

ZHAO Yun-xiu, QUAN Wei, HAN Cheng, *et al.* Perceptive Distance Estimating Based on Comfort Information for Stereo Images[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, **49**(2): 0215001

赵云秀, 权巍, 韩成, 等. 引用格式: 基于立体舒适度的立体图像感知距离估计[J]. 光子学报, 2020, **49**(2): 0215001

# 基于立体舒适度的立体图像感知距离估计

赵云秀, 权巍, 韩成, 李华, 张超, 刘祎

(长春理工大学 计算机科学技术学院, 长春 130022)

**摘 要:**提出了一种基于立体舒适度的双目图像感知距离估计方法.首先,推导双目立体图像的立体深度;然后进行主观实验获取实际人眼感知到的深度,分析其与立体深度间的差异;最后,将立体舒适度作为生理因素,建立感知距离、立体深度与视觉舒适度之间的关联关系,并得出感知距离的计算模型.在 IVY 公共数据集上进行实验验证,结果表明:当视觉舒适度值较高时,模型预测值的平均绝对值误差与均方根误差较主观评测值分别减少了 0.004 9、0.007 3;而当视觉舒适度值较低时,平均绝对值误差与均方根误差分别减少了 0.072 1、0.059 4.本模型结果更接近人类主观感知到的深度.

**关键词:**立体图像;立体视觉;感知距离;立体视觉舒适度;立体深度;主观评价;生理因素

中图分类号:TN911.73

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20204902.0215001

## Perceptive Distance Estimating Based on Comfort Information for Stereo Images

ZHAO Yun-xiu, QUAN Wei, HAN Cheng, LI Hua, ZHANG Chao, LIU Yi

(School of Computer Science and Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

**Abstract:** A novel method of estimating perceptive distance based on human factor for binocular image is proposed. Firstly, the stereo depth of binocular images are deduced. Then, subjective experiments are carried out to obtain the distance of human visual perception, and the difference between the perceptive distance and stereo depth is analyzed. Finally, the correlation between perceptual distance, stereo depth, and visual comfort is established using stereo comfort as a physiological factor, and the computational model for perceptive distance is built. Experiments are performed on a public dataset IVY. The results show that when the value of visual comfort is high, the mean absolute error and the root mean square error of the model prediction value are reduced by 0.004 9 and 0.007 3 respectively compared with the subjective evaluation value; and when the value of visual comfort is low, the mean absolute error and the root mean square error are reduced by 0.072 1, 0.059 4 respectively. It is shown that the results of the proposed model are closer to the human subjective perceived depth.

**Key words:** Stereo images; Stereo visual; Perceptive distance; Stereo visual comfort; Stereo depth; Subjective evaluation; Physiological factors

**OCIS Codes:** 150.5670; 100.6890; 330.1400; 330.4060; 330.502

## 0 引言

近年来,立体影像广泛应用于增强现实(Augmented Reality, AR)、虚拟现实(Virtual Reality, VR)游戏

**基金项目:**国家自然科学基金青年基金(No.61602058),吉林省科技攻关计划(Nos.20170203003GX, 20170203004GX, 20180201069GX),吉林省科技发展计划(Nos.20190103031JH, 20190201255JC)

**第一作者:**赵云秀(1993-),女,硕士研究生,主要研究方向为数字媒体与虚拟现实. Email:zhaoyx15@163.com

**导师(通讯作者):**韩成(1978-),男,副教授,博士,主要研究方向为数字媒体与虚拟现实. Email:hancheng@cust.edu.cn

**收稿日期:**2019-10-11; **录用日期:**2019-12-04

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

及影视产品中,相较于 2D 影像,其逼真的沉浸感受到广大用户的喜爱.是否包含深度信息是 3D 与 2D 影像最大的区别,在一定范围内,深度数据越大,立体感越强.较小的深度值会使人很难感受到立体感,而较大的深度值则会使双眼融合失败,产生视觉不适感.因此,人眼感知到的深度必须被合理控制在一定范围内.

感知距离反映人的空间意识,是人眼在三维场景中主观感知物体的深度距离,与可通过拍摄到放映过程一系列参数进行直接解算的“立体深度”<sup>[1-3]</sup>之间存在差异<sup>[4]</sup>.研究发现,与真实的物理环境相比,虚拟环境中人的感知距离与实际深度存在显著的误差<sup>[5-6]</sup>.现实世界中的感知距离估计精确度约为 94%,但在虚拟环境中平均下降到 80%左右,即低估或压缩 20%<sup>[5]</sup>.对于一个完整的三维空间知觉来说,已知的双目线索(如调节和辐辏)<sup>[7-8]</sup>与图像线索(如透视、颜色、纹理梯度、遮挡等)<sup>[9-11]</sup>同时作用,其他因素也在不同程度上影响感知距离.研究人员通过实验研究了亮度对比度对深度知觉的影响,验证了亮度对比度丰富了物理环境和计算机环境下的三维空间知觉<sup>[12]</sup>,并认为色彩是感知距离的重要线索之一<sup>[13]</sup>.同时,一些学者使用颜色作为深度提示<sup>[11,14-15]</sup>,通过实验证明了八种色度的视差范围差异<sup>[11]</sup>,测量了在平面 LED 显示器上引起立体感的色差阈值<sup>[14]</sup>,并且分析了红色和蓝色之间的颜色立体感<sup>[15]</sup>.考虑到颜色立体效果,KIM J Y 等<sup>[16-17]</sup>使用颜色信息修改感知距离模型.用色调和亮度作为颜色信息,测试了红底绿色物体和绿底红色物体两种立体视觉图像,结果表明,亮度和波长对深度知觉均有影响.通过测量这些影响,建立了一个感知距离模型,包括亮度和光学波长参数<sup>[16]</sup>.之后,又单独分析了色调对深度知觉的影响<sup>[17]</sup>.BAI Y 等<sup>[18]</sup>通过主观实验评估了色调对深度知觉的影响.建立了一个包含色调信息的感知距离模型.该模型与人眼视觉吻合较好,其感知距离与人眼感知更为相似.但是该实验仅以红色作为参考色调,模型缺乏普适性.此外,虚拟环境中的距离感知也受体验者自身心理影响.有研究发现自我感知可以增强个体的临场感,提高深度知觉.增强视觉真实性的同时生理上感知的距离感也会增强<sup>[19-20]</sup>.

感知距离受多参数共同作用,关系复杂,尽管一些学者根据颜色感知<sup>[16-17]</sup>或色调感知<sup>[18]</sup>修改立体深度模型以获得感知距离模型.然而,他们的模型仅考虑单一因素,且远远不足以获得真实的感知数据.因此,建立感知距离模型以更准确地计算人类感知是必要且重要的.考虑到图像因素及观看体验对感知距离的影响,本文在立体深度计算模型与立体舒适度模型的基础上通过主观人为评测结果,建立感知距离计算模型,并通过实验验证模型的有效性.

## 1 感知距离模型理论基础

立体感知距离受拍摄参数、观看参数及观看者自身因素的共同作用,关系复杂.同时,研究发现一些影响因素同时作用于感知距离与立体视觉舒适度,因此从立体视觉舒适度着手,将其作为生理因素.为获得感知距离计算模型,对立体深度与立体视觉舒适度进行分析.

### 1.1 立体深度

立体深度(Stereo Depth, SD)是指基于视差的深度距离,是拍摄立体影像时预制的深度,通过人眼成像原理可解算得出,其对应拍摄与播放过程中的硬件参数,是制作立体影视中通过参数可控的变量.在立体影像实拍过程中,由于屏幕尺寸和观看距离等参数的不同,拍摄人员使用现场立体监视器与观众在实际银幕上观看到的立体效果存在巨大差异.因此,为了保证对最终立体效果量化评估的准确性,对立体深度进行解算是必要的.

如图 1,SD 是计算出的立体深度, $Z$  是屏幕视差, $e$  是人眼瞳距(均值为 6.5 cm).当视差为 $-Z$ 时,交点在屏幕前,当视差为 $+Z$ 时,交点落在屏幕后面.视差可通过特征点匹配与观看参数计算得出.根据几何关系,SD 可以通过式(1)计算<sup>[1-3]</sup>,即 SD 可以由观看参数控制.

$$SD = \frac{e \times V}{e - Z} \quad (1)$$

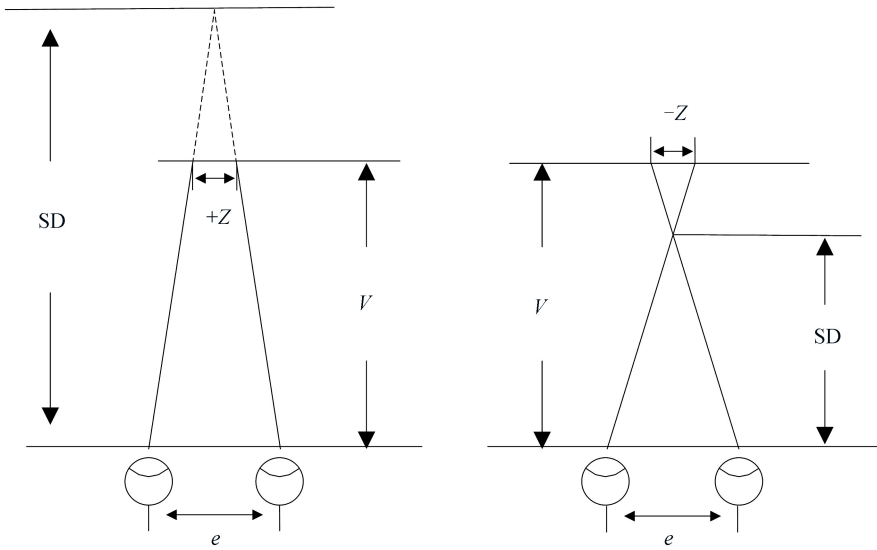


图1 立体影像观看模式  
Fig.1 Viewing mode of stereo images

### 1.2 视觉舒适度

立体视觉舒适度(Visual Comfortable, VC)反映的是观看者观看立体影像时的心理及生理反应,立体图像的显示机制与人眼的视觉生理学之间的矛盾导致会聚和焦点调节之间的一致,这引起一系列的不适,如视疲劳、恶心和头痛。

根据以往的工作<sup>[21]</sup>,立体舒适度可以通过客观模型计算得出.模型根据人眼视觉注意机制结合感兴趣区域(Region of Interest, ROI)及区域对比度获取客观舒适度.视觉舒适度获得流程如图2所示,首先,选择右眼为主视点,根据主视点图像获取显著区域,结合视差信息进一步获得感兴趣区域;然后,将感兴趣区域作为前景区域,提取前景区域的视差与宽度信息,计算前景与背景对比度;最后,根据舒适度评测模型<sup>[21]</sup>得出视觉舒适度量化值,即

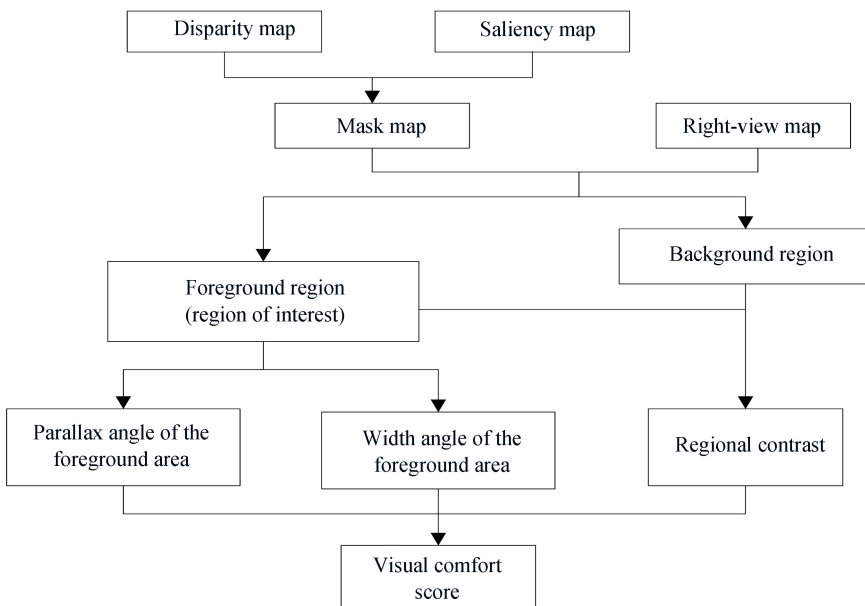


图2 基于立体舒适度评测模型获取视觉舒适度流程  
Fig.2 The flowchart of obtaining visual comfort based on the stereo comfort evaluation model

$$VC(D, w, c) = 4.8736 - 0.7084D + 0.1912\ln(w) - 0.0208D\ln(w) + 0.0015c^2 - 0.0572c \quad (0.50 \leq D \leq 2.00, 0.25 \leq w \leq 4.00) \quad (2)$$

式中, $D$ 为感兴趣区域的平均视差角, $w$ 是感兴趣区域的平均宽度角, $c$ 是前景区域与背景区域的区域对比度。

## 2 实验

在提出的感知距离估计方法中,感知的距离通过真实的人为感知来获取.因此,为了获取真实数据值,首先进行基于标准过程的主观实验,用以获取人类感知到的真实距离;其次,计算立体深度与立体舒适度.基于这些数据,建立感知距离估计模型.

### 2.1 双目图像采集

实验使用大恒视觉的两台摄像机(MER-310-12UC,  $2048 \times 1536$  像素).将两台摄像机放在一个稳定的水平三角支架上,并且保持一定距离,类似于人类的瞳孔距离(均值为  $6.5\text{ cm}$ ).相机使用相同的参数(如光圈、焦距等)同步拍摄.基于这些设置,拍摄了 21 对双目图像,其中的场景被设计成具有不同深度的两层.21 幅图像的右视图如图 3 所示.



图 3 实验图像的右视图  
Fig.3 Experimental images of right eye

### 2.2 主观实验设计

为获取主观感知距离的真实值(Ground Truth Perceived Depth, GTPD),进行了主观实验.根据相关研究<sup>[5-6,22]</sup>,主观方法有言语估计、视觉想象、感知匹配等.受言语估计<sup>[5]</sup>的启发,通过人工测量获得了感知距离.

#### 1) 观看环境

观看环境是根据 ITU-R BT.500-11<sup>[23]</sup>和 ITU-R BT.1438<sup>[24]</sup>中的推荐设置构建的.如图 4 所示,在暗室中对受试者进行实验.使用 NVIDIA Quadro K620 显卡,三星 2233RZ 3D 显示屏和 NVIDIA 无线立体眼镜.观看距离为  $1.5\text{ m}$ ,约为显示器高度的 5 倍.水平( $50\text{ cm}$ )和垂直( $30\text{ cm}$ )视角分别是  $18.96^\circ$ 和  $8.58^\circ$ .

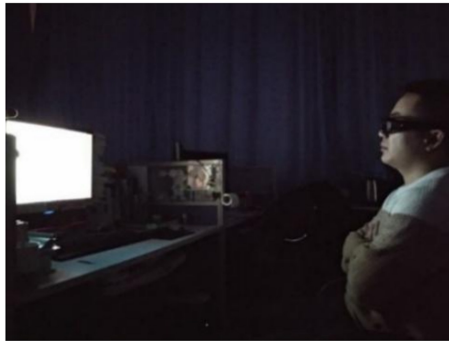


图 4 实验观看环境  
Fig.4 Viewing environment of experiment

#### 2) 实验人员

为了确保实验有效性,选择了 15 名受试者参与实验.年龄从 19 岁到 28 岁,所有人都具有正常的视力,并且没有立体融合的困难.在整个观看过程中,所有对象都可以准确、稳定地判断感知立体图像的位置并确定感知到的距离.

### 3) 感知距离的真实值

文献[5]中分析感知距离的测量需要三个基本的步骤:感知、分析和报告.首先,将物体放置在人员面前某个位置作为反馈信息,即感觉.在此阶段,人员通过视觉来感知目标对象与人员的距离或相对于参考对象的位置.其次,分析感知位置,以提高判断的准确性.用户采用第一阶段感知到的线索,并添加有助于正确估计距离的空间意识.第三阶段,人员将目标放置在距参考位置的某个位置,并告诉他人其认为目标物体将要到达的位置.

为获取实验人员感知到的距离数值,在实验过程中放置一个白板作为参考对象,参照文献[5]中实验方法进行主观数据的获取.在进行数据测量时,首先,佩戴立体眼镜观察立体图像,感受成像所处的空间位置;然后,当实验人员感知到的距离稳定后,通过感知的匹配结果指挥实验协助者移动参考物(白板)使其保持在感知到的成像处;最后,通过激光测距仪进行人眼与白板间距离的测量,并记录参考物的距离值.对于每对图像,计算每个实验人员感知到的距离值的平均值作为最后结果.其中部分实验图像对的真实感知距离值如表1所示.为避免疲劳和保持准确性,受试者在每观看两对图像后都会间歇休息,没有报告不适.

表 1 部分图像对的真实感知距离

Table 1 Ground truth of perceptual depth values of some image pairs

| Image number | GTPD/m |
|--------------|--------|
| 1            | 2.83   |
| 2            | 2.81   |
| 3            | 2.82   |
| 4            | 2.80   |
| 5            | 3.20   |
| 6            | 3.05   |
| 7            | 2.93   |

### 2.3 计算立体深度

基于屏幕和观看环境的参数,所有双目图像的立体深度(SD)可以根据式(1)计算得出.部分实验图像对的SD值如表2所示.

表 2 部分图像对的立体深度值

Table 2 Stereoscopic depth values of some image pairs

| Image number | SD/m |
|--------------|------|
| 1            | 2.68 |
| 2            | 2.98 |
| 3            | 2.88 |
| 4            | 2.88 |
| 5            | 3.72 |
| 6            | 2.98 |
| 7            | 2.68 |

### 2.4 计算立体视觉舒适度

根据1.3节中提到的舒适性评估方法,可以计算所有实验图像的立体视觉舒适度(VC).它们值的范围从3.84到4.51.部分图像的VC值如表3所示.

表 3 部分图像对的立体视觉舒适度值

Table 3 Stereo visual comfortable values of some image pairs

| Image number | VC   |
|--------------|------|
| 1            | 4.22 |
| 2            | 3.93 |
| 3            | 4.23 |
| 4            | 4.13 |
| 5            | 3.84 |
| 6            | 4.13 |
| 7            | 4.00 |



### 3 分析讨论

通过第 2 节获得的实验数据建立感知距离估计模型.首先,分析不同舒适度下的真实感知距离值与计算得到的立体深度的差异;然后,建立客观感知距离估计模型;最后,通过实验验证模型的有效性及其普适性.

#### 3.1 数据分析

图 5 为通过主观实验获得的双目图像的 GTPD 和通过客观模型计算的 SD 的值.可以看出,人类感知的深度随立体深度而变化,但它们并不完全相同,会存在一定差异.

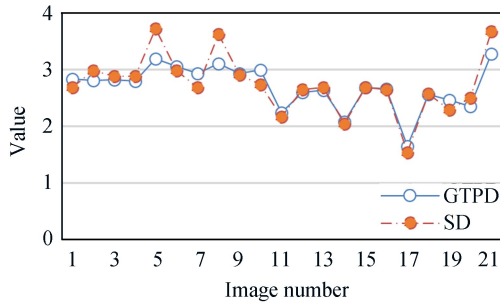


图 5 GTPD 与 SD 的关系

Fig.5 Relationship of GTPD and SD

为了获得更接近 GTPD 的深度值,将视觉舒适度(VC)作为生理因素纳入感知距离影响因素内.将  $d$  定义为 GTPD 和 SD 之间的差异,即

$$d = \text{GTPD} - \text{SD} \quad (3)$$

$d$  和 VC 的关系如图 6 所示,随着 VC 的增加, $d$  的值减小.因此可得:1)在舒适的观看体验下,人类感知的深度值接近立体深度;2)感知距离和立体深度之间存在差异,尤其是在出现不适感时;3)随着观看不适的增加,感知距离和立体深度之间的差异更大.

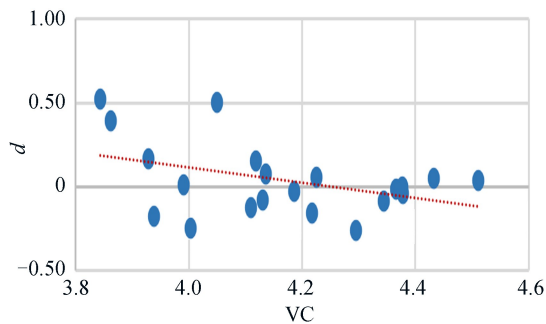


图 6  $d$  与 VC 的关系

Fig.6 Relationship of  $d$  and VC

#### 3.2 客观感知距离模型

使用最小二乘法获得  $d$  和 VC 的关系,即

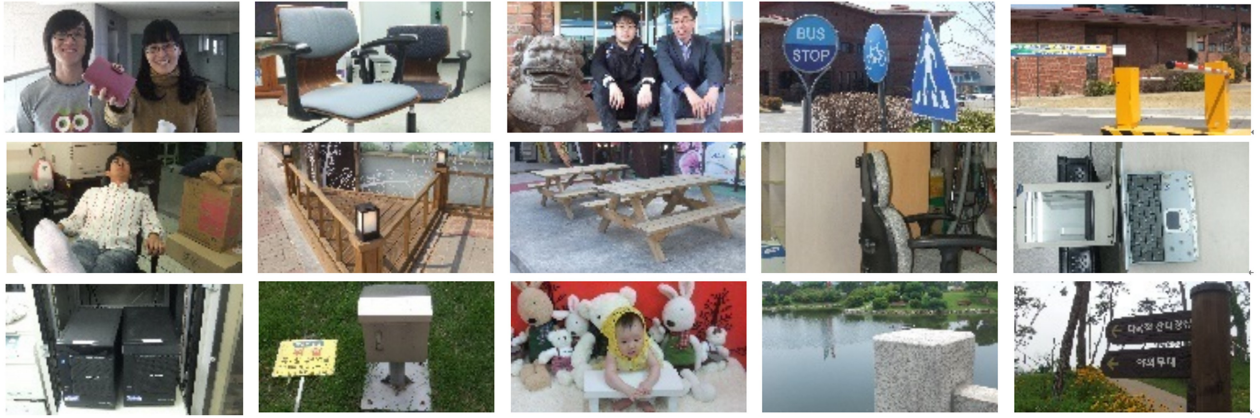
$$d = 0.13 - 0.0353 \times \text{VC} \quad (4)$$

根据式(3)与(4)建立目标感知距离(OPD)模型,即

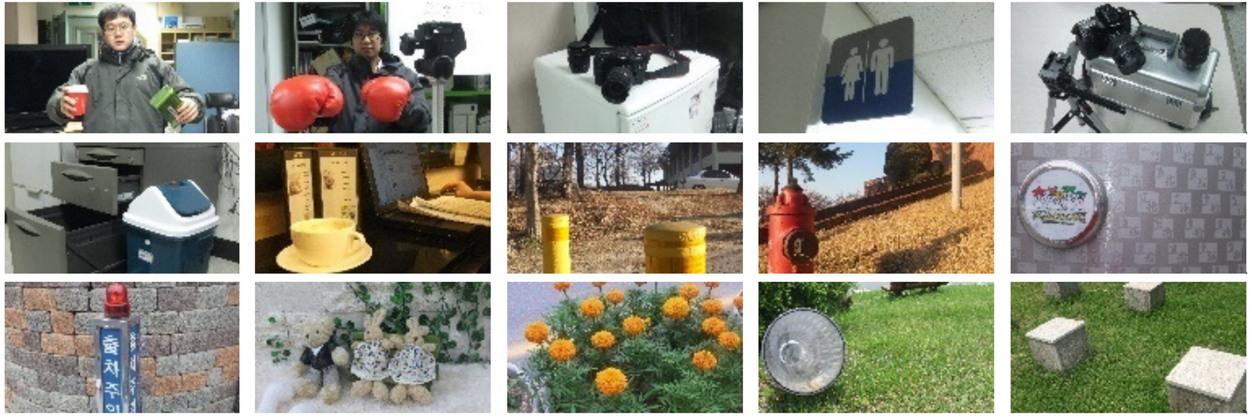
$$\text{OPD} = \text{SD} + 0.13 - 0.0353 \times \text{VC} \quad (5)$$

#### 3.3 验证

为验证感知距离计算模型,在公共数据集 IVY 上随机选择了 30 对双目图像进行了实验<sup>[25]</sup>,按舒适度将它们分为两组,如图 7 所示.第一组 15 幅图像的视觉舒适度较好,第二组图像的 VC 值较差.具体 VC 值如表 4 和表 5 所示.



(a) The first group images with better VC values



(b) The second group images with worse VC values

图 7 IVY 数据数据库中 30 组实验图像的右视图  
Fig.7 30 experimental images of right eye from IVY

表 4 第一组双目图像的 VC 值

Table 4 VC values of binocular images in the first group

|              |     |     |     |     |     |     |     |     |
|--------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Image number | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   |
| VC           | 3.6 | 3.6 | 4.2 | 4.3 | 3.6 | 4.1 | 4.0 | 4.0 |
| Image number | 9   | 10  | 11  | 12  | 13  | 14  | 15  |     |
| VC           | 4.0 | 3.7 | 3.6 | 3.7 | 4.1 | 3.6 | 3.7 |     |

表 5 第二组双目图像的 VC 值

Table 5 VC values of binocular images in the second group

|              |     |     |     |     |     |     |     |     |
|--------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Image number | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   |
| VC           | 3.5 | 3.5 | 3.6 | 3.4 | 2.7 | 2.8 | 3.5 | 2.8 |
| Image number | 9   | 10  | 11  | 12  | 13  | 14  | 15  |     |
| VC           | 3.3 | 3.3 | 1.9 | 3.6 | 3.6 | 3.5 | 3.3 |     |

通过主观实验得到了 GTPD,并根据公式计算得到 VC 和 OPD.对于第一组图像,GTPD、SD 和 OPD 之间的趋势关系如图 8 所示.可以清楚地看到,OPD 的值比 SD 更接近 GTPD.

用 Spearman 秩次相关系数(Spearman Rank Order Correlation Coefficient, SROCC)、Pearson 线性相关系数(Pearson Linear Correlation Coefficient, PLCC)、Kendall 秩次相关系数(Kendall Rank-order Correlation Coefficient, KRCC)、平均绝对误差(Mean Absolute Error, MAE)和均方根误差(Root Mean Squared Error, RMSE)<sup>[26]</sup>对 OPD 和 SD 与 GTPD 进行了定量比较,结果见表 6.PLCC、KRCC、SROCC 反映了两个量之间的变化程度,值的范围从 0 到 1,值 0 表示它们完全不相关,值越大,相关性越强.MAE 和 RMSE 反映了 OPD(SD)与 GTPD 之间的偏差,较小的值代表更好的结果.可知 OPD 在第一组中的表现较优于 SD 值.

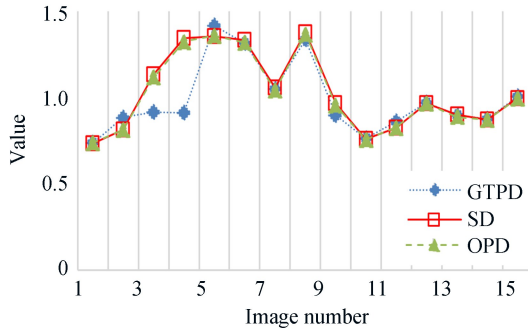


图 8 第一组图像的 GTPD, SD 和 OPD

Fig.8 GTPD, SD and OPD of images in the first group

表 6 第一组的相关性分析

Table 6 Correlation analysis of the first group

| Correlation coefficient | SROCC   | PLCC    | KROCC   | MAE     | RMSE    |
|-------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| SD                      | 0.906 2 | 0.832 5 | 0.784 7 | 0.065 6 | 0.129 7 |
| OPD                     | 0.910 7 | 0.843 1 | 0.790 5 | 0.060 7 | 0.122 4 |

对于第二组的图像,计算 GTPD、VC 和 OPD.三者间的趋势关系如图 9 所示.从图 8 和 9 的对比可以看出,当 VC 值较低时,SD 和 GTPD 的差异较大,当 VC 值较高时,差异较小.通过三者趋势关系图可知,感知距离计算模型的 OPD 值都较 SD 更接近 GTPD.分析相关度和误差值可知 OPD 的 RMSE 值,从 0.054 1 降低到 0.042 0,MAE 误差值也从 0.072 1 降低到 0.059 4.

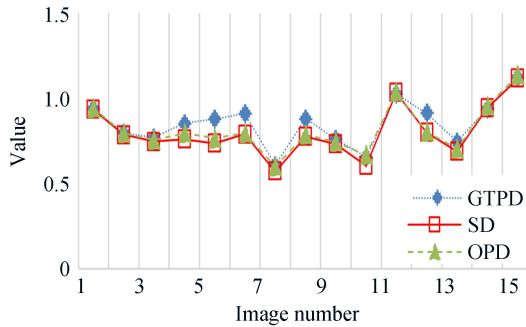


图 9 第二组图像的 GTPD,SD 和 OPD

Fig.9 GTPD, SD and OPD of images in the second group

综上所述,舒适度越高,立体深度越接近人们感知的深度.实验表明,无论是对视觉舒适性好的图像还是对视觉舒适性差的图像,用本文模型计算的感知距离都有较好的效果.特别是对于舒适度较差的的图像,可以在很大程度上减少误差.

## 4 结论

本文建立了感知距离、立体深度和视觉舒适度之间的关系.通过主观实验获得人眼在观测立体图像时感知到的深度距离,并建立了基于视觉舒适度的感知距离计算模型,通过在 IVY 公共数据集上进行实验验证了其有效性.结果表明:当视觉舒适度值较高时,模型预测值较主观评测值的 Spearman、Pearson、Kendall 相关系数分别提升了 0.004 5、0.010 6、0.005 8,平均绝对值误差与均方根误差分别减少了 0.004 9、0.007 3;而当视觉舒适度值较低时,平均绝对值误差与均方根误差分别减少了 0.072 1、0.059 4.该模型在舒适和不舒适的场景中都较立体深度计算模型结果更接近人眼感知值.因为目前模型的计算结果和主观评价之间仍然存在一些差异,在下一步中,将考虑其他因素,提高感知距离的准确性.

## 参考文献

- [1] ZILLY F, MULLER M, EISERT P, *et al.* The stereoscopic analyzer-an image-based assistance tool for stereo shooting and 3D production[C]. Proceedings of 17th IEEE International Conference on Image Processing, Los Alamitos: IEEE



- CPS, 2010: 4029-4032.
- [2] ZILLY F, KLUGER J, KAUFF P. Production rules for stereo acquisition[C]. Proceedings of the IEEE, 2011, **99**(4): 590-606.
- [3] HEINZLE S, GREISEN P, GALLUP D. Computational stereo camera system with programmable controlloop[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2011, **30**(4): 94.
- [4] GUAN S H, LAI Y C, CHEN K W, *et al.* A tool for stereoscopic parameter setting based on geometric perceived depth percentage[J]. *IEEE Transactions on Circuits & Systems for Video Technology*, 2016, **26**(2): 290-303.
- [5] LIN C J, WOLDEGIORGIS B H. Interaction and visual performance in stereoscopic displays: a review[J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2015, **23**(7): 319-332.
- [6] RENNER R S, VELICHKOVSKY B M, HELMERT J R. The perception of egocentric distances in virtual environments-a review[J]. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 2013, **46**(2): 23.1-23.40.
- [7] LANG M, HORNING A, WANG O, *et al.* Nonlinear disparity mapping for stereoscopic 3D[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2010, **29**(4): 75.
- [8] KOESSLER T, HILL H. Focusing on an illusion: accommodating to perceived depth[J]. *Vision Research*, 2019, **154**: 131-141.
- [9] NG A K T, CHAN L K Y, LAU H Y K. Corrective feedback for depth perception in CAVE-like systems[C]. 2017 IEEE Virtual Reality, 2017: 293-294.
- [10] BRIDGE H. Effects of cortical damage on binocular depth perception[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2016, **371**(1697): 20150254.
- [11] CHEN Z, SHI J, TAI Y. Stereoscopic depth perception varies with hues[J]. *Optical Engineering*, 2012, **51**(9): 1487-1489.
- [12] TAI N C. Computational investigation of the effect of luminance contrast on depth perception in physical and simulated scenes[J]. *Computer-Aided Design and Applications*, 2015, **12**(1): 61-66.
- [13] FAUBERT J. Seeing depth in colour: more than just what meets the eyes[J]. *Vision Research*, 1994, **34**(9): 1165-1186.
- [14] OZOLINSH M, MUIZNIECE K, KRUMINA G. Distortion of color images on flat computer screen due to chromostereopsis[J]. *European Scientific Journal*, 2014, **10**(10): 533-538.
- [15] JUNG S W, KO S J. Depth map based image enhancement using color stereopsis[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2012, **19**(5): 303-306.
- [16] KIM J Y, KIM S H, SO G J. Perceived depth modeling based on color information[J]. *International Journal of Computer Theory and Engineering*, 2013, **5**(4): 716-720.
- [17] KIM J Y, KIM S H, SO G J. Evaluation of perceived depth model with change of hue information[J]. *International Journal of Computer and Communication Engineering*, 2014, **3**(1): 75-80.
- [18] BAI Y, ZHANG Y, LI Z. Perceived depth modeling based on chromostereopsis[C]. 2016 2nd IEEE International Conference on Computer and Communications, 2016: 723-727.
- [19] NG A K T, CHAN L K Y, LAU H Y K. Depth perception in virtual environment: the effects of immersive system and freedom of movement[C]. International Conference on Virtual, Augmented and Mixed Reality, Cham: Springer, 2016: 173-183.
- [20] EBRAHIMI E, HARTMAN L S, ROBB A, *et al.* Investigating the effects of anthropomorphic fidelity of self-avatars on near field depth perception in immersive virtual environments[C]. 2018 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces, 2018: 1-8.
- [21] QUAN Wei, ZHAO Yun-xiu, HAN Cheng *et al.* Comfort evaluation model based on region of interest and contrast of stereo images[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(12): 1210002.  
权巍, 赵云秀, 韩成, 等. 基于立体图像感兴趣区域及对比度的舒适度评价模型[J]. 光子学报, 2018, **47**(12): 1210002.
- [22] KLEIN E, SWAN J E, SCHMIDT G S, *et al.* Measurement protocols for medium-field distance perception in large-screen immersive displays[C]. 2009 IEEE Virtual Reality Conference, 2009: 107-113.
- [23] ITU-R BT.500-11, Methodology for the subjective assessment of the quality of television pictures[S]. 2002.
- [24] ITU-R BT.1438, Subjective assessment for stereoscopic television pictures[S]. 2000.
- [25] JUNG Y J, SOHN H, LEE S I, *et al.* Predicting visual discomfort of stereoscopic images using human attention model[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2013, **23**(12): 2077-2082.
- [26] YING H, JIANG G, YU M, *et al.* New stereo visual comfort assessment method based on scene mode classification [C]. International Workshop on Quality of Multimedia Experience, 2015: 1-6.