

文章编号:1007-6735(2015)02-0174-06

DOI:10.13255/j.cnki.jusst.2015.02.015

基于汇聚面对 3D 影像观影舒适性影响的研究

戴 正

(上海出版印刷高等专科学校 出版与传播系,上海 200093)

摘要: 分析汇聚面与舒适性的关联性是研究汇聚面对 3D 影像观影舒适性影响的基础,通过从摄像机汇聚面参数、影像创作中的视觉语言的表现方式、3D 影像的观看条件这 3 方面发现汇聚面对观影舒适性所产生的影响,整理汇聚面与感知深度、视差距离值、物镜间距等之间的关联依据,总结出在拍摄、非线性编辑、放映这 3 个环节中,汇聚面参数调整的规律和方法.通过实验获取汇聚面参数调整的有效数据范围,为制作出具有观看舒适性的 3D 影像作品提供了必要的依据.

关键词: 3D 影像; 汇聚面; 感知深度; 观影舒适性

中图分类号: TB 89 **文献标志码:** A

Influence of Convergence Side on 3D Image Viewing Comfort

DAI Zheng

(School of Publishing and Communication, Shanghai Publishing and Printing College, Shanghai 200093, China)

Abstract: The convergence side is a standard to distinguish 2D images from 3D images and is a key element for the viewing comfort of 3D images. Analyzing the relationship between the convergence side and viewing comfort makes the foundation of the study. The influence of convergence side on viewing comfort was analyzed from the aspects of convergence side camera parameters, visual language expression in image creation and viewing condition of 3D images. The relevance between convergence side and perception depth, parallax distance, objective lens spacing etc. was obtained. On these bases, the rules and methods for adjusting convergence side parameters in the processes of shooting, non-linear editing and showing were summed up. Through experiments, the valid data range for convergence side parameters adjustment was obtained. The results provide necessary basis for creating 3D video works with viewing comfort.

Key words: 3D image; convergence side; perception depth; viewing comfort

科学界对立体视觉的研究已形成了独立的生理光学学科,其研究结果认为:人类的立体视觉依赖深度感知因素.人的两只眼睛在看实际影像时,会产生两个焦点:一个是眼睛的聚焦点,决定影像的对焦清

晰度;另一个是眼睛光轴的汇聚点,汇聚点决定了影像的定位深度.在汇聚点上,垂直于双眼视轴线形成的平面即为汇聚面,汇聚面决定影像的感知深度.通过眼睛汇聚点产生的深度感知信息传递到人的大

收稿日期:2014-06-24

第一作者:戴 正(1976-),男,讲师.研究方向:新媒体技术与艺术、影视制作与传播.E-mail:1330144@qq.com

脑,从而使能自然地接收到影像的大小、距离、空间等信息^[1].3D影像技术以模拟人眼的立体视觉功能为基础,但由于技术的差异性,在还原深度感知因素的过程中不能完整模拟出人眼看到的效果.大脑在不能获得足够的深度感知信息的情况下,会出现信息处理错误,因而会引起观看者出现不同程度的失真感或不适应感,从而影响到观看舒适性^[2].

研究3D影像技术在还原深度感知因素的过程中,可以将还原过程分为3个环节:首先是在3D影像的摄制过程中,摄像机的汇聚面参数对深度感知因素的影响;其次是影像创作者在影像视觉语言表现方式选择的过程中,由于对汇聚面的调整从而对深度感知因素产生影响;最后是3D影像的观看环境与汇聚面之间的关系对深度感知因素产生的影响.

1 汇聚面与舒适性的关联性

人的两眼瞳孔在水平方向相距约6~7 cm,当人的双眼注视一个物体时,左右眼视网膜上的两个影像存在细微的差异.当这两个投射到视网膜上的影像信息传递到大脑时,大脑将这两个影像重叠在一起,消除畸变,并感知物体的深度与体积,这一过程称为人的“双眼立体视觉”^[3].

如图1所示,人的左右眼在看实际影像时,双眼光轴会聚焦在一起产生一个聚焦点,聚焦点的聚焦决定影像的成像质量.在聚焦的同时,双眼的两个视轴线也会产生汇聚点,在汇聚点上垂直于双眼视轴线形成的平面为汇聚面.汇聚点可以和聚焦点重合,也可以是在聚焦点前后的汇聚面上的任一位置,如汇聚点1和汇聚点2.当汇聚点与聚焦点重合时,人眼视网膜获得清晰的影像与深度感知信息,大脑感知到比较自然的深度信息,获得比较舒适的视觉感受.但当汇聚点与聚焦点不重合时,双眼指向物体的汇聚点不在聚焦点的位置,大脑不能感觉到清晰的深度感知信息.同时,在视网膜上得不到汇聚面上清晰的影像,大脑无法正确处理并获取和谐的双眼融合的空间影像,于是会出现不同程度的画面失真感,同时会产生不适应感^[4].因此,在模拟3D影像的时候,如果没有掌握汇聚面的调节规律,很容易产生过大或过小的非自然的感知深度,就会影响3D影像的观看舒适性.

聚焦点与汇聚面的适当分离可以增加视觉立体效果,立体效果正是3D影像作品在艺术创作中的视觉生命,是3D影像作品的价值所在.而过度的调

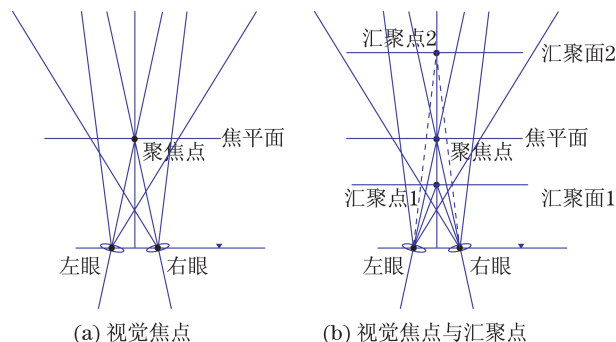


图1 视觉焦点与汇聚点示意图

Fig.1 Schematic diagram of visual focus and convergence point

节聚焦与汇聚的分离会得不出融合的空间影像,反而引起视觉疲劳与不适感.这种舒适性与立体效果的矛盾需要找到一种平衡的解决方法,在保证观影最大化的立体效果的同时,也保证观众在观影时的舒适性.本文接下来将从摄像机的汇聚面参数、影像创作者的影像视觉语言的表现方式、3D影像的观看环境3方面进行分析.

2 3D影像摄制的参数限制对3D影像观看舒适性的影响

3D影像摄制技术是基于2D影像摄制技术发展而来的,3D影像摄制的原理与2D影像摄制原理基本相同.3D影像摄制中采用的视听语言元素同样也包括:镜头、景别、摄影构图、机位与视角、照明、光源色温、摄影运动技巧、声音特性与录音^[4];制作环节也包括:筹备阶段、编剧、构思、拍摄、剪辑、后期特效、发布.3D影像摄制与2D影像摄制的最大区别在于使用的摄像机的构造不同,3D摄像机的双镜头基于人的双眼成像原理设计,3D电影采用双镜头成像系统或是物镜和棱镜或反射镜组成的模拟双镜头成像系统^[5].

以标准双镜头成像系统为例,如图2所示(见下页).3D电影摄像机有 a_1 和 a_2 两个物镜,两物镜的光轴 b_1 和 b_2 在摄像机的视轴轴线 c 上的某一点交叉,形成一个汇聚点 b_0 .以汇聚点 b_0 为平面中心,垂直于摄像机中轴线 c 形成的平面 W 即为汇聚面.以汇聚面为分割,汇聚面 W 到摄像机的视平面 A 间形成的距离空间 L_1 为出屏空间 W_1 ;汇聚面 W 向无限远处扩展形成的距离空间 L_2 则为入屏空间 W_2 .

聚焦点决定了画面对焦的清晰度以及景深控制,如图3所示(见下页).3D摄像机的两个物镜的聚焦点可以是出屏空间 W_1 中的 d_1 点,也可以是入

屏空间 W_2 中的 d_2 点.

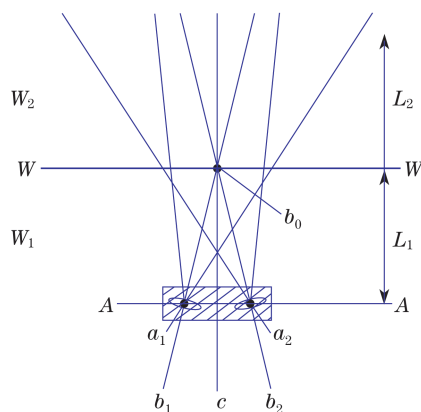


图 2 汇聚面示意图

Fig.2 Schematic diagram of convergence side

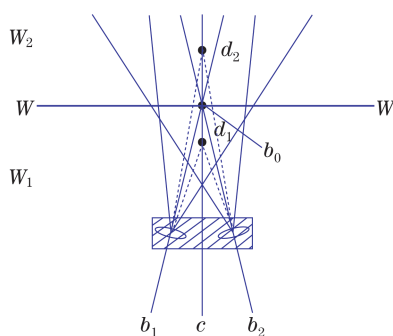


图 3 聚焦点位置示意图

Fig.3 Schematic diagram of focus position

通过 3D 监视器监控拍摄画面时,汇聚面上的拍摄对象位于监视器屏幕上,在出屏空间 W_1 范围内的对象会呈现在监视器前,形成突出的视觉效果,即出屏效果;处于入屏空间 W_2 范围内的对象会呈现“后退”到监视器内的纵深效果,即入屏效果.产生这种视觉变化已知是由人脑的深度感知功能决定的.3D 摄像机在拍摄影像时,左右镜头同时录制两路视频影像.由于 3D 摄像机有物镜间距,镜头摄录时相应的光路空间区域具有差异.因此,左右画面摄录到的对象在角度上会存在一定的差异,这种距离差称为视差.

视差会随着汇聚面和镜头焦点的改变而改变,如图 4 所示.当镜头焦点 d 没有位于汇聚面 W 上时,镜头焦点 d 与汇聚面 W 之间就会产生距离 e ,这种距离就称为感知深度.当镜头焦点分别位于出屏空间 W_1 和入屏空间 W_2 时,两个摄像机镜头在汇聚面上形成 w_L 点和 w_R 点,两点间距离值为 g ,产生视差效果.根据镜头焦点位置的不同,可以产生两种视差效果,即正视差和负视差.镜头焦点位于汇聚面 W 的 W_2 区域时为正视差, g 为正值;镜头焦点

位于汇聚面 W 的 W_1 区域时为负视差, g 为负值.

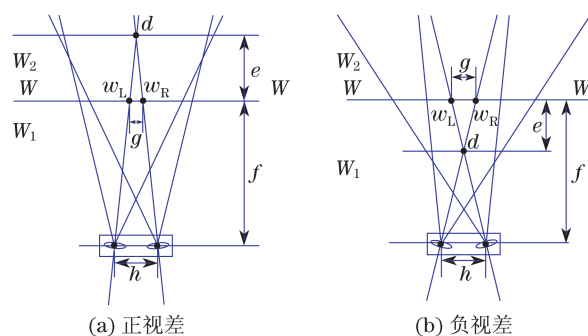


图 4 正视差和负视差示意图

Fig.4 Schematic diagram of positive parallax and negative parallax

根据感知深度与视差的关联性,可以得出正视差感知深度为 $e = \frac{fg}{h - g}$;负视差感知深度为 $e = \frac{fg}{h + g}$.式中, e 为感知深度; f 为摄像机与汇聚面之间的距离; g 为视差距离; h 为 3D 摄像机的物镜间距.

3D 影像摄制中汇聚面上的视差距离值 g 和摄像机与汇聚面之间的距离值 f 关系到 3D 影像的感知深度,而感知深度的大小直接影响大脑的影像重合.

3 创作因素对 3D 影像观看舒适性的影响

3D 影像的作品需要运用视听语言元素来创作,其中需要调整汇聚面的语言元素有摄影构图、机位与镜头、剪辑时汇聚面的调整等.

3.1 摄影构图

3D 摄像机有物镜间距,双镜头摄录时相应的光路空间区域具有差异.如图 5 所示,在拍摄同一对象时,会出现左右物镜拍摄不到的 D_1, D_2 与 B_1, B_2 部分.当被摄对象位于该部位时,由于只有一个物镜能拍摄到,人的大脑无法重叠这部分区域的影像,因而无法产生感知深度,这部分的画面会出现半透明效果.同时由于不处在聚焦面上,因而画面会有模糊感,就如同带了一副一个镜片出现很多裂痕的眼镜,裂痕少的地方有 3D 效果,裂痕多的地方呈现平面影像,并且模糊,观看一段时间后会令观看者产生严重的眩晕效果^[6].因此,构图时被摄对象需要尽量避免出现在该区域.由于汇聚面会根据创作者的想法进行变动,因此,出屏空间 W_1 和入屏空间 W_2 会随着摄像机与汇聚面之间的距离 f_1 与 f_2 间的相互变

化而变化.由于摄像机两物镜的光轴夹角发生变化,双物镜重叠区域面积随之改变. C_1 为入屏有效区域, C_2 为出屏有效区域.摄像机与汇聚面之间的距离较短为 f_1 时, D_1 与 D_2 相对 C_2 面积较大,出屏空间 C_2 较小.因此, C_2 区域适合拍摄小体积对象,不适合大特写等构图拍摄.摄像机与汇聚面之间的距离较长为 f_2 时, D_1 与 D_2 相对 C_2 面积较小,出屏空间有效区域 C_2 较大.因此, C_2 区域适合拍摄大体积对象,产生较好的3D出屏视觉效果.

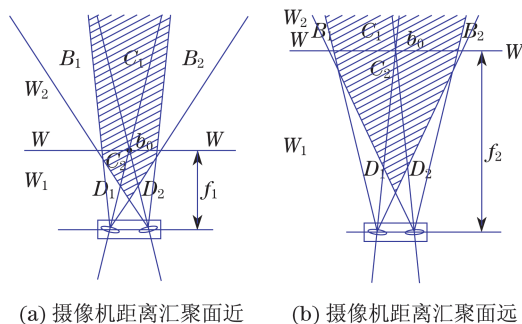


图5 有效构图区域示意图

Fig.5 Schematic diagram of the effective composition of regional photography

3.2 机位与镜头

摄制3D影像时,由于变焦与汇聚面需要同时调整,对拍摄技术要求很高.因此在拍摄时,一般采用定焦镜头,在镜头运动过程中采用配合汇聚面调整的形式产生镜头动感,获得较好的画面运动的韵律美感^[7].采用定焦镜头可以固定拍摄的镜头画面角度,同时便于控制镜头聚焦点.当镜头聚焦点固定时,可通过汇聚面的调整获得感知深度,从而快速确定观影的舒适性范围.

本文针对摄像机拍摄时汇聚面对舒适性的影响进行了实验调查.实验条件:调查人数为20人,摄像机机型为松下AG-3DP1MC,镜头焦距35~601.9 mm,监视器机型为松下BT-3DL2550MC,观看时间为40 min.被摄对象为一瓶普通矿泉水,被摄对象距离摄像机3 000 mm.实验取值范围:考虑到被摄物体的位置,因此聚焦点取值在3 000 mm前后,分别为2 000,2 500,3 000,3 500,4 000 mm;摄像机与汇聚面之间的距离值固定为2 000,2 500,3 000,3 500,4 000,4 500 mm;感受程度分为:舒适、不舒适.记录20人的观看感受,获得的实验统计数据如表1所示.

由表1的数据可见,在不同的聚焦范围内,调节摄像机与汇聚面之间的距离,人的观影舒适性会产生变化.当汇聚面距离值接近于聚焦点的聚焦值时,即感知深度越小时,获得舒适感的人越多;随着汇聚

表1 不同焦距下感觉舒适人数统计表

Tab.1 Statistics of the number of persons feeling comfortable for different focal lengths

聚焦点 取值/mm	摄像机与汇聚面距离/mm					
	2 000	2 500	3 000	3 500	4 000	4 500
2 000	17	18	16	10	5	0
2 500	18	19	19	14	11	1
3 000	16	19	20	17	13	8
3 500	14	17	20	19	16	14
4 000	13	15	20	19	18	15
4 500	12	14	18	19	18	16

面距离值与聚焦点聚焦值差距变大,即感知深度变大时,舒适度在不断下降.将实验数据按正负视差分类,对比结果如表2所示.

表2 正负视差的感觉舒适人数统计表

Tab.2 Statistics of the number of persons feeling comfortable for positive and negative parallax

视差	视差距离值/mm				
	500	1 000	1 500	2 000	2 500
正视差	18	16	14	13	12
负视差	15	13	8	1	0

根据表2对比结果,以13人感到舒适为合格线,则舒适性实验调查的结果为:感知深度为正视差时,感知深度在0~2 000 mm为舒适范围;感知深度为负视差时,感知深度在0~1 000 mm为可适应的舒适范围.摄像师在拍摄时,调整汇聚面到聚焦点前2 000 mm以内,以及在聚焦点后1 000 mm以内可以获得较为舒适的3D影像.

拍摄商业3D影像时,一般都会采用多机位进行拍摄,即拍摄同一个对象时,采用两台以上的摄像机从不同角度、不同景别进行拍摄.不同摄像机的拍摄参数不尽相同,汇聚面、聚焦点差异较大.当多机位拍摄出的视频按分镜头剪辑在一起时,由于参数差异较大,会出现汇聚位置不断变换,导致感知深度不断出现跳跃式错位,人脑因无法适应这种空间的错位而产生不舒适感.因此,不同机位的摄像师需要在拍摄一个新场景时,协商好一个汇聚面的调整范围,让同一场景拍摄的不同镜头画面的感知深度比较接近,即可获得切换镜头时较为舒适的画面连续性播放效果.

3.3 3D影像非线性编辑时汇聚面的调整

3D影像的非线性编辑相比2D影像的非线性编辑多了汇聚面调整这一关键环节,即通过人为改变镜头间的物镜间距,从而改变汇聚面的位置来获

得舒适的观影效果,这是 3D 影像制作过程中非常重要的环节.3D 影像非线性编辑时汇聚面的调整分为两个部分:一是针对 3D 影像视频的调整;另一个则是针对输出介质而对汇聚面的调整.

3.3.1 对 3D 影像视频的调整

在剪辑 3D 影像时需要对左右画面汇聚的视差距离值 g 进行调整.而非线性编辑时,已有的镜头片段都是已拍摄好的,3D 影像中的 3D 摄像机与汇聚面之间的距离,以及 3D 摄像机的物镜间距都是恒定的.因此,改变汇聚面即改变 3D 画面的感知深度,也就是改变 3D 立体效果的强弱度^[8].在选择多机位拍摄的拼接镜头时,按拼接规律选择镜头,需要选择汇聚面参数相似的镜头.镜头参数差异较大时,则运用非线性编辑软件改变汇聚面视差距离值,使得感知深度参数保持接近.在剪辑快速运动镜头时,需要调整由于运动速度的不同而出现的汇聚面快速变化而导致的眩晕感.

3.3.2 根据输出介质而对汇聚面的调整

人们在观看 3D 电影时会觉得同样的影片在影院观看和在家观看时,3D 效果是不一样的.造成这个现象的主要原因是为了让更多的人走进影院观看影片,获取更多票房收益,在剪辑时主要针对大荧幕进行汇聚面的调整,而在发布家用电视版本时,只作简单调整或基本没有调整^[9].随着家用 3D 电视机以及手持 3D 的快速发展,3D 节目内容的需求不断增加,因此需要在非线性编辑环节提高该部分节目的 3D 观影效果.

由于在非线性编辑时,汇聚面决定视觉深度,而在不同的观看介质上观看时,都需要一定的观看距离.根据输出介质的不同,从尺寸上将介质分为 3 种:一类是手持小屏幕设备,观看距离为 300~500 mm;一类为家用中等屏幕设备,观看距离为 2 500~4 000 mm;一类为大型商业显示设备,观看距离为 5 000~30 000 mm.为此,针对不同的介质进行了实验调查.

实验条件:调查人数为 20 人,编辑软件为 Quantel V5 版,编辑输出介质分别为手持设备 720P 画面、电视 1080P-2K 画面、商业显示设备 4K 画面这 3 个不同版本,分别在 10.164 cm(4 英寸)、20.32 cm(8 英寸)、127 cm(50 英寸)、508 cm(200 英寸)的屏幕上放映.汇聚面视差距离值分别为 5.0~5.5 cm,5.6~6.0 cm,6.1~6.5 cm,6.6~7.0 cm,7.1~7.5 cm.感受程度分为:3D 效果好观影舒适、3D 效果不好观影不舒适.记录 20 人的观看感受,获得的实验统计数据如表 3 所示.

表 3 不同屏幕尺寸的感觉舒适人数统计表

Tab.3 Statistics of the number of persons feeling comfortable for different screen sizes

屏幕尺寸	5.0~ 5.5 cm	5.6~ 6.0 cm	6.1~ 6.5 cm	6.6~ 7.0 cm	7.1~ 7.5 cm
10.164 cm (4 英寸)	17	15	12	6	0
20.32 cm (8 英寸)	14	18	13	10	2
127 cm (50 英寸)	12	15	19	14	6
508 cm (200 英寸)	6	12	15	19	18

根据表 3 的数据进行分析,不同的介质尺寸,通过汇聚面视差距离值的调整,人的观影舒适性会产生变化.以 6.1~6.5 cm 为标准视间距,当汇聚面距离值越小时,屏幕越小的介质观影舒适性越好,而大屏幕观影舒适性降低;当汇聚面距离值越大时,屏幕越大的介质观影舒适性越好,而小屏幕观影舒适性降低.从实验数据可以看出,视频编辑时,发布在以 10.164 cm(4 英寸)为代表的手机上的 3D 影像和以 20.32 cm(8 英寸)为代表的手持设备上的 3D 影像,将汇聚面视差距离值调整在 5.0~6.0 cm 时,具有较好的舒适性效果;发布在以 127 cm(50 英寸)为代表的 3D 电视上的 3D 影像,汇聚面视差距离值调整在 6.1~6.5 cm 时,具有较好的舒适性效果;发布在以 508 cm(200 英寸)为代表的商业显示设备上的 3D 影像,将汇聚面视差距离值调整在 6.6~7.5 cm 时,具有较好的舒适性效果.出现这些差异性是因为人在观看 3D 影像时,双眼在屏幕中的视线投射在银幕左、右两像点的间隔距离与人眼的眼瞳间距相接近时,可获得较好的自然视觉效果.手持设备由于屏幕尺寸较小(有些屏幕小于人眼的瞳距),人眼需要通过眼球向中间转动,尽可能减少瞳距来适应屏幕,大脑产生左右眼影像融合画面获得景物自然感.剪辑视频时,需要通过调整汇聚面,人为减少拍摄画面的物镜间距.因此,小屏幕设备物镜间距要小于 6.1 cm.而发布用于大型商业显示设备上的影像时,人眼需要通过眼球向两边转动,尽可能获得更多的屏幕上的信息.因此,需要增加瞳距来适应屏幕,此时需要通过调整汇聚面,使得大型商业显示设备物镜间距大于 6.5 cm.

根据实验结果可以看出,通过 3D 影像非线性编辑时汇聚面的调整可以提供适合观看的 3D 片源,剪辑时汇聚面的调整是 3D 影像制作过程中非

常重要的环节。

4 观看条件对3D影像观看舒适性的影响

3D影像作品的观看介质具有多样性,现有3D影像观看方式可分为眼镜式和裸眼式,其中眼镜式又分为主动快门式和被动式两种。主动快门式采用时分式技术,主要应用在3D电视上。主动快门式3D成像质量最好,但对观众的观看姿态有一定的要求。被动式采用技术为:光分式、波分式和色分式^[10]。光分式和波分式广泛应用在3D电视和影院,成像质量较好,应用较广泛;色分式由于3D效果差,色彩丢失严重,目前已很少采用。不同技术由于自身技术的某些不足,会出现影响舒适性的情况,由于这不属于本文研究的范畴,因此不作赘述。

观众在观看3D影像作品时,视觉焦点基本都会聚焦于观看介质表面,但由于观看位置的不同,双眼汇聚点的位置会产生变化。如图6所示, D 为面积大小相等的观看介质,观众的观看距离 f_1 和 f_2 不等。当观众距离观看介质为 f_1 时,由于位置太近,视觉焦点位于汇聚面到观众之间的位置,会产生负视差,影像画面立体程度很容易超出人的舒适性区域,大脑无法重合影像。因此,眼睛看到的满是模糊的光影在屏幕上移动,让人比较难以适应,从而很容易产生不适感。

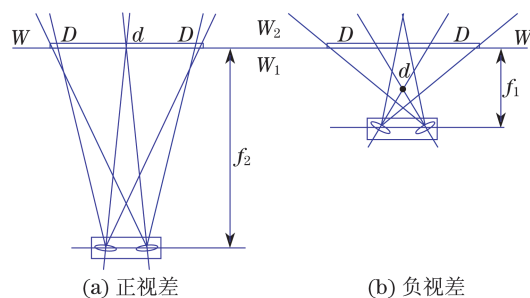


图6 观看位置与汇聚面的关系示意图

Fig.6 Relationship between viewing position and convergence side

从观影舒适性考虑,感知深度为正视差时,观影效果最好。如图7所示,以3D影院为例,影院观众一般都会将视觉焦点放置在屏幕 D 上。因此需要影院根据影院的建筑结构和观众的观影舒适度要求,调整放映机参数。在屏幕大小保持一致,即 $s_1 = s_2$ 时,调整放映机镜头 a_1 和 a_2 的位置。当放映机镜头间距由 h_1 增加到 h_2 时,汇聚面的视差距离值 g_1 随之增大到 g_2 ,视觉焦点也从 d_1 的位置移动到 d_2

的位置。在放映机与汇聚面之间的距离不变的情况下,即 $f_1 = f_2$ 时,通过 $e = \frac{fg}{h-g}$ 公式可以看出 $e_1 < e_2$ 。由于是在入屏空间 W_2 增加感知深度,因此,观看时会感觉空间深度拉大,画面内容变小,出现“小人国”的视觉效果。为了解决这个问题,需要让感知深度 e 保持一致,即 $e_1 = e_2$ 时,则 $f_1 < f_2$,可以看出汇聚面距离放映机的距离变远了,汇聚面的位置改变了。结合表3的数据可以看出,调整放映机的物镜间距大于6.1~6.5 cm的标准视间距,通过改变汇聚面的视差距离值可以改变整个影院5 000~30 000 mm的观影舒适度,特别是满足前排观众的观影舒适度。家用3D电视机与手持小屏幕设备由于不具备物镜间距的物理属性,因此,需要通过调整设备与人之间的观看距离来达到改变画面汇聚面的位置,从而获得最佳观影舒适性。手持小屏幕设备观看距离为300~500 mm,家用中等屏幕设备观看距离为2 500~4 000 mm。

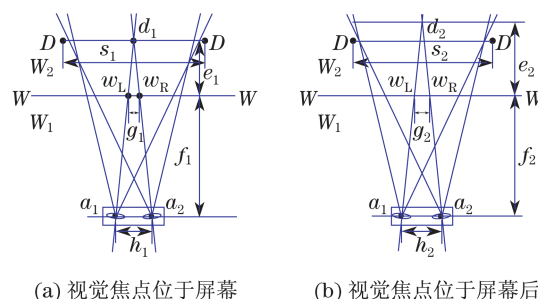


图7 镜头间距变化示意图

Fig.7 Schematic diagram of lens spacing change

5 结论

综上所述,汇聚面的调整是观影舒适性的决定性因素,要制作兼具较好3D立体效果和较好观影舒适感的影片,就需要掌握汇聚面调整的规律。通过本文的研究,解决了以下问题:一是找到了摄像机汇聚面参数调整的规律;二是在3D影像制作过程中,找出了摄像构图的有效拍摄角度范围;三是找出在机位与镜头调整时,怎样获得有效的3D视觉效果和舒适性的调整数值和调整规律;四是在3D影像的非线性编辑过程中,怎样对不同尺寸的汇聚面进行调整以获得较好的视觉效果和舒适性的方法;五是获得3D影像观看时的设备调整数据以及观看位置等数据。这些问题的解决,为制作出高质量的3D影视节目内容来支撑产业的发展具有较为重要的意义。

(下转第186页)

- Computer Press, 2009: 210 - 214.
- [7] Moravej Z, Akhlaghi A. A novel approach based on cuckoo search for DG allocation in distribution network[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2013, 44(1): 672 - 679.
- [8] Gandomi A H, Yang X S, Alavi A H. Cuckoo search algorithm: a metaheuristic approach to solve structural optimization problems [J]. Engineering with Computers, 2013, 29(1): 17 - 35.
- [9] Chandrasekaran K, Simon S P. Multi-objective scheduling problem: hybrid approach using fuzzy assisted cuckoo search algorithm [J]. Swarm and Evolutionary Computation, 2012, 5: 1 - 16.
- [10] 李煜, 马良. 新型元启发式布谷鸟搜索算法[J]. 系统工程, 2012, 30(8): 64 - 69.
- [11] 刘长平, 叶春明. 求解置换流水车间调度问题的布谷鸟算法[J]. 上海理工大学学报, 2013, 35(1): 17 - 20.
- [12] Walton S, Hassan O, Morgan K, et al. Modified cuckoo search: a new gradient free optimisation algorithm[J]. Chaos, Solitons & Fractals, 2011, 44(9): 710 - 718.
- [13] Valian E, Tavakoli S, Mohanna S, et al. Improved cuckoo search for reliability optimization problems [J]. Computers & Industrial Engineering, 2013, 64(1): 459 - 468.
- [14] 冯登科, 阮奇, 杜利敏. 二进制布谷鸟搜索算法[J]. 计算机应用, 2013, 33(6): 1566 - 1570.
- [15] Rubinstein R Y, Kroese D P. The cross-entropy method: a unified approach to combinatorial optimization, Monte Carlo simulation and machine learning[M]. New York: Springer - Verlag, 2004.
- [16] Kroese D P, Portsky S, Rubinstein R Y. The cross-entropy method for continuous multi-extremal optimization [J]. Methodology and Computing in Applied Probability, 2006, 8(3): 383 - 407.
- [17] 李洁, 柴天佑, 宫经宽. 基于交叉熵算法的 PID 控制器设计[J]. 控制与决策, 2011, 26(5): 794 - 796.
- [18] Yildiz T, Yercan F. The cross-entropy method for combinatorial optimization problems of seaport logistics terminal [J]. Transport, 2010, 25(4): 411 - 422.
- [19] 朱坚民, 黄之文, 翟东婷, 等. 基于强化缓冲算子的灰色预测 PID 控制仿真研究[J]. 上海理工大学学报, 2012, 34(4): 327 - 332.
- [20] 于莲芝, 成玲玲. 分数阶 PID 控制运用于励磁控制系统[J]. 上海理工大学学报, 2013, 35(4): 404 - 408.
- [21] 张朝龙, 江巨浪, 江善和, 等. 一种自适应混合粒子群优化算法及其应用[J]. 计算机应用研究, 2011, 28(5): 1696 - 1698.
- [22] 刘金琨. 先进 PID 控制及其 Matlab 仿真 [M]. 3 版. 北京: 电子工业出版社, 2011.

(编辑: 丁红艺)

(上接第 179 页)

参考文献:

- [1] 孙延禄. 从模拟人眼立体视觉功能的差异看 3D 影像技术的类别与未来[J]. 现代电影技术, 2012(1): 13 - 23.
- [2] 尹杰, 靳静娜, 刘志朋, 等. 观看 3D 影视所致不适感的 EEG 初步分析[J]. 北京生物医学工程, 2012, 31(2): 150 - 153.
- [3] 李志斌, 郑刚, 章立新, 等. 基于数字全息术的粒子定位测量[J]. 上海理工大学学报, 2007, 29(3): 237 - 240.
- [4] 汪伟, 李郝林. 基于数码相机图像的三维重构[J]. 上海理工大学学报, 2005, 27(5): 429 - 432.
- [5] 孙伟杰. 3D 影视制作与播放技术探析[J]. 现代电影技术, 2010(9): 18 - 23.
- [6] 孙延禄. 3D 电影摄影基本技术操作参数的选择与计算方法[J]. 现代电影技术, 2011(4): 17 - 22.
- [7] 于路, 王怀军. 3D 拍摄技术与艺术探讨[J]. 广播与电视技术, 2013(7): 68 - 71.
- [8] 赵慧敏, 姜秀华. 基于视频加深度格式的立体视频技术分析[J]. 电视技术, 2014, 38(1): 2 - 5.
- [9] 庞燕. 立体视频的编辑与播放[J]. 科技信息, 2011(7): 57 - 32.
- [10] 赵上元. 3D 影视作品观看舒适度问题的探讨[J]. 现代电影技术, 2011(10): 21 - 28.

(编辑: 丁红艺)