^1, Z_0^1) 的光线通过狭缝单元 m 的两条边缘与 LCD 显示屏相交的 x 坐标为

$$\begin{cases} x_n = X_0^1 - Z_0^1 \frac{m \times P_B + P_B - X_0^1}{B_D - Z_0^1} \\ x_{n+1} = X_0^1 - Z_0^1 \frac{(m+1) \times P_B - X_0^1}{B_D - Z_0^1} \end{cases} \quad (8)$$

式中, P_B 为狭缝光栅栅距. 从空间一点透过任意狭缝可以看到显示屏的一小段区域, 该区域在 x 轴方向上的宽度范围(以下简称为透缝水平宽度)为

$$\Delta x = x_{n+1} - x_n = \frac{Z_0^1 \times P_B}{Z_0^1 - B_D} \quad (9)$$

分两种情况进行分析, 即观看者沿垂直屏幕方向远离和靠近最佳观测点时的串扰变化情况.

1) 观看者远离最佳观测点, 即远离立体显示器屏幕, 这时有 $Z_U > Z_0^1$ 点 (X_U, Z_U) 透过任意一个狭缝单元 m 与显示屏平面的交点分别可表示为

$$\begin{cases} x_{(U)n} = X_U - Z_U \frac{m \times P_B + P_B - X_U}{B_D - Z_U} \\ x_{(U)n+1} = X_U - Z_U \frac{(m+1) \times P_B - X_U}{B_D - Z_U} \end{cases} \quad (10)$$

透过任意一个狭缝单元 m 可以看到的透缝水平宽度为

$$\Delta x_U = x_{(U)n+1} - x_{(U)n} = \frac{Z_U \times P_B}{Z_U - B_D} \quad (11)$$

用式(11)减去式(9), 得到

$$\Delta x_U - \Delta x = \frac{(Z_0^1 - Z_U) \times B_D \times P_B}{(Z_U - B_D) \times (Z_0^1 - B_D)} \quad (12)$$

以及

$$x_{(U)n+1} - x_{n+1} = \frac{B_D \times (Z_0^1 - Z_U)}{(Z_U - B_D)(Z_0^1 - B_D)} \cdot [(m+1)P_B - X_0^1] \quad (13)$$

式(12) 略小于 0, 为负值, 说明从点 (X_U, Z_U) 透过狭缝看到的透缝水平宽度略小于从点 (X_0^1, Z_0^1) 看到的. 从式(13)可以得出, 透过不同的狭缝单元 m , 人眼从点 (X_U, Z_U) 看到的显示屏像素位置与无串扰状况相比, 产生了明显的偏移. 这意味着, 透过狭缝单元, 可以看到属于两个或多个视点的像素, 即产生了串扰. 如果点 (X_U, Z_U) 只是略微偏移点 (X_0^1, Z_0^1) , 由于式(12)略小于 0, 理论上只看到所属一个视点的像素.

2) 观看者靠近最佳观测点, 即靠近显示器屏幕, 这是有 $Z_D < Z_0^1$ 在点 (X_D, Z_D) 透过任意狭缝可以看到的透缝水平宽度为 Δx_D , 则

$$\Delta x_D - \Delta x = \frac{(Z_0^1 - Z_D) \times B_D \times P_B}{(Z_U - B_D) \times (Z_0^1 - B_D)} \quad (14)$$

从式(14)可以看出, 从点 (X_D, Z_D) 位置看到的透缝水平宽度略大于从 (X_0^1, Z_0^1) 看到的, 点 (X_D, Z_D) 位置理论上不具备实现无串扰观看的可能, 且 Z_D 值越小, 串扰度越大.

3 串扰分布仿真分析

接下来利用上一节对串扰的分析推导, 对屏前空间的串扰情况进行仿真.

表 1 给出了仿真采用的显示器参数. 为了分析方

表 1 仿真参数表

Table1 Specifications of autostereoscopic display	
Specifications	Numerical value
Number of View	3
Resolution	1920 * 1080
Pixel pitch	0.309 mm
Distance between flat display screen and parallax barrier	7 mm
Slit width	0.307 5 mm
Pitch	0.922 5 mm

便,本文采用一种简单的串扰度定义^[15]. 视点 i 对视点 k 的串扰度定义为

$$\chi_k(i) = (S_i/S_k) \times 100\% \quad (15)$$

式中 S_i 表示人眼在空间点透过透光条看到的来自视点 i 的串扰图像面积, S_k 表示人眼透过透光条看到的视点 k 的有用图像面积. 视点 k 的最佳观看点就是 $\chi_k(i) = 0$ ($i=1, 2 \dots N_v$ 且 $i \neq k$) 的位置. $\chi_k(i)$ 值越大,说明串扰越严重.

多个视点在屏前空间的视区分布是不连续的,每个视点在空间都会出现多个最佳观看位置及视区. 在纵向坐标固定为 $Z=1445$ mm 的前提下,图 7 选择了视点 1 在横向坐标 $X=317$ mm 附近处的视区进行仿真. 从图 7 可以看到,视点 1 只有横坐标为 317 mm 时串扰度为 0,即 $X=317$ mm 时为最佳观看点,其余位置均受到视点 2 或视点 3 的串扰. 但在水平方向上存在极小的一段区间,可以近似认为,该区间内串扰趋近于 0.

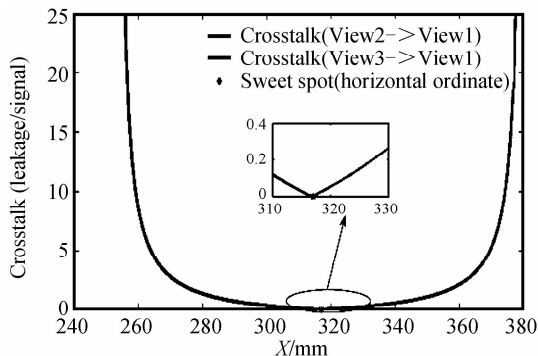


图 7 视点 1 水平方向串扰仿真

Fig. 7 Simulation diagram of crosstalk in horizontal direction (View 1)

固定 $X=318$ mm,沿着与屏幕垂直的方向进行串扰度仿真,结果如图 8 所示. 从图 8 可以看出,深度方向坐标 Z 在(1437 mm, 1447 mm)范围内,串扰度接近于 0. 这说明沿显示屏幕垂直方向的视区范围大于沿显示屏幕水平方向的视区范围. 本文得到的这个仿真结果与文献[16]描述的菱形视区相符合.

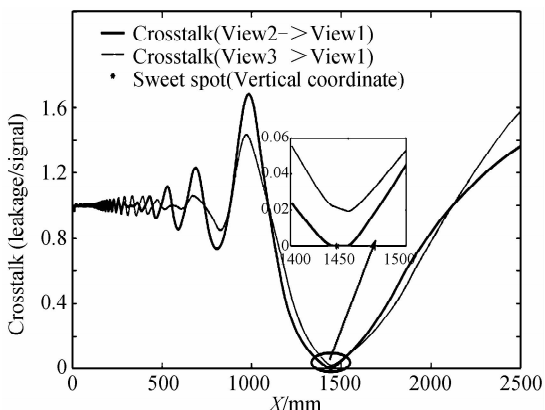


图 8 视点 1 垂直方向串扰仿真图

Fig. 8 Simulation diagram of crosstalk in vertical direction (View 1)

4 视区三维仿真

为了进一步验证串扰计算的准确性,同时说明屏前空间视区的分布状况,图 9 以视点 1 为例对屏前空间的视点像素光强度分布做了仿真.

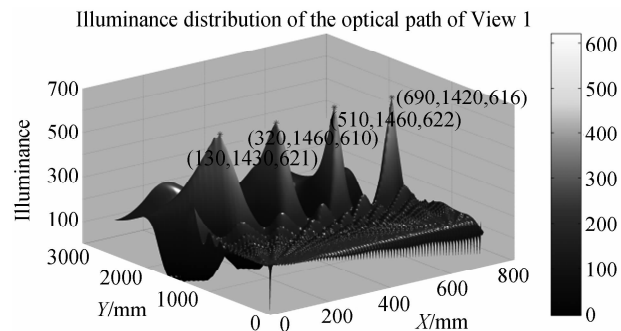


图 9 视点 1 视区光强分布仿真

Fig. 9 Light distribution simulation diagram of View 1

从图 9 中可以看出,在水平平行于屏幕的方向上,视点 1 存在多个理论无串扰观测点,但在垂直于屏幕方向上,每个视点只存在一个理论无串扰观测点. 也就是说,屏前空间每个视点的最佳观测点会水平交替出现.

设每个视点的最佳观看位置间隔为瞳距宽度(约为 65 mm),当观测者沿水平方向移动时,其左右眼将顺序看到 View1-View2, View2-View3 的视差图像,融合后可以获得正确的立体感知. 而当观测者的左右眼看到 View3-View1 的视差图像时,会产生反视立体图像,不能获得正确的立体感.

5 结论

本文对多视点自由立体显示的串扰成因进行了分析,推导出了无串扰观看点与光栅参数之间的关系;分别对垂直于显示器方向和平行于显示器方向的串扰进行了分析与计算,得到了屏前三维空间的串扰完整分布情况,证实了三维视区分布为菱形;通过对屏前视区进行仿真,验证了串扰计算的准确性,为自由立体显示系统的最佳设计与具体实现奠定了仿真基础.

参考文献

- [1] WANG L, TU Y A N, CHEN L I, *et al.* Effect of display technology on the crosstalk perception in stereoscopic video content[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2012, **22**(9): 1257-1265.
- [2] SHEN Li-li, ZHANG Jing, FAN Ke-feng, *et al.* Research on quality analysis and measurement of stereoscopic display [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(2): 219-223. 沈丽丽, 张晶, 范科峰, 等. 立体显示器质量测试与性能分析研究[J]. *光子学报*, 2013, **42**(2): 219-223.
- [3] ZHANG Ying-jing, LI Su-mei, WEI Jin-jin, *et al.* Subjective quality evaluation method of stereo image[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(5): 602-607. 张英静, 李素梅, 卫津津, 等. 立体图像质量的主观评价方案[J]. *光子学报*, 2012, **41**(5): 602-607.

- [4] BOHER P, LEROUX T, BIGNON T, *et al.* Full optical characterization of auto-stereoscopic 3D displays using local viewing angle and imaging measurements[C]. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, 2012, 8288: 25.
- [5] PARK M C, LEEA H D, SONB J Y. 3D display simulator based on mixed reality[C]. SPIE, 2012, 8384: 838412-1.
- [6] SON J Y, PARK M C, LEE H, *et al.* Viewing zones of IP and MV [C]. SPIE Defense, Security, and Sensing. International Society for Optics and Photonics, 2012; 83840Z-83840Z-6.
- [7] LAWTON G. 3D displays without glasses: coming to a screen near you[J]. *Computer*, 2011, **44**(1): 17-19.
- [8] KIM D, CHOI S, SOHN K. Effect of vergence - accommodation conflict and parallax difference on binocular fusion for random dot stereogram[J]. *Circuits and Systems for Video Technology, IEEE Transactions on*, 2012, **22**(5): 811-816.
- [9] HOU Chun-ping, XU Guo, SHEN Li-li. Calculation and simulation of viewing zone based on parallax barrier autostereoscopic display[J]. *Journal of Tianjin University*, 2012, **45**(8): 677-681.
侯春萍, 许国, 沈丽丽. 基于狭缝光栅的自由立体显示器视区模型与计算仿真[J]. 天津大学学报, 2012, **45**(8): 677-681.
- [10] YAO Jian-min, XIN Qi, GUO Tai-liang. Design of zigzag staggered barrier for autostereoscopic display [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(10): 1176-1179.
姚剑敏, 辛琦, 郭太良. 自由立体显示器中锯齿状交错狭缝光栅的设计[J]. 光子学报, 2012, **41**(10): 1176-1179.
- [11] ARAI J, KAWAKITA M, Yamashita T, *et al.* Integral three-dimensional television with video system using pixel-offset method[J]. *Optics Express*, 2013, **21**(3): 3474-3485.
- [12] WOODS A. Understanding crosstalk in stereoscopic displays [C]. Keynote Presentation at the Three-Dimensional Systems and Applications Conference, Tokyo, Japan. 2010: 19-21.
- [13] BLONDÉ L, SACRÉ J J, DOYEN D, *et al.* 55. 1: Diversity and coherence of 3D crosstalk measurements [C]. SID Symposium Digest of Technical Papers, Blackwell Publishing Ltd, 2011, **42**(1): 804-807.
- [14] KANG K, PARK S, HWANG S, *et al.* P - 158: LC barrier with a shifted ito electrode structure for additional sweet spots [C]. SID Symposium Digest of Technical Papers. Blackwell Publishing Ltd, 2012, **43**(1): 1061-1064.
- [15] HOU Chun-ping, WANG Xiao-yan. Crosstalk ratio evaluation of autostereoscopic display based on the slanted parallax barrier[J]. *Journal of Tianjin University*, 2012, **45**(8): 663-668.
侯春萍, 王晓燕. 基于倾斜狭缝光栅的自由立体显示串扰比[J]. 天津大学学报, 2012, **45**(8): 663-668.
- [16] SON J Y, SON W H, KIM S K, *et al.* Three-dimensional imaging for creating real-world-like environments [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2013, **101**(1): 190-205.