

## 汽车抬头显示动态畸变的主观实验评估

王韬, 李海峰\*

浙江大学光电科学与工程学院极端光学技术与仪器全国重点实验室, 浙江 杭州 310027

**摘要** 本文建立了一种基于双目3D显示观察的主观实验流程,利用主观实验数据来分析汽车车载增强现实抬头显示(AR-HUD)设备中的动态畸变对驾驶员主观感受的影响,同时评估观看来自不同眼盒位置的图像时双目融合过程中驾驶员可以接受的畸变大小临界值。实验研究结果显示,随着两眼之间的动态畸变差异的增大,驾驶员融合图像变得越来越困难,观看的不适程度也出现较快增长。同时本文也揭示了驾驶员在使用AR-HUD设备的过程中,同一眼盒两个不同位置处驾驶员可以接受的动态畸变临界条件为垂直畸变小于2%,水平畸变小于1%。此研究证实了动态畸变对驾驶员的主观感受具有较为显著的影响,并且为汽车抬头显示系统中光学设计的优化畸变过程提供了相关的数值约束参考。

**关键词** 动态畸变评估; 双目融合; 双目相机模型; 主观实验方法; 单因素方差分析

中图分类号 TP391.41

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS231831

## 1 引言

近些年来随着车载抬头显示技术的发展,与增强现实相结合的车载增强现实抬头显示(AR-HUD)辅助驾驶模块逐渐成为众多汽车及其配套厂商研究较多的重点模块之一。相较于传统抬头显示(HUD)<sup>[1]</sup>驾驶模块,AR-HUD可以将现实中的景物与行车参数实时结合,同时具有更大的视场角(FOV)和更远的虚像成像距离,从而避免了驾驶者在仪表盘和当前驾驶场景之间的视线切换,大大降低了由于切换导致事故发生的概率。

但车载AR-HUD系统自身成像性能<sup>[2]</sup>存在限制,同时最后的成像面往往为非标准面型的车挡风玻璃,因此驾驶员所观察到的图像会有畸变产生。与此同时,随着人眼位的变化,不同眼位处<sup>[3]</sup>所产生的畸变又会有所不同,即产生本文提到的动态畸变影响。目前针对AR-HUD的动态畸变矫正已有许多报道, Qin等<sup>[4]</sup>和Wei等<sup>[5]</sup>针对其设计的AR-HUD系统中产生的畸变问题,通过设置多个眼盒(eyebow)中不同位置多重结构的手段,利用相应的评价函数和操作数进行了光学手段的矫正,但没有实现不同眼位畸变的同时矫正; Yu等<sup>[6]</sup>针对eyebow中动态畸变问题,利用深度学习的方法对不同眼位处的畸变进行预测,通过对相应位置添加相对应的预畸变来进行算法矫正,但并未考虑不同眼位图像之间融合时畸变的矫正情况。由于驾驶员实际观察到的畸变图像是左右眼位于不同眼位处的畸变图像的融合,因此仅通过单一方式进行矫正并

不能很好地体现出不同眼位处畸变在双目融合过程中对驾驶员实际体验的主观影响。与此同时,当前光学设计过程中矫正畸变的方式均未给出明确的畸变控制的大小约束条件,这使得车载AR-HUD的光学设计过程对于畸变的约束往往停留于工程经验。

本文针对如何评价双目畸变融合过程中动态畸变对驾驶员的观看主观感受的影响提出了一种主观评价实验方案,同时也给出了光学设计过程中动态畸变校正的约束条件。本文首先对双目畸变形成的过程以及如何去实际模拟动态畸变做了基本的理论阐述,建立了一种动态畸变实验模拟模型;随后利用主观实验打分量表,开展了针对动态畸变评价的主观实验,采集了多名受试者在多个组别不同条件下的实验数据;最后对相应的数据进行了单因素方差分析和统计学处理。实验结果表明,不同畸变的组合对驾驶员的主观感知有着较大影响,同时该实验结果也为HUD光学设计过程中动态畸变的矫正提供了一个较为明确的设计约束指标。

## 2 基本原理

## 2.1 AR-HUD中双目融合引起的动态畸变

车载AR-HUD系统<sup>[7-9]</sup>主要由像源、反射镜以及车挡风玻璃构成,其基本成像原理如图1所示。在成像过程中,像源(PGU)处的图像经由反射镜系统和车挡风玻璃反射进入人眼,在距挡风玻璃前一定位置处成一放大正立的虚像并与前方实际行车环境叠加,实现驾驶信息在现实环境中的实时显示。

收稿日期: 2023-11-24; 修回日期: 2023-12-13; 录用日期: 2023-12-29; 网络首发日期: 2024-01-09

通信作者: \*lihaifeng@zju.edu.cn

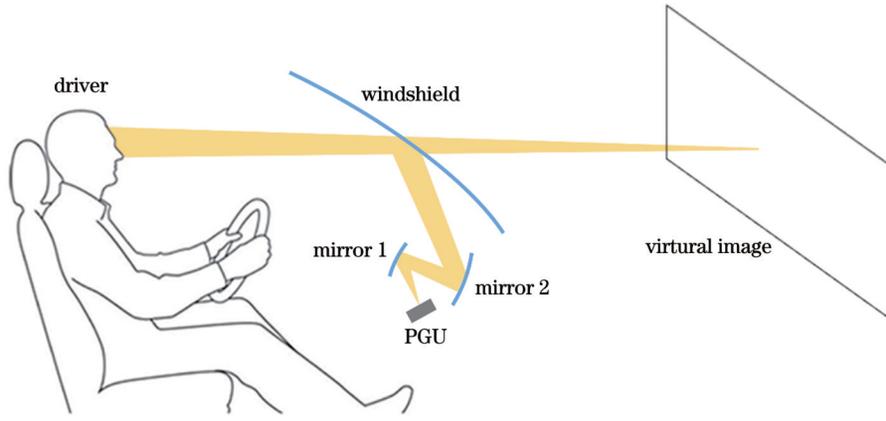


图 1 车载 AR-HUD 成像过程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of vehicle-mounted AR-HUD imaging process

AR 成像系统设计之初通常会将 eyebox 大小和 FOV 作为基本的设计指标, eyebox 即为允许驾驶员观察到目标图像的矩形空间大小, 在传统 HUD 光学设计的畸变控制过程中, 其未评估双目融合过程中畸变图像对驾驶员的影响。由于 HUD 光学系统本身以及挡风玻璃曲率不同所引入的像差问题, 其在不同的眼位处观察到的虚像畸变往往是不一致的,

如图 2 所示, 这也会导致其畸变在不同眼位处的大小以及形状有所改变, 从而使得双目融合后的图像超过人的忍受范围而出现观感不适的问题。对于驾驶员来说, 实际人眼观察到的 HUD 图像实质是大脑将双目所成的像进行融合后的结果, 因而不同眼位处图像能否顺利融合会对驾驶者产生较大的主观影响。

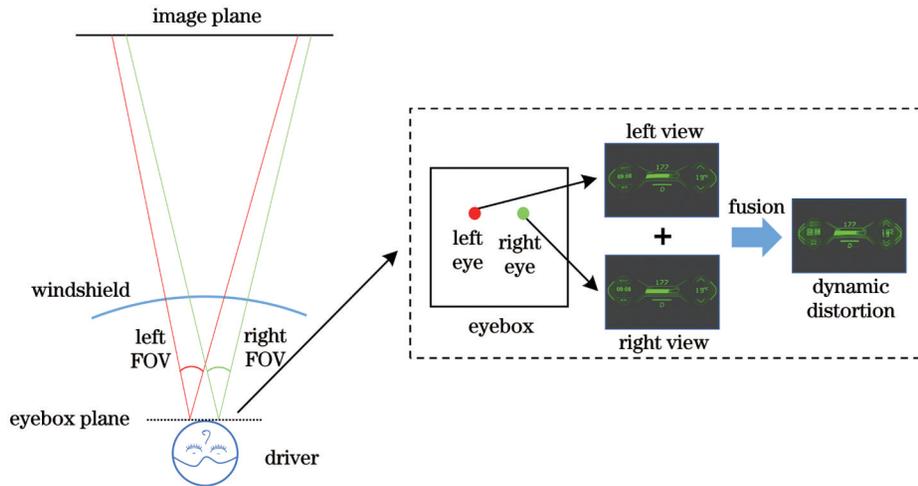


图 2 车载 AR-HUD 动态畸变融合过程示意图

Fig. 2 Schematic diagram of dynamic distortion fusion process of vehicle-mounted AR-HUD

### 2.2 动态畸变分析

在实际的 HUD 设计过程中, 畸变的大小和正负性往往是不确定的。图 3 展示了几种典型的双反射镜<sup>[10]</sup>车载 HUD 畸变网格图, 图 3(a)、3(b)、3(c)均为双反射镜结构的车载 HUD 及其畸变网格图像, 但像源位置以及光路结构均不同。对于不同结构的 HUD, 其对应的畸变形状也有所不同。针对图 3 所示的常见的不规则畸变情况, 本文采取对图像中畸变进行正交分解的方式来定量描述当前畸变大小以及方向情况, 从而在后续实验中模拟类似畸变下 HUD 的显示图像。

如图 4 所示,  $P$  点为距离原点  $r$  的理想成像点, 其

坐标为  $(x, y)$ ,  $P'$  点为距离原点  $r'$  的实际成像后的畸变点, 坐标为  $(x', y')$ , 在光学仿真软件中, 图像网格中某点处的最大畸变<sup>[11-14]</sup>定义式为

$$D_{\max} = \frac{R_{\text{distortion}}}{R_{\text{predicted}}} \times 100\%, \quad (1)$$

式中:  $R_{\text{distortion}}$  为畸变点距理想成像点的距离, 大小为  $R_{\text{distortion}} = dr = \sqrt{(x' - x)^2 + (y' - y)^2}$ ;  $R_{\text{predicted}}$  为理想成像点距原点的距离, 大小为  $R_{\text{predicted}} = r = \sqrt{x^2 + y^2}$ 。

为了单独合成和研究特定方向上畸变对驾驶员主观感受的影响, 可以将图像中某处最大的畸变点的畸

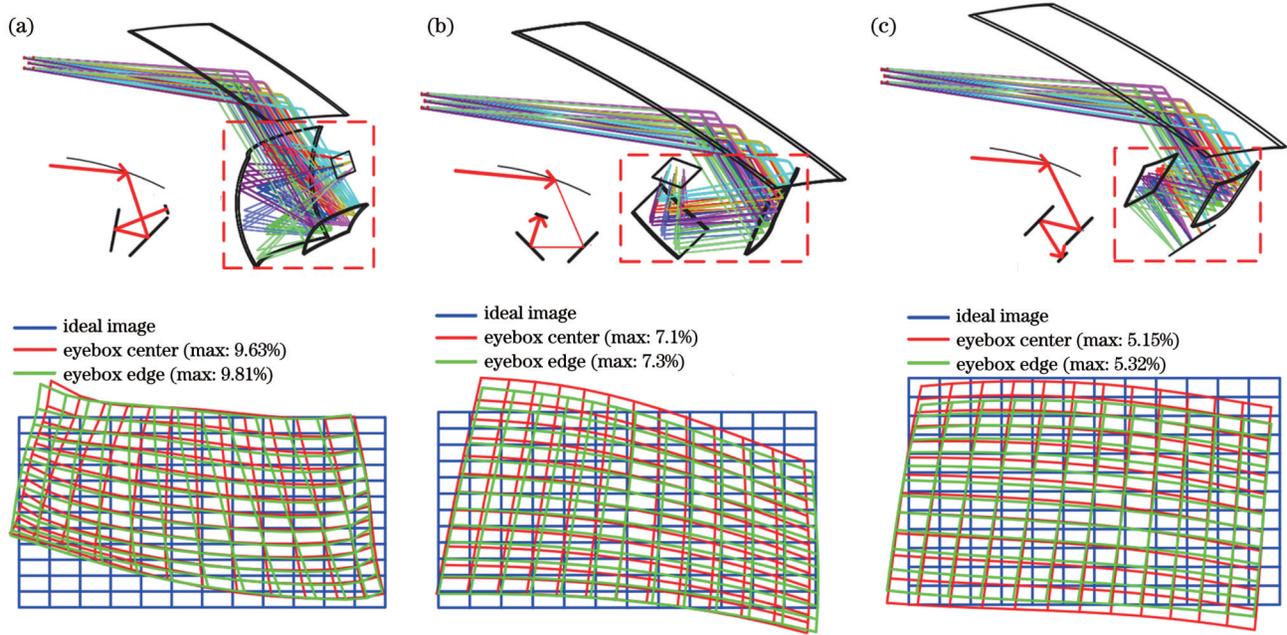


图 3 几种典型的车载 HUD 及其畸变网格图<sup>[11]</sup>。(a) HUD1; (b) HUD2; (c) HUD3

Fig. 3 Distortion grids of several typical vehicle-mounted HUDs<sup>[11]</sup>. (a) HUD1; (b) HUD2; (c) HUD3

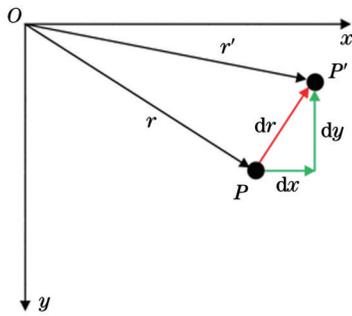


图 4 畸变计算过程示意图

Fig. 4 Schematic diagram of distortion calculation process

变在图像像素坐标系中做正交分解,图像中任意位置处的最大畸变由水平  $x$  方向的水平畸变与垂直  $y$  方向的垂直畸变线性组合得到,即给定任意图像上的畸变点,其畸变均可由以下公式来进行定义和控制:

$$D_{\text{horizontal}} = \frac{dx}{x} = \frac{x' - x}{x} \times 100\%, \quad (2)$$

$$D_{\text{vertical}} = \frac{dy}{y} = \frac{y' - y}{y} \times 100\%, \quad (3)$$

式中:  $D_{\text{horizontal}}$  为水平  $x$  方向的畸变;  $x$  与  $x'$  代表图片中像素的横坐标值;  $D_{\text{vertical}}$  为垂直  $y$  方向的畸变;  $y$  与  $y'$  代表图片中像素的纵坐标值。

贝塞尔曲线<sup>[15]</sup>一般是用于二维图形的一种数学曲线方法,常用于形状的拟合,其可以通过改变贝塞尔控制点的坐标来实现任意曲线或曲面形状的拟合。如图 5 所示为利用贝塞尔曲线构成的贝塞尔曲面对控制图像形状的示意图,图中选取了  $4 \times 4$  共计 16 个控制点设置在图像边缘及其内部形成一个控制多面体,其下方对应的是其相应的贝塞尔曲面片,这里用等参数

线网格来可视化描述其形状变化的过程,其同时也是图像像素位置的整体变化情况。

对于任意一控制点  $P_{ij}$ , 其对应的曲面片上的点可以由一个双参数函数给出:

$$Q(u, v) = \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n P_{ij} B_{i,m}(u) B_{j,n}(v), \quad (4)$$

$$B_{i,m}(u) = C(m, i) u^i (1-u)^{m-i}, \quad (5)$$

$$C(m, i) = \frac{m!}{i!(m-i)!}, \quad (6)$$

式中:  $Q(u, v)$  为曲面片上的任意点;  $P_{ij}$  为第  $i$  行第  $j$  列的控制点;  $(u, v)$  为参数值,  $u$  和  $v$  取值范围均为  $[0, 1]$ ;  $m$  和  $n$  分别表示  $x$  和  $y$  方向上控制点的总数目; 函数  $B_{i,m}(u)$  和  $B_{j,n}(v)$  均为贝塞尔基函数,其计算方式由式(5)和式(6)给出。

贝塞尔曲面的计算公式表明,对每一个控制点进行变换也就是对其对应表面片整体的变换。可以利用该数学映射关系,在改变图像边缘角点处的像素纵横坐标值的同时,通过参数值  $u$  和  $v$  的变化实现图像中其他像素点的坐标映射,从而实现正常图像坐标到畸变图像坐标的映射变换,最终得到所需要的畸变图像。

### 2.3 动态畸变实验模拟图像生成

驾驶员在观看车载 AR-HUD 的过程中,图像源经由反射式成像系统成像至驾驶员双目,即人的左右眼分别注视的是远处 HUD 成像位置处几乎相近的两幅不同图像。为了模拟这一过程,本文利用 Unity 三维建模软件中设置的双目相机来分别记录搭建场景中的左右眼图像。如图 6 所示为 Unity 中所搭建的三维模型,主要由汽车、行驶道路、显示路牌、建筑和透明 HUD 显示内容构成。在 Unity 中,编写基于贝塞尔曲

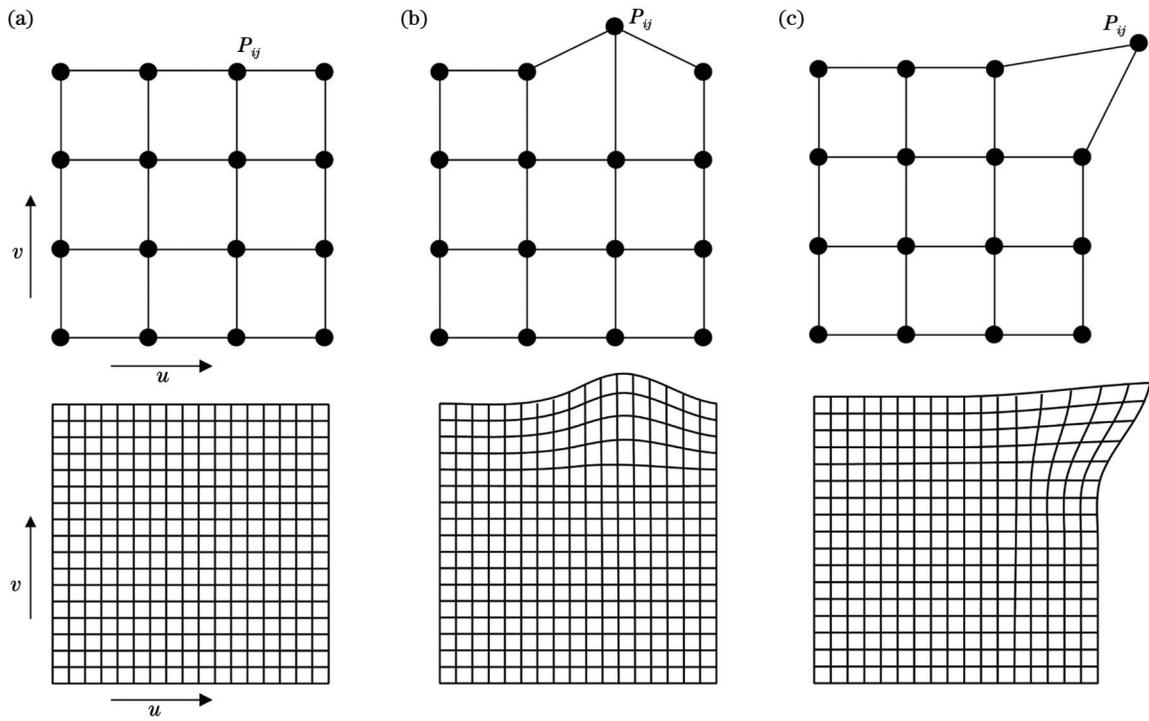


图 5 控制点变动引起的图像形状变化示意图。(a)无变动;(b)边缘控制点移动;(c)角点控制点移动

Fig. 5 Schematic diagram of image shape changes caused by changes in control points. (a) No change; (b) edge control point moves; (c) corner control point moves

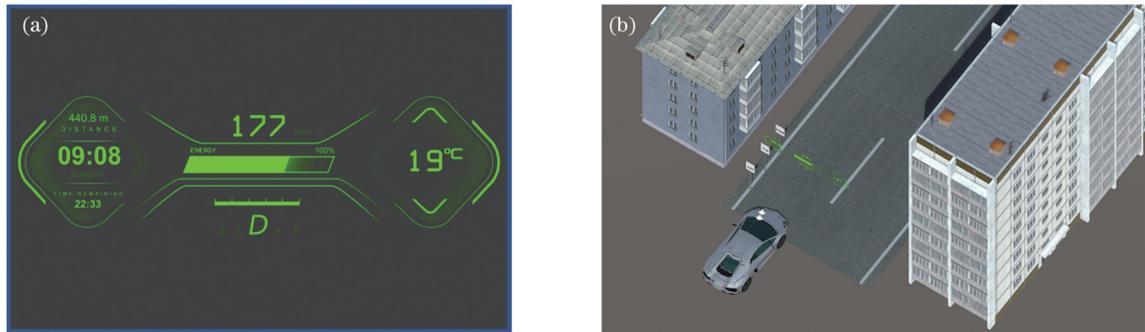


图 6 Unity 建模软件中对双目动态畸变场景的模拟。(a)无畸变原始图像;(b)Unity 三维场景

Fig. 6 Simulation of binocular dynamic distortion scenarios in Unity. (a) Original image without distortion; (b) three-dimensional scene in Unity

面的函数,设定 HUD 原始图像的 4 个角点、边缘的中点以及图像的中心点共 9 个点作为贝塞尔曲面的控制点,根据畸变的方向与大小,分别对角点或中心点位置处的控制点赋予不同的  $u$  值和  $v$  值,根据式(4)可以得到变换前后的映射关系,将原图形利用映射关系变换后即可得到具有人为设定的畸变大小和方向含畸变的 HUD 内容。

实验中用左右虚拟相机代替人眼对三维场景进行记录,得到两幅含视差的图像,将合成的畸变图像分别导入到场景中,叠加得到两幅带畸变的 HUD 双眼位图像,其记录和显示过程的原理<sup>[16]</sup>示意图如图 7 所示。在图 7(a)的记录过程中,场景中某一点  $P_0$  经相机基距为  $L_1$  的左、右相机分别成像在其对应

的相机传感器平面的  $S_l, S_r$  处,其中所设置的虚拟相机的传感器尺寸大小为  $W_s$ ,那么在对应的获取过程中,位于传感器平面处的像素坐标可以由以下公式得到:

$$X_{sl} = f \cdot (L_1 + 2X_0) / 2Z_0, \quad (7)$$

$$X_{sr} = -f \cdot (L_1 - 2X_0) / 2Z_0, \quad (8)$$

$$Y_s = f \cdot Y_0 / Z_0, \quad (9)$$

式中:  $X_{sl}$  和  $X_{sr}$  分别代表左右图片在传感器平面处像素的横坐标;  $Y_s$  为其公共的像素纵坐标;  $f$  为场景相机的焦距大小;  $X_0, Y_0, Z_0$  的物理意义代表的是物空间中记录场景点  $P_0$  的坐标值。

完成图像的记录后,利用人眼对三维图像的感知来模拟对应场景下人的左右眼观察到不同图像的情

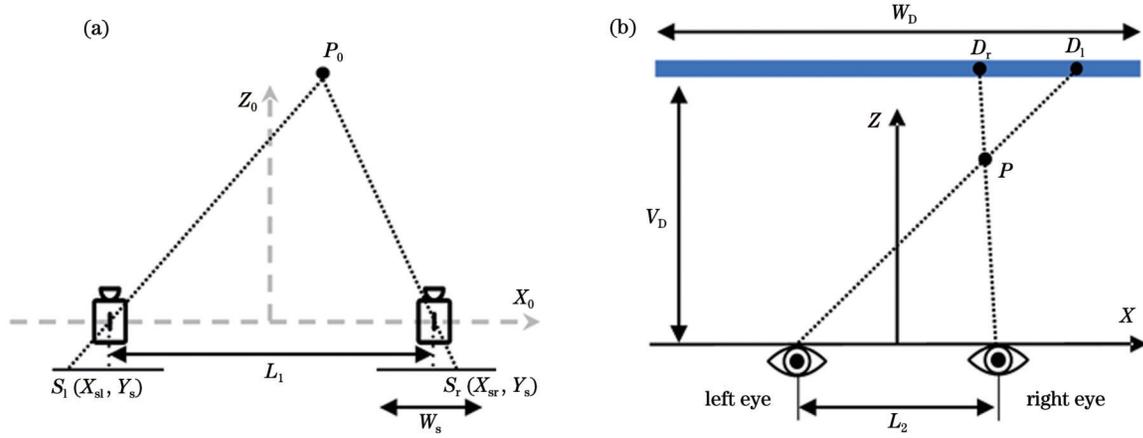


图 7 双目相机信息获取以及显示示意图。(a)双目相机获取左右图片过程;(b)左右格式图片再现显示过程

Fig. 7 Schematic of information acquisition and display of binocular camera. (a) Schematic of capturing a pair of side-by-side pictures by binocular camera; (b) schematic of displaying a pair of side-by-side pictures

景,其显示的过程如图 7(b)所示。 $D_l$ 和 $D_r$ 代表投影屏幕上对应的左右图片所映射的点,人距离屏幕的观察距离为 $V_D$ ,显示区域的宽度大小为 $W_D$ ,所设置的虚拟相机的传感器尺寸大小为 $W_s$ ,投影屏幕上的对应点经由 3D 眼镜分别进入人的左右眼从而实现立体感知,最终人眼在实际空间中感知到的 $P$ 点位置坐标可以由以下公式<sup>[16]</sup>给出:

$$k = W_D / W_s, \quad (10)$$

$$X = k(X_{sl} + X_{sr}) \cdot L_2 / [2 \cdot (L_2 - kX_{sr} + kX_{sl})], \quad (11)$$

$$Y = kY_s \cdot L_2 / (L_2 - kX_{sr} + kX_{sl}), \quad (12)$$

$$Z = V_D \cdot L_2 / (L_2 - kX_{sr} + kX_{sl}), \quad (13)$$

式中: $X_{sl}$ 和 $X_{sr}$ 分别代表左右图片在传感器平面处 $S_l$ 和 $S_r$ 像素的横坐标; $Y_s$ 为其公共的像素纵坐标; $k$ 为投影尺寸大小与记录相机传感器大小的比值; $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ 分别表示像空间中点 $P$ 的空间坐标; $L_2$ 为人眼的瞳距大小。

将上述记录过程中的 $X_{sl}$ 、 $X_{sr}$ 以及 $Y_s$ 代入以上公式,并通过调整观察距离 $V_D$ 以及相应的参数即可再现可供人眼感知的两幅带畸变的 HUD 双眼位图像,同

时其在投影荧幕上也具有一定深度显示的效果。本文利用该方法实现了对动态畸变场景的模拟,从而复现不同场景下驾驶员应对双目动态畸变的情形。

### 3 主观实验设置与流程

#### 3.1 实验设置

实验中选用的投影显示装置是型号为 W-1130X 的 BENQ 数字光处理(DLP)投影机,其图像源是 1.65 cm 大小的数字微镜器件(DMD)芯片,投出的图像物理分辨率为 1920 pixel×1080 pixel,投射比为 1.3,刷新率为 120 Hz,最高亮度为 2300 ISO 流明,实验在关闭灯光的黑暗条件下进行,投影尺寸大小设置为 155 cm×87.2 cm,模式设置为标准模式,根据投射比计算将投影机放置于幕布前 2.015 m 处。投影机支持左右、上下以及帧序列等模式下播放 3D 影片,配合 BENQ 的 3D 眼镜即可实现对左右眼观察图像的实时帧分离,进行双目融合实验,因此左右眼观察到的实时帧即是预先合成的左右眼不同畸变图像序列。如图 8 所示,

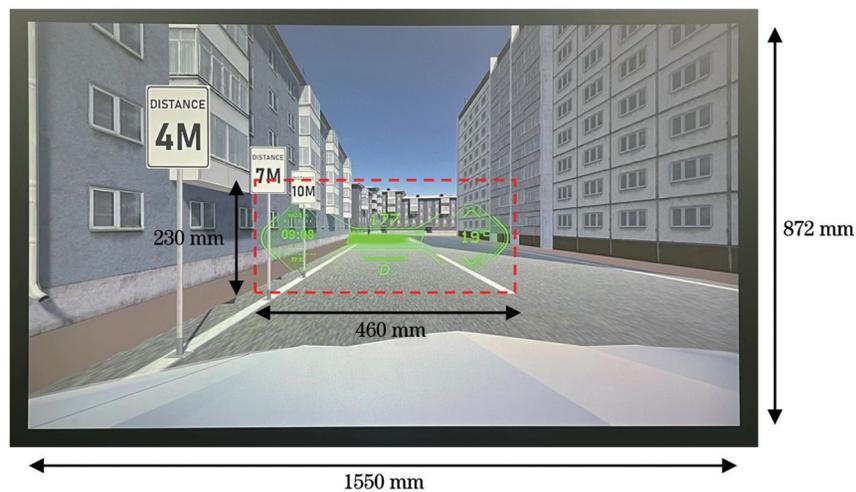


图 8 实验场景投影界面手机拍摄的图片

Fig. 8 Picture of experimental scene captured by cellphone camera

HUD 显示区域位于图像中心,实际显示的 HUD 图像的大小为 460 mm×230 mm。观察者位于幕布正前方 2.25 m 处,佩戴对应的 3D 眼镜进行主观观察实验,根据切换的图片序列以及对应的问题完成主观实验问答环节。

本文使用的 HUD 畸变图像共分为 3 种,分别为垂直畸变、水平畸变以及旋转畸变,合成方式为第 2 节中提到的方法,参考文献[3-6]中图像的最大畸变值,将垂直畸变的大小区间设置为 1%~6%,从 1% 到 6% 依

次合成 6 张图片,畸变大小逐步增加,相邻图片相差 1%;同理将水平畸变的大小区间设置为 0.5%~3%,同样合成 6 张图片,相邻图片相差 1%;旋转畸变即为两者对应的线性组合,共计 3 组 18 张图片。受试者左眼观察到的图像是没有畸变的正常图像,而右眼则是会根据组别进行变化的畸变图像。图 9 所示为 3 种畸变与正常图像所叠加的效果图,是未佩戴眼镜时现实中所观察到的两图片叠加的效果。

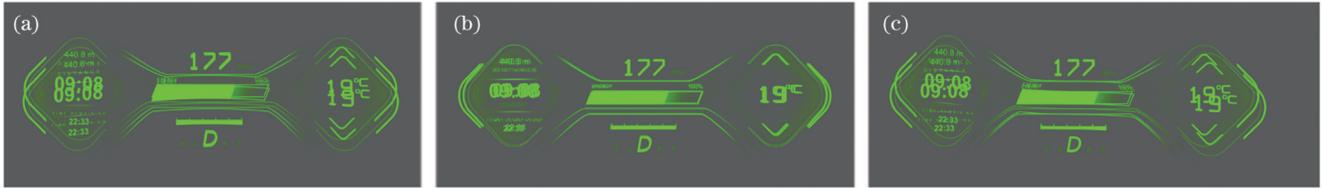


图 9 实验中 3 种畸变图像叠加展示。(a)垂直畸变;(b)水平畸变;(c)旋转畸变

Fig. 9 Superposition display of three kinds of distortion images in experiment. (a) Vertical distortion; (b) horizontal distortion; (c) rotational distortion

本实验中参与的受试者共有 18 人(其中 13 名男性,5 名女性),年龄分布在 22~25 岁之间,所有受试者的视力(或矫正视力)均在 1.0 以上,无色盲或色弱,且具有正常的立体影像观察辨识能力。

### 3.2 实验流程

实验在关灯的黑暗条件下进行,房间内温度约为 25 °C,受试者首先会进行基础的图像认知指导,

整体的实验流程如图 10 所示,实验前首先完成晕动症<sup>[17]</sup>问卷调查(SSQ),此问卷的目的是排除实验显示设备本身对于主观感受打分过程的影响。随后受试者会被要求观看对应某一组序列的三维图像并对图片中出现的主观问题进行打分,图像序列的顺序按随机顺序对合成的三组图片序列进行播放。

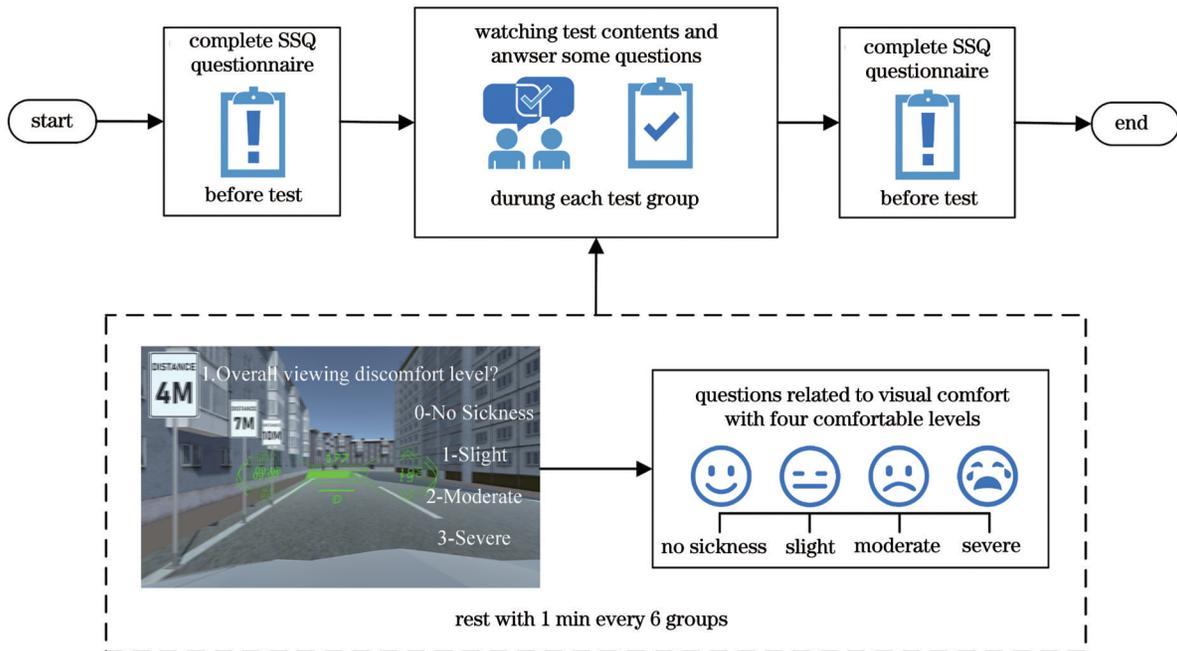


图 10 动态畸变评价主观实验流程图

Fig. 10 Subjective experimental procedure for dynamic distortion evaluation

在每一组的评价过程环节中,需要设置相应的不适感等级以供受试者选择,在此过程中需要用快速的主观评分标准来进行实时的记录,这里采用的是 VIMS level (VIMSL) 打分<sup>[18]</sup>方式, VIMSL 打

能够通过几个等级的设置来概括当前受试者对于图像的实时主观感受。本实验中设立了 4 个等级的舒适评价指标,0~3 分别对应以下内容:0-无不适感;1-稍有不适;2-中度不适;3-强烈不适。受试者

需要根据问题给出对应的不舒适度等级评价,其对应的实验结果将按照观看的图片组别进行保存,与特定畸变的图像一一对应。每组实验结束后进行一分钟的休息后再进行下一组实验,在完成所有的实验项目之后受试者需要再次填写 SSQ 问卷,随后对受试者进行关于畸变与观看影响的问卷调查后结束实验。

## 4 实验结果分析

### 4.1 单变量方差检验

将 18 名受试者对于垂直、水平以及旋转畸变的共 3 组实验结果利用方差齐次检验<sup>[19]</sup>计算,如表 1 结果显示,其 Levene 统计量分别为 2.301、0.988 和 1.401,对应

的差异显著性值分别为 0.051、0.435 和 0.241,均大于 0.05,说明三组数据其统计学量具有方差齐性,可采用 F 检验进行单因素方差分析(One-way ANOVA)。将三组数据分别与主观实验的 VIMSL 进行单因素方差分析,表中 df 为自由度, F 为检验量的值,通常定义为组间方差与组内方差的比值, Sig. 为差异显著性值。在 ANOVA 分析结果中,垂直畸变以及旋转畸变的显著差异性值均为 0.000,小于 0.01,数据表明这两类畸变与人的主观评价图像观感打分有显著相关性,在主观评价过程中对应的变化会对受试者产生较大影响。而水平畸变的显著性则要大于 0.05,这表示水平方向上的变化对人观感的影响较小,不具有明显的显著性差异。

表 1 畸变主观实验单因素方差分析结果

Table 1 One-way variance analysis results of distortion subjective experiment

Distortion type	Homogeneity test of variances		Result of ANOVA analysis		
	Levene statistic	Sig.	df	F	Sig.
Vertical distortion	2.301	0.051	5	17.820	0
Horizontal distortion	0.988	0.435	5	0.952	0.456
Rotational distortion	1.401	0.241	5	10.197	0

### 4.2 主观评价结果统计分析

经单因素方差分析表明畸变的变化对人的主观感受有较大影响,为了进一步分析得到驾驶员开始出现明显不适感的临界畸变大小值,本小节通过对不同类型畸变大小与主观评价打分的统计学分析来确定驾驶员所能接受的动态畸变变化临界值情况。

如图 11(a)所示为垂直畸变与 VIMS level 的一元线性关系,横坐标代表垂直畸变从 1% 变化到 6% 的 6 个等级,折线图代表随着畸变逐渐增加过程中主观打分的高低,右侧 y 轴分值越高代表观感越不舒适(满分 3 分),条形图则表示相邻组别间分数插值斜率

的变化关系,即后一组分数减去前一组分数的差值,左侧 y 轴数值越高代表其组间差别感知变化越大。从图中可以看到,随着垂直畸变的增加,受试者的 VIMS level 逐渐上升,并且在畸变增大的过程中不适感明显增加。这说明 VIMS level 与畸变大小有着较为明显的线性正比关系,并且从差值条形图中可以看到,组别 2 与 3 之间相较于 1 与 2 之间出现了较为明显的差值变化,随后出现较快增长,这表明组别 2 与 3 切换过程中人的不适感增加最为明显,即垂直畸变为 2% 可以看作是开始出现明显不适的一个临界值。

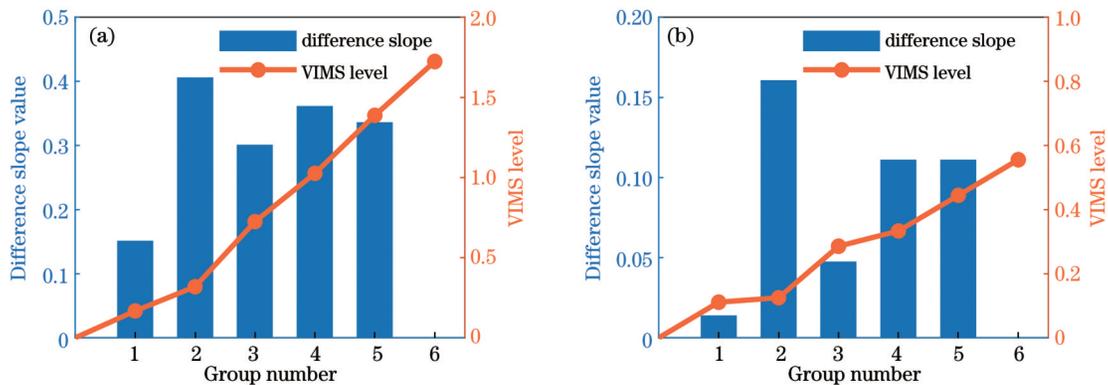


图 11 畸变与 VIMS level 的统计折线条形图。(a)垂直畸变;(b)水平畸变

Fig. 11 Statistical line-bar chart of distortion and VIMS level. (a) Vertical distortion; (b) horizontal distortion

同样地,如图 11(b)所示为水平畸变与 VIMS level 的统计折线条形图,横坐标代表垂直畸变从 0.5% 变化到 3% 的 6 个等级。从图中可以看到,随着

畸变的增加,受试者的 VIMS level 同样也出现了上升现象,但相较于垂直畸变的上升趋势来说变化幅度较小,最大值仍未超过 0.5,在轻微不适的范畴内。

这表明水平畸变的大小变化对 VIMS level 的影响较小,其组间并不具有明显的显著性差异。这是由于人眼的双目系统视场角是水平展开的,双目融合过程中水平调整双目位置更为容易,而垂直视差需要双目分别调节位置,对畸变图像变化的容忍度<sup>[20]</sup>更低,因而相较于垂直畸变,水平畸变的影响更小。同时从差值条形图中仍可以看到,组别 2 与 3 的差值变化在整体相邻组别变化的斜率差值中最大,表明水平畸变为 1% 时是受试者能感到明显不适的一个变化点。

图 12(a)中所展示的为旋转畸变与 VIMS level 的统计折线条形图,即水平畸变与垂直畸变之间的组合

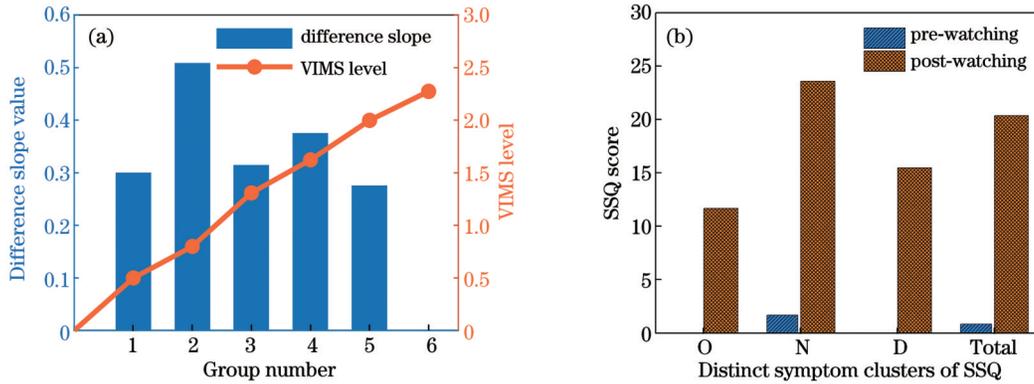


图 12 旋转畸变折线条形图与 SSQ 分数条形图。(a) 旋转畸变; (b) SSQ 分数

Fig. 12 Rotational distortion line-bar chart and SSQ score bar chart. (a) Vertical distortion; (b) SSQ score

图 12(b)中展示了 12 位受试者在观看内容前后的 SSQ 分数分布情况,无论是基于总分的(Total)评价还是 SSQ 中三大不适分类(O,D,N)的单独分数记录中,受试者观看实验内容前后的 SSQ 分数均略有升高,但其总分数均位于 25 以下,Total 项的总分数小于 20,这表明实验设备本身的显示状况较为可靠,实验设备对受试者造成不适感的影响可以基本忽略,先前进行的主观实验所得到的结论具有一定的可靠性。

## 5 结 论

本文通过构建动态畸变的合成方法与显示模型,针对如何评价双目畸变融合过程中不同眼位畸变对驾驶员观看的影响这一问题,提出了一种主观评价实验方案,确定了动态畸变对驾驶员观看 HUD 图像时的主观影响的变化情况。其中垂直畸变以及组合的旋转畸变对驾驶员的影响最大,并且随着畸变大小的增加,观察者的不适程度也会有着较为明显的上升;同时通过统计学分析给出了设计矫正畸变时可供参考的约束设计指标,即垂直畸变小于 2% 与水平畸变小于 1% 时,驾驶员所观察到的 HUD 图像观感较好,没有出现明显的不适感变化。

在此结论的基础上,工程师可以通过光学设计或是算法手段对车载 AR-HUD 设备中的动态畸变进行

对于受试者的影响,横坐标代表垂直和水平畸变组合后的 6 个等级。图 12(a)的结果表明,受试者对旋转畸变的感知最为明显,其 VIMS level 随着旋转畸变的增大上升较快,在第 5 组(垂直畸变 5%,水平畸变 2.5%)时不适感分数已大于 2(中度不适),远高于先前单一畸变对人观察的影响。这表明相较于单一畸变,组合的旋转畸变更容易引起驾驶员观察 HUD 的不适,同时第 2 组斜率差值在各组中位于最高水平也表明,先前垂直畸变与水平畸变分别测试时 2% 和 1% 临界点是驾驶员主观感受变化的临界节点,说明将垂直畸变 2% 与水平畸变 1% 定义为驾驶员开始出现明显不适感的临界指标是合理的。

合理定量的矫正和优化,为光学设计过程中引入了基于主观实验得出的参考指标,使得光学设计结果在满足参数要求的基础上,也能为驾驶者带来舒适安全和符合直觉的观感体验。

## 参 考 文 献

- 周婷, 乔文, 华鉴瑜, 等. 增强现实抬头显示现状与展望[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(8): 0811008.  
Zhou T, Qiao W, Hua J Y, et al. Status and prospect of augmented reality head-up display[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(8): 0811008.
- Kim K H, Park S C. Optical system design for a head-up display through analysis of distortion and binocular parallax[J]. Korean Journal of Optics and Photonics, 2020, 31: 88-95.
- Xu N, Yu F Z, Xu J, et al. HUDNet: a dynamic calibration method for automotive augmented reality head-up-displays[J]. Displays, 2023, 78: 102453.
- Qin Z, Lin S M, Luo K T, et al. Dual-focal-plane augmented reality head-up display using a single picture generation unit and a single freeform mirror[J]. Applied Optics, 2019, 58(20): 5366-5374.
- Wei S L, Fan Z C, Zhu Z B, et al. Design of a head-up display based on freeform reflective systems for automotive applications [J]. Applied Optics, 2019, 58(7): 1675-1681.
- Yu F Z, Xu N, Chen S Q, et al. Direct distortion prediction method for AR-HUD dynamic distortion correction[J]. Applied Optics, 2023, 62(21): 5720-5726.
- 蒙道杨, 杨鑫, 宋强, 等. 面向车载增强现实抬头显示的大幅面体全息光波导[J]. 光学学报, 2023, 43(10): 1011002.  
Meng D Y, Yang X, Song Q, et al. Large-scale volume

- holographic optical waveguide for automotive augmented reality head-up display[J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(10): 1011002.
- [8] 冉舒文, 刘显明, 雷小华, 等. 基于双目视觉的抬头显示虚像三维形貌测量[J]. *光学学报*, 2022, 42(19): 1912001.  
Ran S W, Liu X M, Lei X H, et al. Three-dimensional shape measurement of head-up display virtual image based on binocular vision[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(19): 1912001.
- [9] 陈晓伟, 曹妍, 薛嘉隆, 等. 双自由曲面平视显示系统光学模组优化设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2023, 60(9): 0922001.  
Chen X W, Cao Y, Xue J L, et al. Optimal design of optical modules for double free-form surface head-up display systems[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(9): 0922001.
- [10] Fan R D, Wei S L, Ji H R, et al. Automated design of freeform imaging systems for automotive heads-up display applications[J]. *Optics Express*, 2023, 31(6): 10758-10774.
- [11] Peddie J. *Technology issues[M]//Augmented reality: where we will all live*. Cham: Springer, 2023: 253-364.
- [12] Liu Y, Cheng D W, Wang Q W, et al. Optical distortion correction considering radial and tangential distortion rates defined by optical design[J]. *Results in Optics*, 2021, 3: 100072.
- [13] 刘光伟, 蔡毅, 陈东启, 等. 考虑广角镜头畸变的精确目标识别距离估算[J]. *红外技术*, 2021, 43(12): 1158-1165.  
Liu G W, Cai Y, Chen D Q, et al. Distance estimation for precise object recognition considering geometric distortion of wide-angle lens[J]. *Infrared Technology*, 2021, 43(12): 1158-1165.
- [14] Li Y T, Zhang J, Hu W W, et al. Laboratory calibration of star sensor with installation error using a nonlinear distortion model[J]. *Applied Physics B*, 2014, 115(4): 561-570.
- [15] 沈志飞. 基于点集贝塞尔曲线优化的多参量协同规划激光振镜加工系统研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2021.  
Shen Z F. Research on laser galvanometer processing system of multi-parameter collaborative planning based on point set Bezier curve optimization[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2021.
- [16] Xia Z P, Hwang A. Self-position awareness-based presence and interaction in virtual reality[J]. *Virtual Reality*, 2020, 24(2): 255-262.
- [17] Emoto M. Simulator sickness questionnaire: an enhanced method for quantifying simulator sickness[J]. *Displays*, 2008, 29: 90-99.
- [18] Liu R, Cui S S, Zhao Y, et al. VIMSNet: an effective network for visually induced motion sickness detection[J]. *Signal, Image and Video Processing*, 2022, 16(8): 2029-2036.
- [19] 王飞霞, 王俊轶, 李晓华, 等. 激光投影电视中图像细节层次感的恰可察觉差[J]. *光学学报*, 2020, 40(5): 0533001.  
Wang F X, Wang J Y, Li X H, et al. Just-noticeable difference of image contour rendering for a laser projection television[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(5): 0533001.
- [20] Gu L, Cheng D W, Liu Y, et al. Design and fabrication of an off-axis four-mirror system for head-up displays[J]. *Applied Optics*, 2020, 59(16): 4893-4900.

## Dynamic Distortion Assessment in Automobile Head-Up Displays with Subjective Methods

Wang Tao, Li Haifeng\*

*State Key Laboratory of Extreme Photonics and Instrumentation, College of Optical Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang, China*

### Abstract

**Objective** In the automobile augmented reality head-up display (AR-HUD) optical system, due to its imaging performance and the non-standard shape of the windshield on the last imaging surface, the image observed by the driver will have some distortion. Meanwhile, as the viewpoint changes in the eyebox, the distortion will also be different at various eyebox positions, which will cause great trouble to the driver's perception during driving. At present, there have been a lot of studies on the distortion correction of AR-HUD, such as employing algorithm correction or adding optimization functions during optical design. However, the above-mentioned distortion correction methods are all for distortion correction at a single viewpoint. The binocular fusion process of human eyes is not involved. Since the image observed by the driver is essentially the fusion of distorted images of the left and right eyes at different eyebox positions, monocular correction alone cannot well represent the experience of the drivers during the binocular fusion processes. Therefore, it is necessary to conduct corresponding subjective experiments to evaluate the actual perception of the driver during the fusion process of different viewpoint images and provide certain constraints of dynamic distortion for the optical design process.

**Methods** We adopt homogeneity of variance test, one-way ANOVA, and statistical chart analysis. First, we conduct a basic theoretical explanation of dynamic distortion and how to simulate dynamic distortion, build a dynamic distortion experimental simulation model, and synthesize a series of display images for later subjective experiments. Then we utilize the subjective experimental scale and carry out a subjective experiment for dynamic distortion evaluation. Experimental data from multiple subjects in different group conditions are collected in this section. Finally, statistical methods are leveraged to analyze previously obtained data, with one-way ANOVA and chart analysis processed in this section.

Additionally, significant difference results and line-bar charts are employed to simultaneously analyze the experimental data quantitatively and visually find the relationship between dynamic distortion and drivers' subjective perception.

**Results and Discussions** A total of three sets of results of 12 subjects for vertical, horizontal, and rotational distortion are calculated using the homogeneous test of variances. As shown in Table 1, the Levene statistics are 2.301, 0.988, and 1.401, respectively, and the corresponding difference significance values are 0.051, 0.435, and 0.241, respectively, all greater than 0.05, indicating that the statistical quantities of the three sets of data have homogeneity of variances and the F test can be adopted to perform one-way ANOVA. Then three groups of data are subjected to single-factor variance analysis with VIMSL in subjective experiments. In the ANOVA analysis results, the significant difference values of vertical distortion and rotational distortion are both 0, less than 0.01. The results show that the factor dynamic distortion level has a significant effect on the VIMSL increments. However, the significant difference value of horizontal distortion is greater than 0.05, which means that the changes in the horizontal direction have a small effect on drivers' perception and there is no obvious significant effect on the VIMSL increments. In the statistical chart analysis (Figs. 10–11), as the distortion level increases, VIMSL-related evaluation indicators rise accordingly. There is a more obvious difference between Group 2 and Group 3, which shows that drivers' discomfort increases most significantly during the switching process between the two groups. This means that vertical distortion of 2% and horizontal distortion of 1% can be regarded as a value at which obvious discomfort begins to occur. However, the SSQ scores do not change significantly before and after viewing, which shows that the influence of the experimental equipment on subjects' discomfort can be ignored and the display condition of the experimental equipment itself is relatively reliable.

**Conclusions** We establish a subjective experimental procedure based on binocular 3D display observation and the subjective experimental data are adopted to analyze the subjective feelings of drivers caused by dynamic distortion in automobile AR-HUD devices. Meanwhile, the certain value of the distortion level that is acceptable to the drivers during binocular fusion when drivers are watching the images from different eyebox positions is evaluated. The experimental results show that different forms and levels of dynamic distortion both have a great effect on the driver's subjective perception. As the difference in dynamic distortion between the two eyes rises, it becomes increasingly more difficult for the driver to fuse the images, with rapidly increased discomfort level. Furthermore, we also reveal that the certain levels for the dynamic distortion acceptable to the driver at two different positions of the same eyebox are vertical distortion less than 2% and horizontal distortion less than 1%. The results show that the combination of different distortions has a great effect on the driver's subjective perception. Additionally, the experimental results also provide a clear design constraint index for dynamic distortion correction during the HUD optical design.

**Key words** dynamic distortion assessment; binocular fusion; binocular camera model; subjective experimental method; one-way analysis of variance