

柱透镜光栅立体显示的串扰度

王爱红¹, 李小方², 陶苗苗¹, 曹敏¹, 蒋延荣²

(1. 南通大学 理学院, 江苏 南通 226019; 2. 河南师范大学 物理与电子工程学院, 河南 新乡 453007)

摘 要:为实现对柱透镜光栅立体显示串扰的定量分析,提出了一种串扰度的计算方法.首先,创建了用于描述显示屏上子像素视差图像的视点矩阵.然后,基于几何光学并结合视点矩阵,创建了用于描述观看位置上观看到的各幅视差图像信息量的视区矩阵.最后,由视区矩阵推导出串扰度的计算公式.实验测量结果与计算结果相近.验证了该计算方法的有效性.该方法可用于分析光栅倾斜角度、视点数及观看位置等因素对串扰的影响,且在定义串扰度阈值的基础上可确定最佳立体观看区域.

关键词:自由立体显示;串扰;柱透镜光栅;视区

中图分类号:TN141

文献标志码:A

柱透镜光栅立体显示利用光栅的折射将来自于平面显示屏上显示着不同视差图像的子像素的光向不同角度传播,观看者位于合适的区域左右眼看到不同的视差图像,从而产生立体视觉^[1-3].它具有结构简单,可与现有平面显示器兼容,亮度高,成本低且无须配戴立体眼镜等优点,是具有广泛应用前景的一种自由立体显示技术.串扰是评价柱透镜光栅立体显示的重要指标之一^[4-6],它的存在将引起观看者的视觉疲劳^[7].串扰度与光栅倾斜角度、视点数、观看位置等因素密切相关,通过实验来分析它们之间的定量关系,是不切实际的.本文将根据柱透镜光栅立体显示原理,应用几何光学知识,提出一种定量计算串扰度的方法.

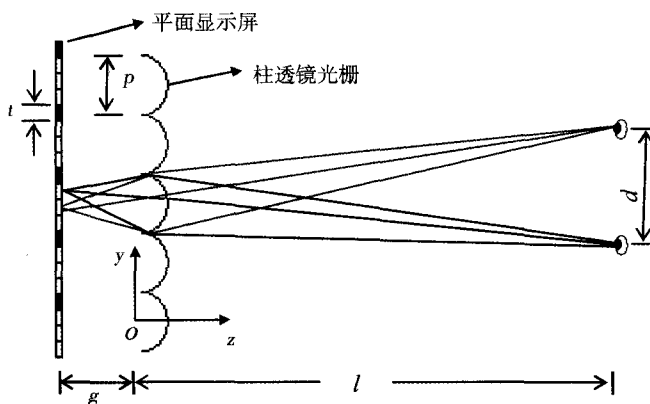


图1 柱透镜光栅立体显示的结构与原理

1 串扰度计算的理论方法

1.1 显示元件参数关系

柱透镜光栅与平面显示屏的参数需精密匹配^[8].如图1所示,设柱透镜光栅节距为 p ;光栅倾斜角度,即光栅条纹方向与平面显示屏竖直方向的夹角为 α ;光栅节点与显示屏间距离为 g ;子像素宽度为 t ;视点数为 m ;最佳观看距离为 l ;相邻最佳视点的间距为 d .根据参考文献[9],可得关系式 $p = \frac{mdt}{d+t} \cos \alpha$;另根据三角形近似关系可得 $\frac{g}{t} = \frac{l}{d}$.

1.2 视点矩阵 Q 的创建

创建一个大小为 $v \times 3u$ 的视点矩阵 Q ,其中 v 和 u 分别为平面显示屏的竖直分辨率和水平分辨率.矩阵元素 $Q_{ij} \in (1, m)$,表示显示屏上第 i 行第 j 列子像素填充的是第 Q_{ij} 幅视差图像.矩阵元素值 Q_{ij} 与合成图像

收稿日期:2015-03-30;修回日期:2015-05-25.

基金项目:国家自然科学基金(11404174);南通大学引进人才项目(03080460);南通大学自然科学类科研基金项目(13Z022);河南省教育厅科学技术研究重点项目(14A416001).

第1作者简介(通信作者):王爱红(1984—),女,江苏南通人,南通大学讲师,博士,研究方向为立体显示,E-mail:ahwang@ntu.edu.cn.

生成方法密切相关^[10],计算公式为 $Q_{ij} = m - \text{mod}((m - \delta_i) + (j - 1), m)$, 其中, $\delta_i = \text{mod}(\text{round}(3(i - 1) \tan \alpha), m)$, $\text{mod}(a, b)$ 表示 a 除以 b 后取余数, $\text{round}(a)$ 表示对 a 四舍五入取整。

1.3 视区矩阵 V 的创建

将与显示屏上边缘相交的第一个光栅单元节点作为坐标原点 o 来建立直角坐标系, 其中 x 轴平行于显示屏竖直方向, y 轴平行于显示屏水平方向, z 轴垂直于显示屏, 符合右手螺旋法则。

设观看区域为 $x_1 \leq x \leq x_2, y_1 \leq y \leq y_2, z_1 \leq z \leq z_2$, 且各边界点值为整数, 以 mm 为单位。若以 1 mm 为步长, 建立大小为 $(x_2 - x_1 + 1) \times (y_2 - y_1 + 1) \times (z_2 - z_1 + 1) \times m$ 的四维矩阵 V , 称之为视区矩阵, 用来描述观看区域内各观看点处接收到各幅视差图像信息的情况, 并将 V 的初始值设为 0。

当眼睛位于任意观看位置 (x, y, z) 时, 从该点透过每条光栅单元在显示屏上看到的图像呈一条线段, 该线段与光栅具有相同的斜率。以第一个光栅单元为例, 所看到的线段与显示屏上第一行像素上边缘的交点坐标为 $(0, y_0, -g)$, 与显示屏第 v 行像素下边缘的交点坐标为 $(3u, 3u \tan \alpha + y_0, -g)$, 其中 $y_0 = \frac{gx \tan \alpha - gy}{z}$ 。该线段与合成图像中各幅视差图像子像素相交的情形是复杂的, 很难用公式直接表述出来。

因此, 可考虑在该线段上采样 N 个点, 并由这 N 个点的坐标推导出这些点分别属于显示屏上哪个子像素, 进而利用视点矩阵 Q 可得到该子像素中填充的是第几幅视差图像。若子像素填充的是第 k 幅视差图像, 则将 $V(x - x_1 + 1, y - y_1 + 1, z - z_1 + 1, k)$ 的数值加 1。针对每条光栅单元作如上处理, 最终得到的视区矩阵 V 则描述了观看区域内各观看点处接收到各幅视差图像信息的情况。

1.4 串扰度计算公式

已知在观看点 (x, y, z) , 透过柱透镜光栅看到各幅视差图像的信息量存储在向量 $V(x - x_1 + 1, y - y_1 + 1, z - z_1 + 1)$ 中, 向量元素 $V(x - x_1 + 1, y - y_1 + 1, z - z_1 + 1, k)$ 表示在观看点 (x, y, z) 处透过光栅看到第 k 幅视差图像的信息量, 其中 $k = 1, 2, \dots, m$ 。本文作如下定义: 若 $V(x - x_1 + 1, y - y_1 + 1, z - z_1 + 1, k)$ 为向量 $V(x - x_1 + 1, y - y_1 + 1, z - z_1 + 1)$ 的最大值, 且与向量 $V(x - x_1 + 1, y - y_1 + 1, z - z_1 + 1)$ 中各向量元素和的比值大于 0.5 时, 则认为观看点 (x, y, z) 为第 k 幅视差图像的视点。若该比值小于 0.5, 则认为观看点 (x, y, z) 不是理想的观看视点。

将观看视点处接收到的串扰图像亮度与非串扰图像亮度的比值定义为串扰度 χ 。设显示屏上各像素均匀发光, 观看点 (x, y, z) 为第 k 幅视差图像的视点, 则串扰度公式可简化为

$$\chi = \frac{\sum_{i \neq k} V(x - x_1 + 1, y - y_1 + 1, z - z_1 + 1, i)}{V(x - x_1 + 1, y - y_1 + 1, z - z_1 + 1, k)}.$$

当 $\chi = 0$ 时, 无串扰; 当 $\chi = 1$ 时, 串扰最大, 此时在观看点处看到的图像中串扰图像占据了一半。

2 实验验证

针对一台 4 视点柱透镜光栅立体显示器, 将采用本文提出的方法得到的结果与实验测量的结果进行比较, 来验证本文所提出的方法的正确性。该立体显示器主要参数如下: 平面显示屏分辨率为 1680×1050 , 显示屏大小约为 $474 \text{ mm} \times 296 \text{ mm}$, 子像素宽度为 0.094 mm , 立体分辨率为 840×525 , 光栅栅距为 0.3629 mm , 光栅倾斜角度为 14.88° , 最佳观看距离为 1500 mm 。

2.1 实验测量结果

在立体显示器上显示 1 幅黑白测试图, 其制作方法是第 1 幅视差图像设置为白色图像, 其他 3 幅视差图像设置为黑色图像, 按倾斜角度生成合成图像并将其显示在显示屏上。然后, 在暗室中用亮度计在各观看点上测量相应亮度值。亮度计在 $x=150 \text{ mm}, -250 \text{ mm} \leq y \leq 750 \text{ mm}, z=1500 \text{ mm}$ 区域内移动, 移动间隔为 4 mm , 这样就得到了 251 个亮度值。另外, 在显示屏上显示一幅全黑的图像, 同样在暗室中用亮度计测量一组亮度值, 用来消除环境光的影响。经数学处理后得到归一化的视区分布图, 如图 2 所示。

2.2 仿真计算结果

采用本文提出的计算方法, 得到 $x=150 \text{ mm}, -250 \text{ mm} \leq y \leq 750 \text{ mm}, z=1500 \text{ mm}$ 观看区域内各幅视

差图像的归一化视区分布曲线,如图 3 所示.

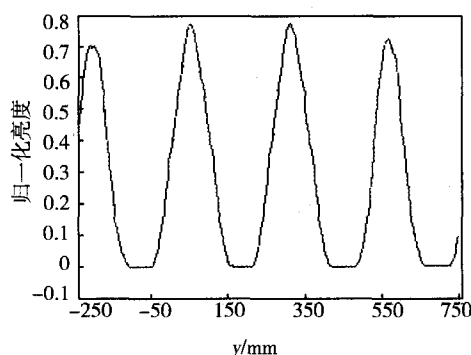


图2 实验测量得到的视差图像1的视区分布

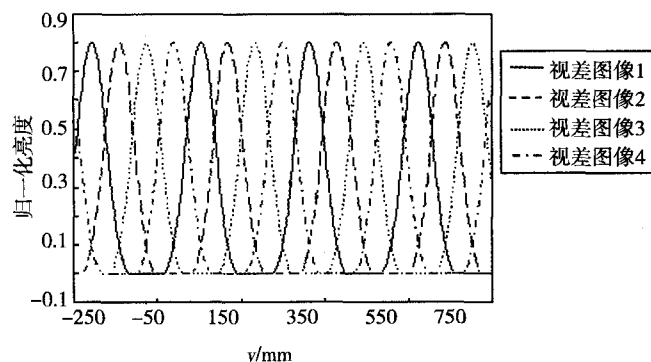


图3 仿真计算得到的各幅视差图像的视区分布

2.3 结果分析

通过对图 2 和图 3 的比较,可发现由计算得到的视区分布与实验测量得到的视区分布基本近似.在最佳观看距离上,同一视差图像的两个相邻视区间的间隔约为 260 mm,单个视区宽度约为 65 mm.有 2 点主要差异.1)视区分布在 y 轴方向有一定的偏移.这是由于在立体显示器实物中,第一个柱透镜光栅单元的左上角并不是与第一个子像素的左上角对齐的,而是在 y 轴方向有一定的偏移量.2)两边视区的相对亮度稍小一些.这是因为在仿真计算中,假设像素向各个方向传播的光线的亮度是均匀的.总之,仿真结果与实验测量结果是基本吻合的.

基于串扰度计算公式,得到相应的串扰度分布如图 4 所示.

同样,采用本文所提出的仿真计算方法,并将串扰度阈值定为 0.5,得到在 $x = 150$ mm, -250 mm $\leq y \leq 750$ mm, $1\,000$ mm $\leq z \leq 2\,500$ mm 观看区域内各幅视差图像的最佳观看视区分布,如图 5 所示.图 5 中各视区分布图的左上角、右上角、左下角及右下角点的 (y, z) 坐标分别为 $(-250, 1000)$ 、 $(750, 1000)$ 、 $(-250, 2500)$ 及 $(750, 2500)$.当观看者左右眼分别位于两幅视差图像的视区中时,就可感知到立体效果.需要注意的是,当观看距离较远时,相邻两幅视差图像的视区间距将超过人两眼的瞳孔间距.

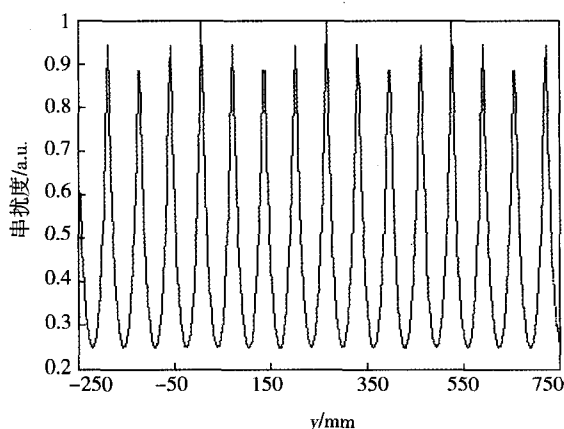


图4 串扰度分布图

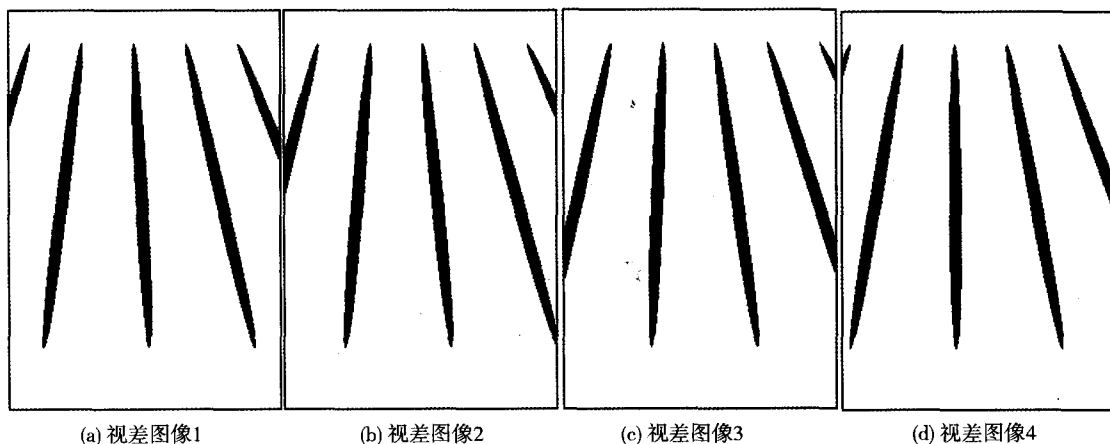


图5 当串扰度阈值定为0.5时各幅视差图像的最佳视区分布

3 结论

本文提出了一种串扰度的计算方法,通过比较发现实验测量结果与计算结果相近,从而验证了该方法的有效性.在该计算方法中,视点矩阵与倾斜角度和视点数相关,视区矩阵与观看位置和视点矩阵相关,而串扰度计算公式又是基于视区矩阵,从而可用于分析光栅倾斜角度、视点数、合成图像生成方法及观看位置等因素对串扰的影响,且在定义串扰度阈值的基础上可确定出立体显示器的最佳立体观看区域.

参 考 文 献

- [1] Dodgson N A. Autostereoscopic 3D displays[J]. Computer, 2005, 38(8): 31-36.
- [2] 王琼华. 3D 显示技术与器件[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [3] Ezhov V. Optical layout of autostereoscopic display that simultaneously reproduces two views each with full-screen resolution[J]. Appl Optics, 2014, 53(36): 8449-8455.
- [4] Yun J D, Kwak Y, Yang S. Evaluation of perceptual resolution and crosstalk in stereoscopic Displays[J]. J Disp Technol, 2013, 9(2): 106-111.
- [5] Lee K H, Park Y, Lee H, et al. Crosstalk reduction in autostereoscopic projection 3D display system[J]. Opt Express, 2012, 20(18): 19757-19768.
- [6] 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.
- [7] Ukai K, Howarth P A. Visual fatigue caused by viewing stereoscopic motion images: background, theories, and observations[J]. Displays, 2008, 29: 106-116.
- [8] 周 磊, 陶宇虹, 王琼华, 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.
- [9] Wang Aihong, Wang Qionghua, Li Xiaofang, et al. Combined lenticular lens for autostereoscopic three dimensional display[J]. Optik, 2012, 123(2012): 827-830.
- [10] Zhao Wuxiang, Wang Qionghua, Li Dahai, et al. Pixel arrangement of autostereoscopic liquid crystal displays based on parallax barriers [J]. Mol Cryst Liq Cryst, 2009, 507(1): 67-72.

Crosstalk Ratio of the Lenticular-lens-based Autostereoscopic Display

WANG Aihong¹, LI Xiaofang², TAO Miaomiao¹, JIANG Yanrong²

(1. School of Science, Nantong University, Nantong 226019, China;

2. College of Physics and Electronic Engineering, Henan Normal University, Xinxiang 453007, China)

Abstract: In order to realize the quantitative analysis of the crosstalk in the lenticular-lens-based autostereoscopic display, a crosstalk ratio calculation method is proposed. Firstly, a viewing point matrix is created. Values of the matrix represent that the corresponding parallax images are filled to the subpixels in the screen. Secondly, based on the geometrical optics and the viewing point matrix, a viewing zone matrix is obtained. Values of the matrix represent the amount of information of each parallax image. Finally, the crosstalk ratio calculation formula is deduced. The proposed calculation method is proved by the experiment. It can be used to analyze the affects of the factors, such as the tilt angle of lenticular lens, the view number, and the viewing position, on the crosstalk. And once the crosstalk ratio threshold is defined, the optimal viewing zone can be determined.

Keywords: autostereoscopic display; crosstalk; lenticular lens; stereoscopic viewing zone