

柱透镜光栅式裸眼三维显示系统视区分析

doi:10.3969/j.issn.1674-7100.2020.01.012

王佳玮 马桃林

武汉大学

印刷与包装系

湖北 武汉 430079

摘要:分析基于柱透镜光栅的裸眼立体显示系统,并建立明确的观察区域几何模型。首先建立了柱透镜光栅式裸眼3D显示系统观察区域的几何模型,研究了柱透镜光栅板的分光作用,分析了柱透镜参数和观察距离、观察视角之间的关系;然后通过建立的几何模型,对形成的观察区域进行分析,得出了观察范围的表达式以及柱透镜参数、显示屏参数和观察范围之间的关系;最后引用质量因子概念结合主观评测方法对两台裸眼3D显示设备形成的观察区域内的图像质量进行评价。实验结果表明:根据建立的几何模型可以计算出裸眼3D显示器的最佳观察区域。本模型为自由立体显示器的最优设计和具体实现提供了参考。

关键词:柱透镜光栅;裸眼3D;观察区域

中图分类号: TN873

文献标志码: A

文章编号: 1674-7100(2020)01-0082-09

引文格式:王佳玮,马桃林.柱透镜光栅式裸眼三维显示系统视区分析[J].包装学报,2020,12(1):82-90.

0 引言

随着科技的发展,人们对显示技术的要求已不再满足于平面显示,而是期待能够体验更真实的三维空间视觉效果,因此立体显示技术^[1]应运而生。裸眼3D能使观察者在不用任何辅助工具(如3D眼镜、头盔)下,获得更加轻捷、方便的观察体验。基于此特点,裸眼3D受到了业界的广泛关注。

光栅式裸眼3D显示技术是将特殊的光学元器件置于平面显示屏前,在光学元器件的引导下,将多个视图信息在空间分离,并投影到显示屏前的相应区域内,观察者看到两个略有差异的图像信息后,会在大脑进行融合处理,形成立体视觉。对于大多裸眼3D显示装置,最佳观察区域受观察距离和角度的影响。不同视图信息的光线经过柱透镜折射后,需要通过一

定的空间距离才会被完全分离,这导致形成的观察区域比较复杂^[2]。目前对于裸眼3D的研究,还没有建立明确的观察区域几何模型。显示系统的观察区域范围通常是通过实际测量来确定,如果不符合设计要求,就需要对设备进行再设计和再制造^[3]。因此,建立裸眼3D显示立体观察区域的几何模型,对于指导显示系统的设计具备重要的参考价值。本研究从理论上对柱透镜光栅式裸眼3D显示器的观察区域进行分析,以期为自由立体显示器的最优设计和具体实现提供研究基础。

1 裸眼3D柱透镜特性分析

柱透镜光栅板是裸眼3D显示器的重要元件,可以将其形容为用传统的3D眼镜戴在显示器上。因此

收稿日期:2019-11-12

作者简介:王佳玮(1995-),女,河北石家庄人,武汉大学硕士生,主要研究方向为包装与环境工程,

E-mail: 373642796@qq.com

通信作者:马桃林(1968-),男,湖北武汉人,武汉大学教授,主要从事柔性印刷电子、图像传播方面的研究,

E-mail: mtl1968@whu.edu.com

柱透镜光栅对整个裸眼 3D 系统的视觉体验起着决定性的作用, 其材料、性能以及技术参数的不同都将直接影响立体显示效果。柱透镜光栅板是由无数个完全相同的单柱透镜单元在同一平面上依次排列组成^[4]。在排列方向上, 柱透镜对光线起会聚作用, 相当于会聚柱透镜可以聚光成像; 而在垂直方向上, 柱透镜对光线不起会聚作用, 光线沿直线传播^[5]。

1.1 双目视觉模型及视角计算公式

人的双眼是水平分布, 因而以双眼的水平方向作为 X 轴, 以人竖直站立的方向作为 Y 轴, 以眼睛的正前方方向作为 Z 轴, 建立空间坐标系 $O-XYZ$, 如图 1 所示。

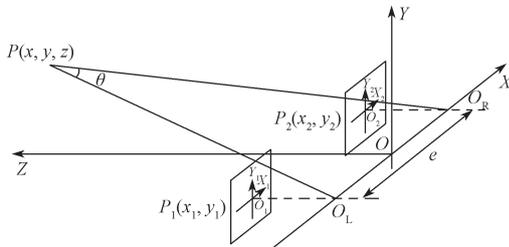


图 1 双目立体视觉几何模型

Fig. 1 Binocular stereo vision geometric model

图 1 中, O_L 表示左眼所在点; O_R 表示右眼所在点; $O_1-X_1Y_1Z_1$ 表示左眼的像平面坐标系, 左眼成像 $P_1(x_1, y_1)$ 位于该平面内; $O_2-X_2Y_2Z_2$ 表示右眼的像平面坐标系, 右眼成像 $P_2(x_2, y_2)$ 位于该平面内; e 表示两眼间距, 一般取值 65 mm。根据各坐标位点的空间几何关系, 可得视角公式

$$\theta = \arctan \frac{x + \frac{e}{2}}{\sqrt{y^2 + z^2}} - \arctan \frac{x - \frac{e}{2}}{\sqrt{y^2 + z^2}} \quad (1)$$

1.2 柱透镜分光特性

如图 2 所示为单个柱透镜单元光路图。显示屏放在柱透镜焦平面上, OO' 表示光轴方向, y 表示像平面上的任意位置, p 表示栅距, d 表示柱透镜厚度, δ 表示传输方向角, C 表示节点, q 表示节点到焦平面的距离。

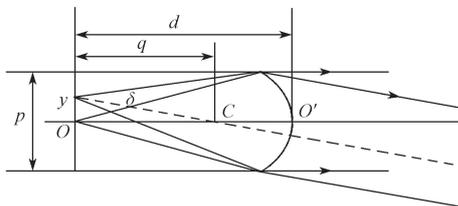


图 2 柱透镜光路图

Fig. 2 Optical path diagram of the lenticular lens

当 y 位于像平面任意一点时, 在柱透镜作用下, 光线以一定的传输角发射。根据图 2, 传输方向角计算如下:

$$\delta = \arctan \frac{y}{q} \quad (2)$$

由柱透镜的光学原理可推导出

$$\delta = \arctan \frac{(n-1)y}{(n-2)r} \quad (3)$$

式中: n 为折射率; r 为柱透镜单元的曲率半径。

根据式 (3) 得到, 在柱透镜的折射作用下, 像平面上任意位置发出的光都会形成平行光束, 并且携带不同的像素信息沿各自不方向传输。这些平行光束拥有同样的宽度值即 $p/\cos\delta$ 。

1.3 单柱透镜的光传输特性

图 3 是单个柱透镜示意图^[6-7]。将柱透镜的球面顶点选作坐标系原点, 其光轴作为 X 轴。假定 F 是柱透镜的第一焦点, H 是第一主点, 其在 X 轴的坐标为 X_H , f 是第一焦距; F' 是柱透镜的第二焦点, H' 是第二主点, H' 和原点 O 重合, f' 是第二焦距。从像平面上焦点 F' 形成的光线与光轴成 θ 角, 最终落入位于点 (D, v) 处的人眼中。由图中的几何关系, 可推出像平面上距光轴 h 的点与眼睛位置 (D, v) 之间的关系,

$$h = f' \frac{v}{D} \quad (4)$$

由式 (4) 可以延伸任何视图像素点位置和双眼位置的关系。

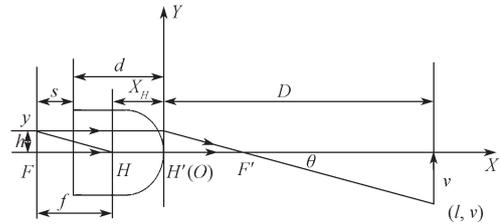


图 3 单柱透镜示意图

Fig. 3 Schematic diagram of a single cylinder lens

2 裸眼 3D 柱透镜参数分析

2.1 柱透镜光栅参数设计

根据以上对柱透镜单元的分析, 建立关于柱透镜光栅板和像平面的坐标系, 如图 4 所示。将位于中间的柱透镜顶点选为原点 O , 液晶屏到柱透镜光栅板的距离为 s , 子像素宽度为 t , 人眼到柱透镜光栅板的距离为 D , 双眼间距为 e , 光栅板中心的柱透镜代码

为0, 向上的柱透镜代码依次为1, 2, ..., k , 向下的依次为-1, -2, ..., $-k$ 。像平面上两个相邻的子像素图像经过柱透镜折射后, 到达位于1处的两眼中, 从而感知到立体视觉。

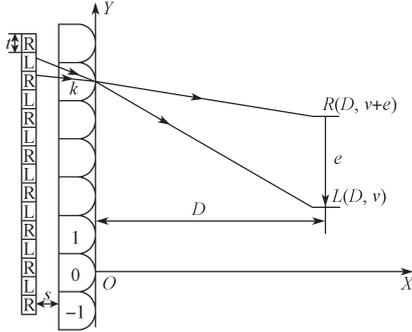


图4 裸眼3D显示基本模型

Fig. 4 Basic model of naked eye 3D display

2.1.1 曲率半径 r

设右眼R的坐标为 $(D, v+e)$, 其看到第 k 个柱透镜后的一个像素点信息, 该点距离 X 轴的高度为 h_R ; 左眼L的坐标为 (D, v) , 其看到第 k 个柱透镜后的另一个像素点信息, 该点距离 X 轴的高度为 h_L 。通过计算得

$$h_L - h_R = f' \frac{e}{D} \quad (5)$$

为了使相邻像素点的信息分别落入人的左、右眼, h_L 和 h_R 的差值应等于子像素间距 t ^[8], 从而得出

$$r = \frac{t \cdot D \cdot (n-1)}{e} \quad (6)$$

由式(6)可知, 柱透镜的曲率半径 r 和子像素宽度 t 、观察距离 D 有关。

2.1.2 栅距 p

当进行多视点显示时, 令视图个数为 m 。为了实现立体显示, 栅距 p 和子像素宽度 t 存在如下关系^[9]:

$$p < mt \quad (7)$$

显示器均独立地驱动, 对用户的双眼分别产生两幅具有细微差别的图像, 以形成立体视觉。立体视觉模型要求对两个视点分别进行计算, 生成左眼和右眼视图, 因而需要两个投影中心。

当人的左右眼位于 X 轴两侧时, 两只眼睛分别获取的是 m 个视图中的两个图像信息, 如图5所示。取 $v=e/2$, 则右眼 $(D, e/2)$ 到第 k 个柱透镜光轴的距离 h_R 为

$$h_R = \frac{t}{e} \left(k \cdot p - \frac{e}{2} \right) \quad (8)$$

第 k 个柱透镜光轴后的子像素点纵坐标 y_R 为

$$y_R = k \cdot p + h_R = \frac{e+t}{e} k \cdot p - \frac{t}{2} \quad (9)$$

人双眼能看到的第 k 个柱透镜后面的子像素点纵坐标范围为 $(m \cdot k \cdot t - t, m \cdot k \cdot t)$, 因此 y_R 的取值为

$$m \cdot k \cdot t - t < y_R < m \cdot k \cdot t \quad (10)$$

根据式(9)和式(10)可得

$$\frac{m \cdot e \cdot t}{e+t} - \frac{e \cdot t}{2k(e+t)} < p < \frac{m \cdot e \cdot t}{e+t} + \frac{e \cdot t}{2k(e+t)} \quad (11)$$

显示器的宽度用 W 表示, 得到

$$\frac{m \cdot e \cdot t}{e+t} - \frac{m \cdot e \cdot t^2}{W(e+t)} < p < \frac{m \cdot e \cdot t}{e+t} + \frac{m \cdot e \cdot t^2}{W(e+t)} \quad (12)$$

根据式(12)可得柱透镜栅距的理想值为

$$p = \frac{m \cdot e \cdot t}{e+t} \quad (13)$$

可见栅距 p 的上下浮动为 $\frac{m \cdot e \cdot t^2}{W(e+t)}$ 。 p 的取值和视点个数 m 、子像素宽度 t 有关。

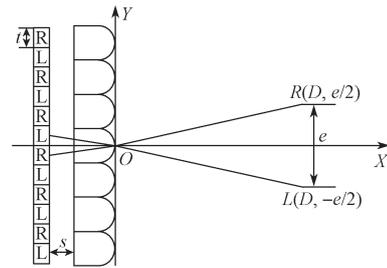


图5 双眼位于 X 轴两侧示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the eyes on both sides of the X -axis

2.1.3 厚度 d

液晶显示屏到柱透镜光栅板的距离为 s , 可得

$$s + |X_H| = |f| \quad (14)$$

根据计算得

$$d = \frac{n \cdot r}{n-1} - n \cdot s \quad (15)$$

根据以上几何关系, 得到了柱透镜曲率半径 r 、栅距 p 、厚度 d 的计算公式。这些公式可用于设计和裸眼3D显示器相匹配的柱透镜光栅板。

2.2 柱透镜光栅参数之间的关系

柱透镜光栅参数分为宏观参数和微观参数两大类^[10]。宏观参数包括: 光栅板线数 LPI、视角 φ 和观察距离 D 。微观参数包括: 柱透镜单元的折射率 n 、曲率半径 r 、栅距 p 、厚度 d 、焦距 f 、透射率 τ 。参数关系示意图如图6所示。图中, $2a$ 为双眼瞳距, X' 为一个柱透镜包含的子像素个数, p/X' 为一个子像素

宽度, 即 $p/X'=t$, θ_1 为入射光线角度, θ_2 为出射光线角度, 单个子像素的最大视角 φ 为 $2\theta_2$ 。

根据图中几何关系, 可得观察距离 D 和视角 φ 的表达式:

$$\varphi = 2\arcsin \left[n \sin \left(\arctan \frac{-p(n-1)}{2X' \cdot n \cdot r} \right) \right]; \quad (16)$$

$$D = \frac{e}{\tan \left\{ \arcsin \left[n \sin \left(\arctan \frac{-p(n-r)}{2X' \cdot n \cdot r} \right) \right] \right\}}. \quad (17)$$

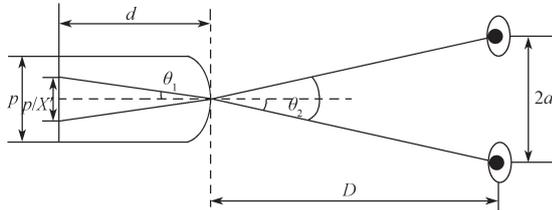


图 6 参数关系示意图

Fig. 6 Schematic diagram of lenticular grating parameter relationship

2.3 柱透镜参数对立体效果的影响

2.3.1 曲率半径 r 和观察距离 D 的关系

由式(6)可以发现, 曲率半径 r 与观察距离 l 、子像素宽度 t 有关。所以, 可以依据显示屏前的观察距离 l 来计算 r 。假设 $t=2.6$ mm, $n=1.5$, $e=65$ mm。曲率半径 r 和观察距离 D 的关系曲线如图 7 所示。由图可知, 随着观察距离的增大, 曲率半径 r 增大, 柱透镜对子像素的放大效果越小。

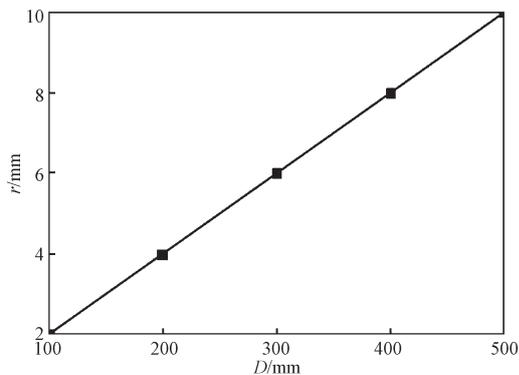


图 7 曲率半径 r 和观察距离 D 的关系曲线

Fig. 7 Curve of curvature radius r and observation distance D

2.3.2 折射率 n 和观察距离 D 、视角 φ 的关系

按照曲面圆弧的曲率半径 r , 可将柱透镜分成宽角度和窄角度两类。对于宽角度柱透镜而言, 其曲率半径 r 相对较小, 柱透镜的厚度较大。而对于窄角度

柱透镜, 其曲率半径 r 相对较大, 柱透镜的厚度较小。因此, 两种柱透镜光栅的分像特性存在一定差异。

柱透镜光栅板是由多个柱透镜组成, 其凸起的一面是圆形曲面, 所以栅距 p 与曲率半径的关系为 $p \leq 2r$ 。当栅距 p 与曲率半径 r 的比值为 2 时, 柱透镜截面为半圆型; 当柱透镜的曲率半径 r 为定值时, 逐渐减小栅距, 或者当柱透镜的栅距 p 为定值时, 逐渐增大曲率半径 r , 即 $p/r < 2$, 柱透镜的截面为扁平型, 如图 8 所示。柱透镜截面越扁平, p/r 越小, 视角 φ 越小; 当柱透镜截面为半圆型时, 视角 φ 达到最大。

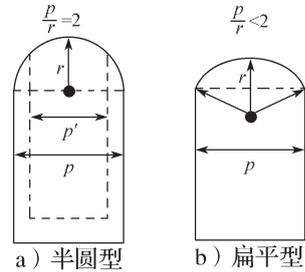


图 8 柱透镜曲面的形状

Fig. 8 The shape of the cylindrical lens surface

1) 当 $p/r=2$ 时, 视角 φ 、观察距离 D 与柱透镜光栅的折射率 n 的关系如下:

$$\varphi = 2\arcsin \left[n \sin \left(\arctan \frac{-(n-1)}{X' \cdot n} \right) \right], \quad (18)$$

$$D = \frac{e}{\tan \left\{ \arcsin \left[n \sin \left(\arctan \frac{-(n-r)}{X' \cdot n} \right) \right] \right\}}. \quad (19)$$

假设视图个数为定值, 折射率 n 和视角 φ 的关系如图 9 所示。

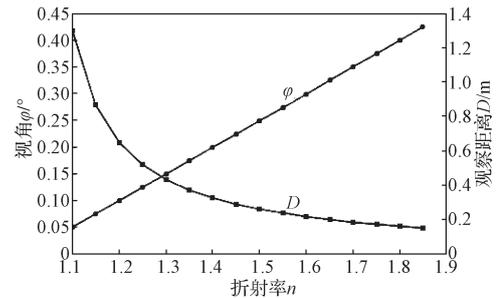


图 9 视角和观察距离与折射率的函数曲线

Fig. 9 curves of viewing angle, viewing distance and refractive index

2) 不同 p/r 值 (0.1, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0) 的视角和折射率的关系曲线如图 10 所示。由图可知, 折射率 n 和视角 φ 成正比例关系; p/r 越大, 视角 φ 越大; 当折射率 n 为定值时, 视角 φ 和 p/r 值成正比例关系。

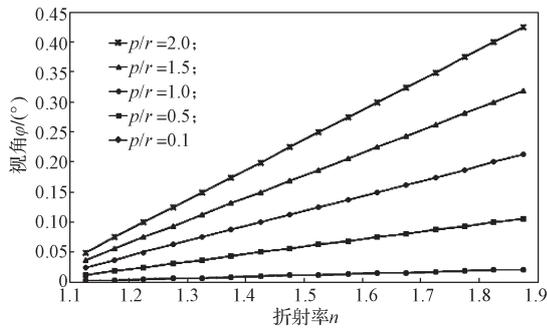


图 10 不同 p/r 值的视角 φ 和折射率 n 的关系曲线图
Fig. 10 Curves of viewing angle φ and refractive index n with different p/r ratios

3 最佳观察距离处的视区分析

对于双视点裸眼 3D 显示系统而言，其观察视区很小，即使在最佳观察距离上，获得正确立体图像的概率仅有 1/2。对于多视点立体显示而言，视点越多，获取正确立体图像的概率越大，观察角度越广，多人就能同时观察，但图像分辨率随之降低。

3.1 视区的成因分析与几何建模

视区是由对应于像平面上不同视图的子区域组成^[11]。为了使观察者的双眼能感知两个不同的视图信息，子区域宽度应不大于人眼瞳距。在形成的视区内，观察者可以通过移动双眼获取来自其他视图的信息，从而产生运动视差。多视点裸眼 3D 显示系统能同时提供双目视差和运动视差^[12]，从而给观察者带来了更多的自由度和更好的观察感受。

图 11 是柱透镜光栅式 4 视点 3D 显示系统观察视区的示意图。

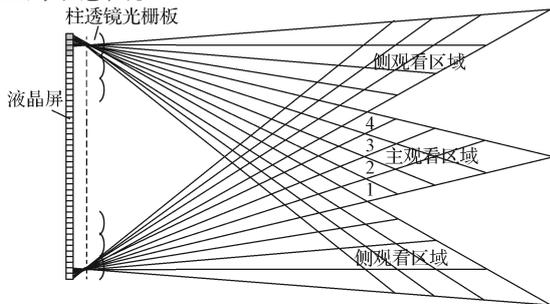


图 11 4 视点视区示意图

Fig. 11 Schematic diagram of 4 viewpoints viewing zone

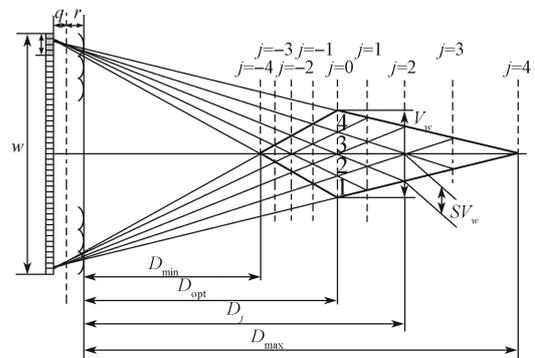
观察者在主观察视区内，只能看到单个视图的信息，而在其他视区，会接收多幅视图的图像信息，形成的立体视觉受到严重影响。在最佳观察距离处，4 个子视区的宽度总和构成了主观察视区的宽度。

对于 4 视点裸眼 3D 显示，取垂直于显示面板的方向为 Z 轴，建立几何模型，如图 12 所示。图 12a 中，

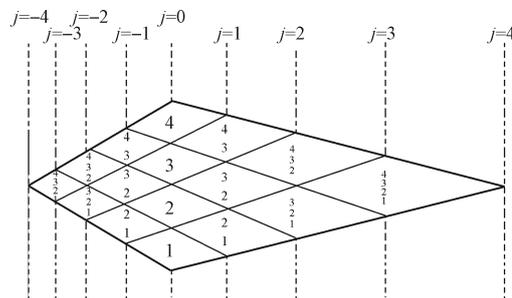
t 为子像素宽度， W 为显示屏宽度， V_w 为主观察视区的宽度， SV_{wj} 为第 j 列子视区的宽度， q 为节点到像平面的距离， D_{opt} 为距离显示屏的最佳位置， D_{max} 为距离显示屏的最远位置， D_{min} 为距离显示屏的最近位置， j 为第 j 列观察视区， D_j 表示第 j 列子视区到显示屏的距离。用 H_j 表示第 j 列子视区在 Z 轴的深度。通常情况下， D_{opt} 由设计提供。根据图中几何关系，可以推导 D_{max} 和 D_{min} 的表达式，即

$$D_{min} = \frac{W}{W + V_w} D_{opt}, \quad (20)$$

$$D_{max} = \frac{W}{W - V_w} D_{opt}. \quad (21)$$



a) 几何模型



b) 子视区

图 12 主观察视区

Fig. 12 The main viewing area

图 12b 中，数字对应的是视图的序号。在 $j=0$ 列处是最佳观察位置，每个子视区内只能获取单个视图信息；而在 $j \neq 0$ 列，每个子视区内能获取 $|j|+1$ 个视图信息^[13]。在子视区内获取的视图数越少，表示该区域感知到的立体视觉效果越好。因此， $|j|$ 越大，立体效果越差。

假设 SV_w 为第 0 列子视区宽度， $SV_w = V_w/4$ 。由图中的几何关系可得：

$$D_j = \frac{W}{W - j \cdot SV_w} D_{opt}, \quad (22)$$

$$SV_{wj} = \frac{W}{W - j \cdot SV_w} SV_w, \quad (23)$$

$$H_j = \frac{2W \cdot SV_w}{(W - j \cdot SV_w)[W - (j-2)SV_w]} D_{opt}. \quad (24)$$

通过对观察区域的分析, 得出了以上观察范围的表达式, 根据表达式可规划观察区域的分布。

3.2 影响主观察视区的因素

3.2.1 子视区宽度 SV_{wj}

为了让左右眼处在不同子视区, 子视区宽度不能超过两眼间距, 即 $SV_{wj} \leq e$ 。 e 取值为 65 mm。

主观察视区中距离显示屏最远的子视区列用 j_{max} 表示,

$$j_{max}(SV_w, W) = \frac{65 - SV_w}{65SV_w} W, \quad j_{max} \in \mathbf{Z}. \quad (25)$$

从式 (25) 可知, j_{max} 和 D_{opt} 处的子视区宽度 SV_w 成反比关系, 和显示屏宽度 W 成正比关系。本文分析的是 4 视点显示, 所以 $j_{max}=4$ 。第 j 列视区到显示屏的最远距离 D_{jmax} 为

$$D_{jmax}(SV_w, D_{opt}) = \frac{65D_{opt}}{SV_w}. \quad (26)$$

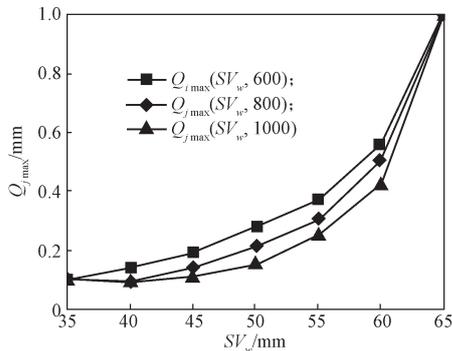
可见, D_{jmax} 与 D_{opt} 成正比关系, 与 SV_w 成反比关系, 不受显示器宽度 W 的影响。

3.2.2 质量因子 Q

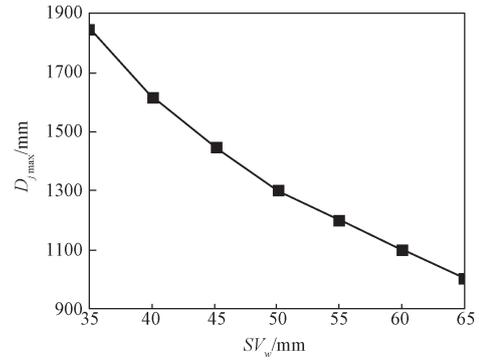
由于 $|j|+1$ 个视图经过复合形成了第 j 列视区的图像信息, 因此, 在评价某一特定位置的图像质量好坏时, 可以利用视图数的倒数来进行评估, 即文献 [8] 中提到的质量因子 Q , $Q=1/(|j|+1)$ 。 Q_{jmax} 与 W 、 SV_w 有关, 即

$$Q_{jmax}(SV_w, D_{opt}) = \frac{65SV_w}{65(W - SV_w) - W \cdot SV_w}. \quad (27)$$

假设 $D_{opt}=1000$ mm, Q_{jmax} 、 D_{jmax} 与 SV_w 的关系如图 13 所示。



a) Q_{jmax} 和 SV_w 的关系图



b) D_{jmax} 和 SV_w 的关系图

图 13 Q_{jmax} 、 D_{jmax} 和 SV_w 的关系图

Fig. 13 Relationship between Q_{jmax} 、 D_{jmax} and SV_w

从图 13 可以看出, 当 W 分别取 600, 800, 1000 mm 时, Q_{jmax} 和 SV_w 成正相关。 SV_w 较大时, 在一定的观察距离范围内立体效果较好; SV_w 较小时, 观察距离范围较大。因此, 可根据不同需要来设计 SV_w 的大小。

3.2.3 显示器参数和柱透镜参数

图 14 为柱透镜的光传输特性图。

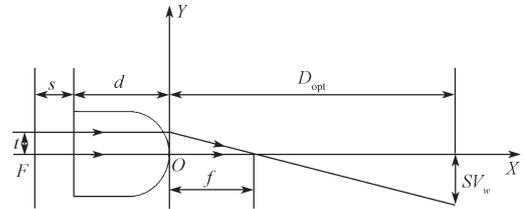


图 14 柱透镜的光传输特性

Fig. 14 Optical transmission characteristics of cylindrical lenses

根据相似三角形原理, 可得如下关系:

$$SV_w = \frac{t \cdot D_{opt}}{f}. \quad (28)$$

由式 (20) (22) (24) (26) 可得:

$$D_{min} = \frac{f \cdot W \cdot D_{opt}}{f \cdot W + 4t \cdot D_{opt}}, \quad (29)$$

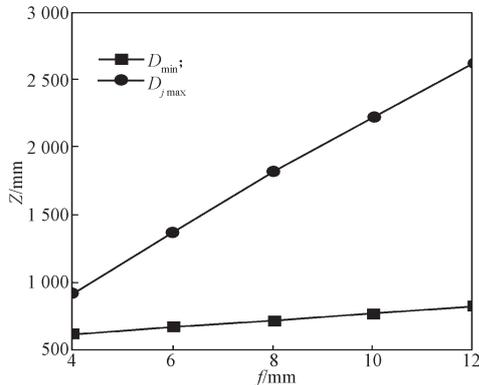
$$D_j = \frac{W \cdot f \cdot D_{opt}}{W \cdot f - j \cdot t \cdot D_{opt}}, \quad (30)$$

$$Q_j = \frac{t \cdot D_j \cdot D_{opt}}{W \cdot f |D_j - D_{opt}| + t \cdot D_j \cdot D_{opt}}, \quad (31)$$

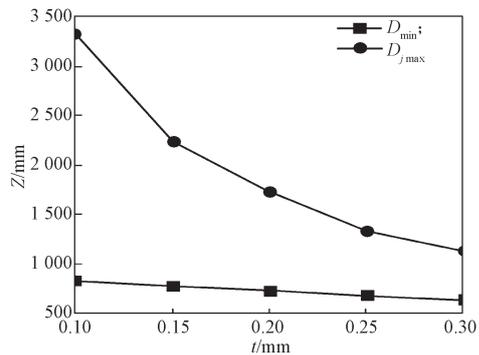
$$D_{jmax} = \frac{65f}{t}. \quad (32)$$

Z 向观察距离与焦距 f 、子像素宽度 t 的关系曲线如图 15 所示。由图可以看出, 当 $W=1000$ mm, $D_{opt}=1000$ mm, $t=0.18$ mm, 其他条件一定时, 随着

焦距 f 的增加, $D_{j\max}$ 有明显增幅, $D_{j\min}$ 的增幅很小; 当 $W=1000$ mm, $D_{\text{opt}}=1\ 000$ mm, $f=12$ mm, 其他条件一定时, 随着 t 的增大, $D_{j\max}$ 大幅下降, $D_{j\min}$ 降幅很小。可见, 对于特定的 3D 显示器, D_{opt} 由设计给出。当 t 一定时, 焦距 f 和 Z 向观察距离成正比关系; 当柱透镜焦距 f 一定时, 子像素宽度 t 和 Z 向观察距离成反比关系。



a) Z 与 f 的关系图



b) Z 与 t 的关系图

图 15 Z 向观察范围的影响因素

Fig. 15 Influencing factors of Z -direction observation range

3.3 主观察视区的几何模型

主观察视区范围和柱透镜光栅参数、显示器参数之间的几何关系如下:

$$SV_{wj} = \frac{D_{\text{opt}}}{\frac{f}{t} - \frac{j \cdot D_{\text{opt}}}{W}}, \quad (33)$$

$$H_j = \frac{2D_{\text{opt}}^2}{\left(\frac{f}{t} - \frac{j \cdot D_{\text{opt}}}{W}\right) \left[\frac{f}{t} - \frac{(j-2)D_{\text{opt}}}{W}\right]}, \quad (34)$$

$$D_j = \frac{D_{\text{opt}}}{1 - \frac{j \cdot t \cdot D_{\text{opt}}}{W \cdot f}}, \quad (35)$$

$$Q_j = \frac{D_{\text{opt}}}{\frac{f \cdot W |D_j - D_{\text{opt}}|}{t \cdot D_j} + D_{\text{opt}}}. \quad (36)$$

D_{opt} 由设计给出, 主观察视区范围和 f 、 t 、 W 有关。由式 (33)~(36) 可以看出, 当 f 、 t 一定时, W 越大, 主观察视区到显示屏的距离 D_j 越小, 子观察视区宽度 SV_{wj} 越小, 子观察视区深度 H_j 越小, 子观察视区内的质量因子 Q_j 越大。当 f 、 W 一定时, 子像素宽度 t 越大, 主观察视区到显示屏的距离 D_j 越大, 子观察视区宽度 SV_{wj} 越大, 子观察视区深度 H_j 越大, 子观察视区内的质量因子 Q_j 越大。当 t 、 W 一定时, 焦距 f 越大, 主观察视区到显示屏的距离 D_j 越小, 子观察视区宽度 SV_{wj} 越小, 子观察视区深度 H_j 越小, 子视区内的质量因子 Q_j 越小。

子像素宽度 t 和栅距 p 成正比, 因而栅距 p 对主观察视区范围的影响与子像素宽度 t 对主观察视区范围的影响一样。

3.4 主观察视区的实验结果分析

本课题组在两台裸眼立体显示器上验证了以上结论。

1) 在一台 55 寸裸眼 3D 电视上, 各子视区到显示屏的距离 D_j 和各子视区内的质量因子 Q_j 如图 16~17 所示。由图可知, 随着子视区到显示屏距离的增加, 其质量因子先增大后减小, 最佳视区范围大约在距显示屏 4000 mm 处。

2) 在一台 28 寸的裸眼 3D 显示屏上, 各子视区到显示屏的距离 D_j 和各子视区内的质量因子 Q_j 如图 18~19 所示。由图可知, 随着子视区到显示屏距离的增加, 其质量因子先增大后减小, 最佳视区范围大约在距显示屏 2 000 mm 处。

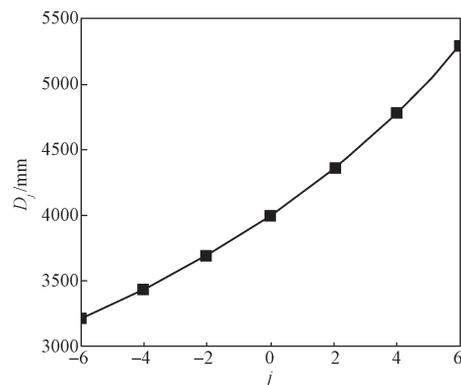


图 16 各子视区到显示屏的距离

Fig. 16 Distance from each viewport to display

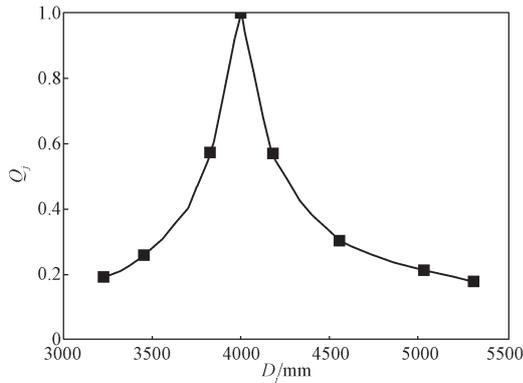


图 17 各子视区的质量因子

Fig. 17 Quality factor at each subview

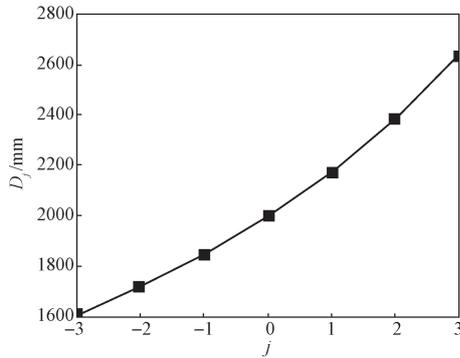


图 18 各子视区距显示屏的距离

Fig. 18 Distance from each viewport to display

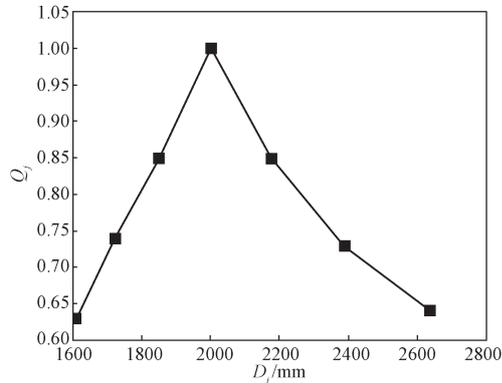


图 19 各子视区处的质量因子

Fig. 19 Quality factor at each subview

4 结语

本文先分析了柱透镜特性及其关键参数, 通过分析柱透镜参数之间的几何关系, 得出了柱透镜参数对观察距离、观察视角的影响; 其次分析了观察区域的成因, 并根据光学原理, 建立了主观察区域的几何模型, 得出了观察范围的表达式; 进一步分析了影响观察范围的主要因素, 得出了柱透镜参数、显示屏结构

参数和观察视区范围之间的几何关系, 并引用质量因子的概念来定义视区内的图像质量; 最后, 在两台裸眼 3D 显示设备上进行了验证, 分别给出了两台显示器适合人观察的区域。本研究可为裸眼 3D 显示系统的设计提供参考。

总而言之, 柱透镜光栅式裸眼 3D 显示技术具备非常好的发展前景。在裸眼 3D 产品投入使用后, 观察区域范围的确定有助于观察者在特定位置获得更好的观赏体验和视觉效果。

参考文献:

- [1] 夏新星. 水平光场三维显示机理及实现技术研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
XIA Xinxing. Principle and Establishment of Horizontal Light Field Three-Dimensional Displays[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
- [2] BOHER P, LEROUX T, BIGNON T, et al. Full Optical Characterization of Auto-Stereoscopic 3D Displays Using Local Viewing Angle and Imaging Measurements[C]//Stereoscopic Displays and Applications XX111. [S. l.]: SPIE, 2012, 8288: 82880S-1.
- [3] 侯春萍, 许国, 沈丽丽. 多视点自由立体显示串扰分析与视区仿真 [J]. 光子学报, 2014, 43(5): 0512001.
HOU Chunping, XU Guo, SHEN Lili. Analysis of Viewing Zone and Simulation of the Crosstalk Based on Multi-View Autostereoscopic Display[J]. Acta Photonica Sinica, 2014, 43(5): 0512001.
- [4] 臧东宁. 柱镜光栅式自由立体显示技术研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
ZANG Dongning. Research on Lenticular-Auto-stereoscopic 3D Display Technology[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015.
- [5] 谭祺瑞, 路海明, 卢增祥. 基于柱镜光栅的超多视点大幅面立体画设计 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2019, 59(4): 249-255.
TAN Qirui, LU Haiming, LU Zengxiang. Design of Super Multi-View Large Stereoscopic Painting Based on Lenticular Lens[J]. Journal of Tsinghua University(Science and Technology), 2019, 59(4): 249-255.
- [6] 谈健. 动态液晶透镜在三维显示技术中的应用 [D]. 上海: 上海交通大学, 2014.
TAN Jian. Dynamic Liquid Crystal Lens' Application

- in Autostereoscopic Display[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2014.
- [7] SONG Y, NI S B, TAN J, et al. A Shifting Holographic Fabrication for Switchable LC/Polymer Fresnel Lens[J]. SID Symposium Digest of Technical Papers, 2012, 43(1): 718-720.
- [8] DING S Q, JIAO Y, CHEN J Y. Optimized Design of Lenticular Lens Used on 3-D Television[C]//SID' 97. Boston: [s. n.], 1997: 979-982.
- [9] 王元庆. 光栅式自由立体显示器光学构成的理论研究[J]. 现代显示, 2003(3): 29-32.
WANG Yuanqing. Research on the Optical Principle Auto-stereo Display Base on Grid[J]. Advanced Display, 2003(3): 29-32.
- [10] 黄敏, 刘浩学. 立体印刷制作工艺光栅板参数的选择[J]. 北京印刷学院报, 2005, 13(1): 9-12.
HUANG Min, LIU Haoxue. Selection of Grating Plate Parameters for Three-Dimensional Printing Production Process[J]. Journal of Beijing Institute of Graphic Communication, 2005, 13(1): 9-12.
- [11] SON J Y, SAVELJEV V V, KIM J S, et al. Viewing Zones in Three-Dimensional Imaging Systems Based on Lenticular, Parallax-Barrier, and Microlens-Array Plates[J]. Applied Optics, 2004, 43(26): 4985.
- [12] SON J Y, SAVELJEV V V, CHOI Y J, et al. Parameters for Designing Autostereoscopic Imaging Systems Based on Lenticular, Parallax Barrier, and Integral Photography Plates[J]. Optical Engineering, 2003, 42(11): 3326.
- [13] 石顺祥, 张海兴, 刘劲松. 物理光学与应用光学[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2000: 257.
SHI Shunxiang, ZHANG Haixing, LIU Jinsong. Physical Light Words and Applied Light Words [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2000: 257.

(责任编辑: 邓彬)

Analysis on the Viewing Area of Cylindrical Lens Raster Glasses-Free 3D Display System

WANG Jiawei, MA Taolin

(School of Printing and Packaging, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

Abstract: In the glasses-free 3D stereoscopic display technology based on the cylindrical lens grating, there is no clear geometric model of the viewing area. Firstly, a geometric model of the observation area of the glasses-free 3D display system was established, and the spectroscopic effect of the lenticular grating plate was studied. The relationships between the lenticular parameters, the observation distance and the observation angle were analyzed. Then the geometrical model was used to analyze the formed observation area, and the expression of the viewing range and the relationships between the lens parameters, the display screen parameters and the viewing range were obtained. Finally, the quality factor concept was combined with the subjective evaluation method to evaluate the image quality in the viewing area of two glasses-free 3D display devices. The image quality in the observation area was evaluated. The experimental results showed that the best viewing area of the glasses-free 3D display could be calculated according to the established geometric model. This model provided a reference for the optimal design and specific implementation of free-stereoscopic displays.

Keywords: cylindrical lens raster; glasses-free 3D; viewing area