

doi:10.3788/gzxb20134208.0924

# 改进的平行式立体显示系统获取正视差的设计

罗洪艳, 陈义安, 廖彦剑, 田学隆, 侯文生

(重庆大学 生物工程学院, 重庆 400044)

**摘要:** 为了克服常规平行式成像系统拍摄的三维公共场景较小、无水平正视差导致三维再现只能处于屏幕前方、容易引起视疲劳等问题, 提出了一种改进的平行式三维成像方法. 在图像传感器中, 以读出像素阵列中的部分未送入显示的预留像素为基础, 借鉴离轴平行式显示技术, 利用预留像素将读出像素阵列中用于显示的部分在水平方向进行相应偏移, 最终送入 3D 显示器完成显示. 在建立的数学模型上分析与推导, 实现了水平视差  $P > 0$ , 使人眼感受的立体景象处于屏幕后方, 增强了立体视觉效果. 选用  $752 \times 582$  分辨率的 CCD 在自行研制的  $640 \times 480 @ 120$  Hz 系统上进行实验验证, 证实了水平正视差产生的可行性, 且三维公共场景夹角从常规的  $29^\circ$  最大增大到  $34^\circ$ , 为设计出合适的正负视差及提高立体效果的研究提供了新方法.

**关键词:** 平行式; 水平负视差; 水平正视差; 离轴; 三维公共场景

中图分类号: TN141

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2013)08-0924-5

## Design of Positive Parallax Production by the Improved Parallel 3D Stereo Display System

LUO Hong-yan, CHEN Yi-an, LIAO Yan-jian, TIAN Xue-long, HOU Wen-sheng  
(Bioengineering College, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** To overcome issues in the conventional parallel three-dimensional imaging system, such as the smaller three-dimensional public scene, none of the horizontal positive parallax resulting in three-dimensional reproduction only in front of the screen and causing visual fatigue easily, an improved parallel 3D imaging method was proposed. Based on the portion of the readout pixel array reserved but not used for display in most image sensors, the display array was made a corresponding horizontal offset by reference from off-axis parallel display technology and then fed in 3D display monitor. Through the analysis and derivation in the established mathematical model, the horizontal positive parallax production was realized, so three-dimensional reconstruction could be felt behind the screen, and the stereo visual effect was greatly enhanced. The proposed method was proved feasible on the self-developed system of  $640 \times 480 @ 120$  Hz with selection of the CCD resolutions to  $752 \times 582$ , and the angle of three-dimensional public scene could be increased from the conventional  $29^\circ$  to a maximum of  $34^\circ$ . The proposed method provides a new direction for the appropriate design of the positive and negative parallax and for the study on the improvement of the stereo effect.

**Key words:** Parallel; Horizontal negative parallax; Horizontal positive parallax; Off-axis; Three-dimensional public scene

## 0 引言

平行式三维立体显示因结构设计相对简单、无

垂直观差及梯度失真等优点<sup>[1-2]</sup>而得到广泛应用, 它利用两光轴平行摆放的左右 CCD/CMOS 图像传感器采集左右视图, 经后续处理最终送入 3D 显示器

基金项目: 国家自然科学基金(No. 30900323)和中央高校基本科研业务费(No. CQDXWL-2012-124)资助

第一作者: 罗洪艳(1976-), 女, 副教授, 博士, 主要研究方向为医学图像处理 and 医疗器械等. Email: cqu\_lhy@163.com

收稿日期: 2013-03-08; 录用日期: 2013-04-23

进行显示,在确保左右眼分别看到左右视图的情况下,通过大脑的融合便可感受到立体效果<sup>[3-4]</sup>.然而平行式所拍摄的三维公共场景较小<sup>[5]</sup>,且因成像机理的限制使其无法获取水平正视差,导致感受到的三维再现景象只能压缩在显示器屏幕前方区域,而无法显示在屏幕后方<sup>[6-7]</sup>.大量研究<sup>[8-9]</sup>已经证实,水平正视差产生三维效果比水平负视差产生的效果更强烈,在不疲劳状态下人眼所能承受的水平正视差范围也更大.为此,为了获取水平正视差,在平行式三维立体成像基础上逐渐发展出了离轴平行式和左右视图裁剪移位法,离轴平行式是利用平移传感面的方式获取水平正、负视差<sup>[10]</sup>,该方法实现了三维再现景象在屏幕前后方的显示,拍摄的三维公共场景较常规平行式的更大.然而离轴平行式是将左右图像传感器的中心点向相反方向分别偏离镜头光轴一定的距离<sup>[11-12]</sup>,因此无法采用绝大多数普通结构的摄像头或相机,设计成本与难度增大.左右视图裁剪移位法通过对图像传感器读出用于显示的左右视图进行一定的裁剪及移位,虽能产生水平正负视差,但未解决三维公共场景较小问题,甚至引起部分图像信息的丢失<sup>[13]</sup>.可以看出,这两种方法虽保留了平行式的优点,但在消除平行式缺点的同时又引入了其他不利因素.因此在平行式三维立体显示基础上设计出既消除其缺点又不引入其他问题的方法显得非常有必要.

本文提出了利用多数传感器读出像素阵列两边预留而未用作显示的像素,将送入显示的左右像素阵列在水平方向进行相应偏移的方法.通过改进产生了水平正、负视差,实现了三维再现景象在屏幕前后方的显示.该方法成功借鉴了离轴平行式的偏离思想,但并非是将传感器中心点偏离镜头的光轴,因此在保留了平行式优势的同时,克服了上述两种方法的缺点,适用于绝大多数普通结构的摄像头或相机,未造成图像信息丢失,且增大了三维公共场景范围.

## 1 实现水平正负视差的原理设计

为了正确理解平行式三维显示中视差产生的过程及作用,首先建立了平行式成像及三维显示的几何模型,如图 1.通过对模型中视差的深入分析与推导,提出改进的方法,再借助模型来推导并展示水平正视差的产生过程.

图 1 中“+”为坐标正方向,双摄像头相距  $t$  平行放置,镜头焦距为  $f$ ,读出用于显示的左右视图宽度为  $W_c$ ,传感器上单个像素宽度为  $\delta$ ,屏幕显示宽度为  $W_s$ ,目标点  $A(X_0, Y_0, Z_0)$  为空间三维公共场景中的一点,  $(X_{cl}, Y_{cl})$  和  $(X_{cr}, Y_{cr})$  分别为  $A$  点在

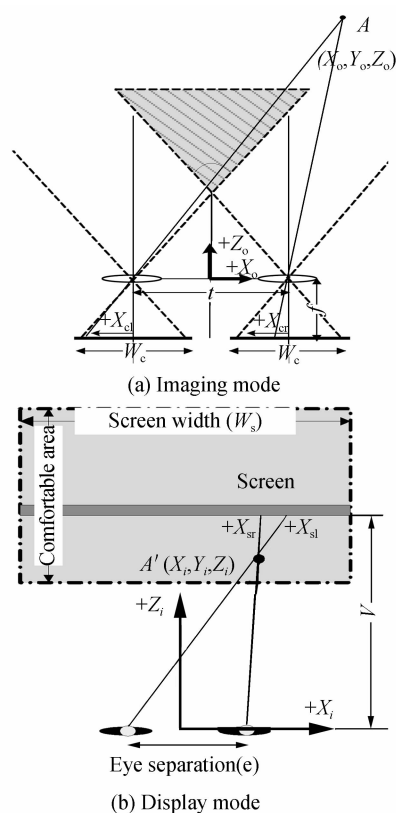


图 1 平行式成像及三维显示模型

Fig. 1 Model of stereoscopic parallel configuration and stereoscopic display

左右传感器上投影成像的坐标点,坐标原点分别为用于显示的成像面中心位置.对于常规的平行式三维显示系统,由几何光学成像原理可推导出

$$X_{cl} = \frac{f(t+2X_0)}{2Z_0}, X_{cr} = \frac{-f(t-2X_0)}{2Z_0} \quad (1)$$

为了计算方便,将传感器成像坐标原点与显示器屏幕坐标原点都选择各自中心,此时可认为传感器所成像坐标对应于显示器坐标仅是等比例的放大,所以空间点在显示器坐标系中的坐标为

$$X_{sl} = M \cdot X_{cl}, X_{sr} = M \cdot X_{cr} \quad (2)$$

式中  $(X_{sl}, Y_{sl})$ 、 $(X_{sr}, Y_{sr})$  对应为  $(X_{cl}, Y_{cl})$ 、 $(X_{cr}, Y_{cr})$  在显示器上的坐标,原点为屏幕中心位置,  $M$  为放大系数 ( $M=W_s/W_c$ ).

根据双目视差的定义,可计算得水平视差为

$$P = X_{sr} - X_{sl} = -Mft/Z_0 \quad (3)$$

在人眼中再现的立体影像点  $A'$  深度  $Z_i$ ,通过几何原理计算可得

$$Z_i = \frac{Ve}{e-P} \quad (4)$$

在研究三维舒适区的界定时文献<sup>[14]</sup>指出,人眼感受的三维立体再现时的舒适区一般为  $\frac{V}{1+0.2V} \leq Z_i \leq \frac{V}{1-0.2V}$ ,如图 1(b)中灰色方框所示.在式(3)

中可以看出水平视差  $P$  恒小于零,带入式(4)计算

得三维再现点深度  $Z_i$  恒小于观看距离  $V$ , 因此为了保证舒适度, 空间景象三维再现时只能压缩在屏幕前方的灰色方框内, 严重影响三维效果, 也易引起视觉疲劳. 由于无正视差, 屏幕后方更大的舒适空间就无法被利用, 极大减弱了三维真实感受. 此外平行式成像的三维公共场景相对整个拍摄空间显然较小, 如图 1(a) 中灰色部分所示, 所成夹角  $\alpha = 2\arctan(W_c/2f)$ .

由于多数传感器在配置成视频拍摄要求的高帧频数据模式时, 读出像素的分辨率都大于与之匹配的显示器所支持的分辨率, 因此在读出像素阵列后需对其进行截取, 如果进行中央截取将会使得读出阵列两边像素被预留而不用作显示. 目前在进行三维立体视频系统设计时, 传感器内部的这些特点常常被忽视, 仅是简单的间隔取值或是直接截取读出阵列的中央部分作为左右视图送入显示. 本文利用这些被忽视的预留部分, 参照离轴平行式成像原理, 将裁剪用于显示的区域相对原始中央位置往两边偏移, 设计出同时存在水平正、负视差的三维显示系统, 具体实现方法如图 2.

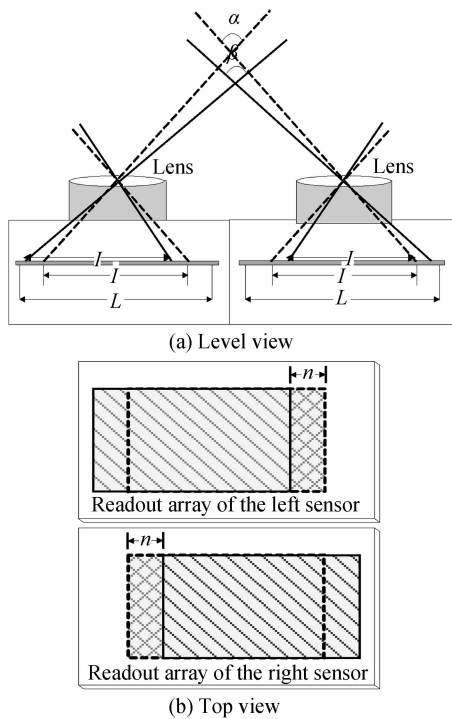


图 2 改进后的水平正视差的实现

Fig. 2 Positive parallax production after improving

图 2(a) 中虚线之间的投影是常规平行式系统投影方式, 由于读出像素阵列两边预留部分的存在, 因此改进后可为实线之间的投影方式. 投影方式的改变使得送入显示的左右视图从改变前的虚线方框偏移到改进后的实线方框, 如图 2(b), 虚线方框部分为常规的中央截取, 而改进后的实线框截取部分就是相对中央部分往两边进行一定的偏移. 其中  $L$  表示传感器读出的像素阵列列数,  $l$  为与之匹配的显示器显示列数 ( $L > l$ ), 从图中可以看出, 此方法充分利用传感器读出像素的多余预留部分, 将读出像素阵列中送入显示的部分在水平方向进行相应偏移, 因此送入显示器显示的左右视图的有效像素个数保持不变, 未造成图像信息的丢失. 图像传感器的中心点仍旧在镜头光轴上, 可使用绝大多数内部结构简单的摄像头.

假设偏移的像素个数为  $n$ , 此时  $(X_{cl}, Y_{cl})$  和  $(X_{cr}, Y_{cr})$  坐标系的原点变为偏移后区域的中心位置, 使用上述改进的方法在图 1 所示的数学模型中进行分析与推导, 式(1)将变成

$$X_{cl} = \frac{f(t+2X_0)}{2Z_0} - n\delta, X_{cr} = \frac{-f(t-2X_0)}{2Z_0} + n\delta \quad (5)$$

此时计算得水平视差  $P = 2M\delta n - Mft/Z_0$ , 当  $2M\delta n = Mft/Z_0$  时, 此时  $P = 0$  为零视差, 即空间深度为  $Z_0^{zero} = ft/2n\delta$  的目标点计算得三维再现深度  $Z_i = V$ , 因此刚好在屏幕上; 当  $2M\delta n > Mft/Z_0$  时,  $P > 0$  为水平正视差, 即空间深度  $Z_0 > Z_0^{zero}$  的空间目标三维再现深度  $Z_i > V$ , 因此在屏幕后方; 当  $2M\delta n < Mft/Z_0$  时,  $P < 0$  为水平负视差, 即空间深度  $Z_0 < Z_0^{zero}$  的被摄目标三维再现深度  $Z_i < V$ , 在屏幕前方. 此外在图 2(a) 中可以看到三维公共区域较改进前明显变大, 所成夹角  $\beta = 2\arctan[(W_c + 2n\delta)/2f]$ , 随着偏移量的增大, 夹角越大, 三维公共场景也就越大. 因此通过改进产生了水平正、负及零视差, 使三维再现景象能同时显示在屏幕前后方, 充分利用了空间的三维舒适区范围, 三维公共场景变大, 大大增强了三维真实感受.

表 1 列举了几种在视频拍摄下的不同读出像素分辨率及帧频的图像传感器, 其中读出像素分辨率有高有低, 但从表中参数看出, 读出像素分辨率都大于与之匹配的显示器支持分辨率, 都存在一定预留

表 1 图像传感器不同型号及其参量  
Table 1 Parameters of different image sensors

Mode of CCD/CMOS	Resolution of readout pixels; frame rate	Resolution of matching display	Maximal pixel number of offset
Sony ICX652CQZ	1 068 × 801; 30 fps	VGA mode; 1 024 × 768	22
Sony IMX050CQK	1 824 × 1 368; 30/60 fps	HD720P; 1 280 × 720	277
Kodak KAI-04050	2 360 × 1 776; 32 fps	HD1 080P; 1 920 × 1 080	220
Sony IMX076LQZ	1 312 × 733; 30/60 fps	HD720P; 1 280 × 720	16
Sony ICX409AK	752 × 582; 50 fps	VGA mode; 640 × 480	56

量用以偏移,因此改进的方法都能适用.如 Sony 的 ICX652CQZ,在 30 fps 帧频下读出分辨率为  $1\,068 \times 801$ ,而与之最匹配的显示器显示分辨率为  $1\,024 \times 768$ ,计算得最大可相应偏移像素个数为 22.

## 2 产生正负视差的实际验证

为了验证实现水平正负视差方法的实际可行性,研制并搭建了平行式结构的三维立体实时显示系统,如图 3.系统采用分时显示技术,按照具体功能分为双路视频采集、FPGA 控制与处理、视频存储、快门液晶眼镜驱动控制四个模块.双路视频采集模块采用两台摄像头将图像光信号转换成电信号,然后两路电信号进入视频解码芯片 ADV7180 转换成数字视频信号;FPGA 控制与处理模块主要控制

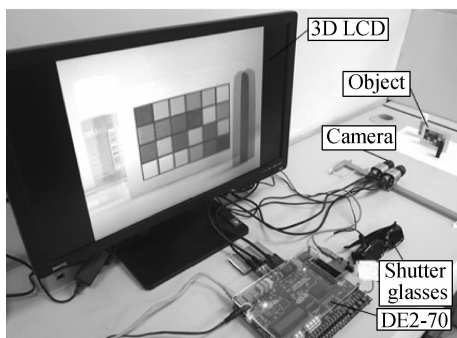


图 3 平行式系统实物图

Fig. 3 Physical diagram of parallel system

完成读出像素阵列的裁剪、双路视频信号的时分复用及 120 Hz 倍频等;视频存储模块在时分复用及数据倍频时为图像数据提供缓存空间;快门液晶眼镜驱动控制模块通过驱动控制快门液晶眼镜,使得快门眼镜与 3D 液晶显示器的分时显示达到同步,从而使观察者感受到三维立体效果.

系统基本工作流程为:两 CCD 摄像头平行放置,采集左右视图并通过两片 ADV7180 将输出的模拟信号转换成数字信号,在 DE2-70 硬件开发平台上完成时分复用及倍频等,并最终由 ADV7123 芯片转换成模拟信号,经 VGA 接口送入 120Hz 的 3D 液晶显示器完成显示.观察者通过佩戴由 FPGA 驱动的主动式快门眼镜即可感受到三维立体效果.

系统采用器件的相关参数如表 2,其中 CCD 阵列有效读出像素分辨率  $752 \times 582$ ,场频 50 Hz,而与读出像素分辨率最匹配的显示器分辨率为 VGA 模式下  $640 \times 480$ ,因此用于显示的像素阵列在原来基础上最大可偏移 56 个像素,即最大偏移距离  $h = n \times \delta = 0.364$  mm.若截取中央部分用于显示的常规平行式设计,可得三维公共夹角  $\alpha$  为  $29^\circ$ ,此时三维显示效果如图 4.而改进后三维公共夹角可增大到  $\beta = 34^\circ$ ,实验中选择偏移距离  $h = 0.26$  mm(偏移像素点数为 40),在 FPGA 控制与处理模块中对左右数字像素阵列进行相应的偏移处理,然后在搭建的系统中验证,可得如图 5 所示的结果.

表 2 系统设计相关参量

Table 2 Related parameters of system

$t/\text{mm}$	$f/\text{mm}$	$W_c/\text{mm}$	Resolution of CCD	Width of pixel: $\delta/\mu\text{m}$	Eye separation: $e/\text{mm}$	$W_s/\text{mm}$	Resolution of display
37	8	4.16	$752 \times 582$	6.5	65	320	$640 \times 480$

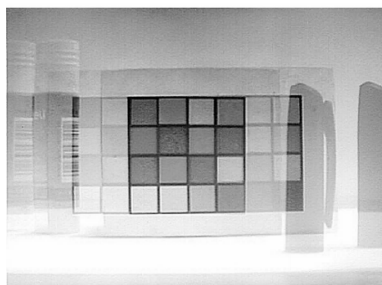


图 4 改进前 3D 显示器上的视差显示效果

Fig. 4 Effect of parallax in 3D display before improvement

改进前后拍摄的目标空间位置不变,而图 4 中所显示的图形没有重合,不存在零视差,即只有负视差.而从图 5 中可以看出,左右视图分时显示时比色卡几乎完全重合,因此可以证实该位置在改进后变为零视差.对改进后用于显示的左右视图进行拍照保存,并选取空间 5 点,在左右视图中的对应位置如图 6.

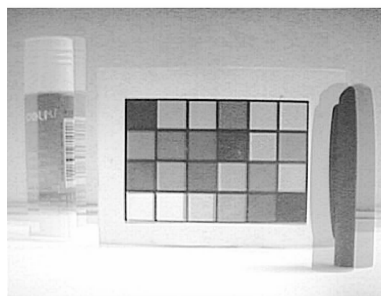


图 5 改进后 3D 显示器上的视差显示效果

Fig. 5 Effect of parallax in 3D display after improvement

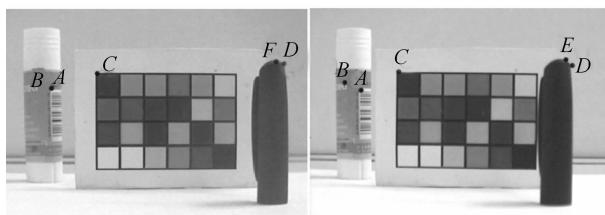


图 6 左视图、右视图

Fig. 6 The left and right view

对空间目标中的5点在图6中左右视图中的对应坐标进行了测量,并计算出空间目标5点的理论视差值,如表3.

表3 视差实测及理论计算值  
Table 3 Actual and theoretical calculation value of parallax

Point ( $Z_0$ )/cm	( $X_{sl}, Y_{sl}$ )/mm	( $X_{sr}, Y_{sr}$ )/mm	Actual value: $P$ /mm	Theoretical value: $P$ /mm
A(68.2)	(-113.5, 38.7)	(-107.5, 38.7)	6	6.61
B(68.9)	(-133.0, 45.9)	(-126.0, 45.9)	7	6.95
C(56.9)	(-64.5, 60.4)	(-65.0, 60.4)	0.5	0
D(39.9)	(134.5, 73.1)	(117.5, 71.9)	-17	-17.06
E(39.5)	(126.5, 77.3)	(108.0, 76.7)	-18	-17.63

表中A、B点实际测量的水平视差 $P > 0$ ,且与理论计算的视差值基本相同,即固体胶处在正视差位置,三维显示在屏幕后方;C点实测视差近似等于零;D、E点实测水平视差 $P < 0$ ,也与理论计算值基本相同,因此笔筒处在负视差位置,三维显示在屏幕前方.由此证实了改进的方法在实际系统设计中的可行性.

### 3 结论

通过研究多数图像传感器在高帧频视频模式下的读出像素分辨率与显示器支持分辨率的关系,在平行式三维显示基础上,利用多数传感器的部分预留像素,将读出像素阵列中用于显示的部分在水平方向进行相应偏移,偏移后的显示阵列送入3D显示器进行显示,最终在视差图中获得了水平正、负视差,实现了三维再现景象在屏幕前后方的显示.通过在自行研制的系统中验证,实验结果证实该方法可产生 $P > 0$ 的正视差,且设计的系统三维公共场景夹角从常规的 $29^\circ$ 最大能增加到 $34^\circ$ .该方法既保留了平行式优点,又克服了其缺点且未引入其他问题,对研究合适的正负视差及三维立体效果改进方面有很好的指导作用.

#### 参考文献

[1] KENICHIRO M, ATSUO H, MASAKI E, et al. Spatial distortion prediction system for stereoscopic images [J]. *Journal of Electronic Imaging*, 2006, **15**(1): 013002-1-12.

[2] GREBENYUK K A, PETROV V V. Experimental verification of the condition for eliminating vertical parallax in a stereoscopic system with convergent optical axes [J]. *Journal of Optical Technology*, 2012, **79**(1): 6-8.

[3] FANG En-bo, LI Da-hai, WANG Qiong-hua, et al. Realization of 3D-mouse in autostereoscopic display and its applications [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(4): 605-609.

方恩博,李大海,王琼华,等.自由立体显示器上立体鼠标的实现及其应用研究 [J]. *光子学报*, 2010, **39**(4): 605-609.

[4] WANG Qiong-hua, PAN Dong-dong, LI Xiao-fang, et al. Relation between viewer's pupil diameter and visual fatigue in

autostereoscopic display [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(3): 350-353.

王琼华,潘冬冬,李小方,等.自由立体显示器观看者瞳孔直径与视疲劳关系 [J]. *光子学报*, 2011, **40**(3): 350-353.

[5] HOU Chun-ping, AZIMOV N, YU Si-le. Mathematical models of stereoscopic imagery system and methods of controlling stereo parallax [J]. *Journal of Tianjin University*, 2005, **38**(5): 455-460.

侯春萍,阿陆南,俞斯乐.立体成像系统数学模型和视差控制方法 [J]. *天津大学学报*, 2005, **38**(5): 455-460.

[6] ZHAO Meng, JIN Yi-cheng, YIN Yong. Research on binocular parallax model and depth perception in stereo display [J]. *Computer Engineering*, 2011, **37**(17): 271-273.

赵猛,金一丞,尹勇.立体显示中双目视差模型和深度感知研究 [J]. *计算机工程*, 2011, **37**(17): 271-273.

[7] HUANG Tao, ZHU Qiu-dong, WANG Yong-tian, et al. Paraxial magnification of stereoscopic display [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(1): 116-118.

黄涛,朱秋东,王涌天,等.立体显示中的垂轴放大率 [J]. *光子学报*, 2010, **39**(1): 116-118.

[8] DI X, LINO E, PANOS N. Quality of experience for the horizontal pixel parallax adjustment of stereoscopic 3D videos [C]. *IEEE International Conference on Consumer Electronics*, 2012, 394-395.

[9] KIM J, KIM N, OH S. Depth budget for visual comfort in stereoscopic watching environment [J]. *International Journal of Computer Science and Network Security*, 2013, **13**(1): 7-12.

[10] WEI C, JEROME F, MARCUS B, et al. New stereoscopic video shooting rule based on stereoscopic distortion parameters and comfortable viewing zone [C]. *SPIE*, 2011, **7863**: 786310.

[11] DENG Huan, WANG Qiong-hua, LI Da-hai, et al. Parallax images acquired by parallel camera array with shift [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(11): 2985-2988.

邓欢,王琼华,李大海,等.平行摄像机阵列移位法获取视差图像的研究 [J]. *光子学报*, 2009, **38**(11): 2985-2988.

[12] ALADDIN N A. Distortions in stereoscopic displays [C]. *SPIE*, 1992, **1669**: 2-9.

[13] DENG Huan, WANG Qiong-hua, LI Da-hai. Virtual toed-in camera method to eliminate parallax distortions of stereoscopic images for stereoscopic displays [J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2010, **18**(3): 193-198.

[14] LI Yuan-xing, JUN Yong-you, TOURADJ E, et al. Factors impacting quality of experience in stereoscopic images [C]. *SPIE*, 2011, **7863**: 786304-1-7.