

基于光学传递函数的头戴显示器图像畸变检测

王孝艳**, 刘楚嘉, 漆宇, 庄其仁*

华侨大学信息科学与工程学院福建省光传输与变换重点实验室, 福建 厦门 361021

摘要 头戴显示器光学系统由于焦距短、视场大而容易产生图像畸变。提出了一种头戴显示器的图像畸变测量方法,采用单位矩阵的傅里叶变换图像作为标准测试图形,应用傅里叶变换分析了头戴显示器光学传递函数与测量图像球面化畸变的关系,得到了形状不变的关系曲线。实验测量了5种头戴显示器的图像球面化畸变,得到的负球面化枕形畸变范围为 $-22\% \sim -65\%$ 。结果表明:头戴显示器的球面化图像畸变量 C_{VR} 与方格成像实验的畸变量 D 具有一定的线性关系,且球面化图像畸变量 C_{VR} 的测量简单,能体现头戴显示器的整体图像畸变程度。该研究结果对头戴显示器的图像显示质量测量具有一定的参考价值。

关键词 测量; 头戴显示器; 标准测试图形; 图像畸变; 光学传递函数; 傅里叶变换

中图分类号 TN949.6

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.081205

Image Distortion Detection of Head-Mounted Display Based on Optical Transform Function

Wang Xiaoyan**, Liu Chujia, Qi Yu, Zhuang Qiren*

Fujian Provincial Key Laboratory of Light Propagation and Transformation,

College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen, Fujian 361021, China

Abstract The optical system of the head-mounted display is prone to image distortion generally because its focal length is short and its field of view is wide. An image distortion measurement method of head-mounted display is presented. A Fourier transform image of unit matrix is chose as standard test pattern, and the relationship between optical transfer function of head-mounted display and spherical distortion of image is analyzed with Fourier transform. Based on this method, the similar relationship curve are obtained. Image spherical distortion of five kinds of head-mounted display are measured, and the negative-pinched pincushion distortion is obtained which ranged from -22% to -65% . The results show that spherical distortion C_{VR} of the head-mounted display has linear relation with distortion quality of grid image measurement. However, the measuring method for spherical image distortion is simple, and the measuring results can reflect the distortion of the whole image. The results are of great reference value for measuring image quality of head-mounted display.

Key words measurement; head-mounted display; standard test pattern; image distortion; optical transform function; Fourier transform

OCIS codes 120.0120; 350.4800; 110.3000

1 引言

近年来,三维显示技术得到了学术界与工业界的广泛关注^[1]。随着显示技术的发展,头戴式虚拟现实(VR)显示技术已成为新一代具有立体感、真实感和交互性的视频显示技术,不仅在教育^[2]、娱乐、

模拟仿真训练、外科手术等^[3]基础领域得到广泛应用,而且在科学装置中的应用也初显成效^[4]。立体显示技术在给用户带来身临其境的视觉体验的同时,也会使观看者产生不同程度的不适感,该不适感被认为是立体显示产品在市场领域快速普及的主要障碍^[5],因此相关测量和标准化方法不断出现^[6-8]。

收稿日期: 2018-03-28; 修回日期: 2018-05-02; 录用日期: 2018-05-09

基金项目: 福建省科技计划(高校产学研合作)重大项目(2016H6016)、华侨大学2016年校级实验教学改革与建设课题(66661613)

* E-mail: qrzhuang@hqu.edu.cn; ** E-mail: xiaoyan.wang111@hqu.edu.cn

但头戴式显示技术的图像显示畸变检测与其他平板显示技术的图像显示畸变检测有很大不同,其主要特点是图像显示畸变不但与显示屏的显示畸变有关,还与光学组件有关,不能套用现有显示屏的图像畸变检测方法。因此,寻找一种高效实用的头戴显示器图像畸变检测方法很有必要^[9-12]。

光学系统的成像质量已有多种检测方法,比较传统的方法主要有瑞利判据和中心点亮度判别法、星点检测法^[13]、分辨率法^[14]、刀口阴影法^[15]、波像差法^[16]以及现在普遍使用的光学传递函数法等^[17],这些传统检测方法都有各自的优缺点。但将这些传统检测方法用于头戴显示器的光学系统检测时都具有一定的局限性,如:分辨率法只能评价光学系统分辨景物细部结构的能力,不能对像质的优劣做出评价;星点检测法虽然可以直观地检测像差,但无法给出定量的检验结果;刀口阴影法虽然可以定量测量像差,但测量结果受主观因素的影响^[13];光学传递函数法无法对光学系统的视场和畸变等做出检测和评价,而这正是头戴显示器图像质量的一个重要参数。

本文提出了一种基于光学传递函数的头戴显示器图像畸变检测新方法,采用新的标准测试图形,通过对图形的像进行傅里叶变换,计算球面化图像畸变量。因为头戴显示器的微显示屏为平面液晶屏,其显示的图像无需考虑图像畸变问题,所以球面化图像畸变量代表了头戴显示器光学系统的成像畸变程度。为了说明图像畸变测量方法的有效性,针对5个规格的头戴显示器分别进行测量,并与方格成像测量结果进行对比。

2 测量原理

头戴显示器图像畸变检测原理图如图1所示,图中头戴显示器内部的光学系统(目镜)将微显示屏上的测试图于明视距离250 mm处形成虚像。配置有广角镜头的电荷耦合器件(CCD)相机镜头处于头戴显示器前的眼睛所处的位置,明视距离处的虚像再成实像于CCD图像传感器上,并传送到计算机进行数据处理。由于带有广角镜头的CCD相机存在一定的像差,所以CCD相机采集到的微显示屏的图像不能代表头戴显示器的成像质量,需要进行修正。因此,在头戴显示器的微显示屏虚像位置(明视距离)放置一个标准平板显示器,平板显示器显示的图形与头戴显示器显示的图形完全一样,且图形大小与上述虚像的大小相当。首先移走图1中的头戴

显示器,使用CCD相机对标准平板显示器进行拍照,得到一个参考图像;再将头戴显示器放回光路,通过CCD采集被测图像,然后对被测图像和参考图像进行数据处理,得到头戴显示器光学系统的传递函数。

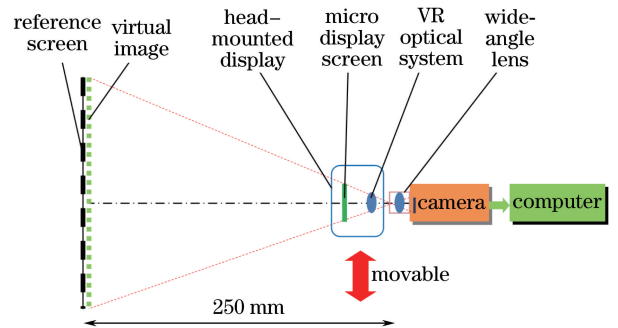


图1 检测原理图

Fig. 1 Principle diagram of detection

对于包含透镜的光学系统,光学系统的脉冲响应函数 $h(x, y)$ 的傅里叶变换就是空间频率的光学传递函数 $H(u, v)$ 。若头戴显示器显示的标准测试图形函数 $s_o(x, y)$ 经过光学系统成像在CCD相机的像面上,则像面的强度分布 $i_m(x, y)$ 可以表示为 $s_o(x, y)$ 和 $h(x, y)$ 的卷积:

$$i_m(x, y) = s_o(x, y) \otimes h(x, y), \quad (1)$$

对(1)式进行二维傅里叶变换,将空域函数转换为频域函数,可得:

$$I_M(u, v) = S_O(u, v) \cdot H(u, v), \quad (2)$$

式中: $I_M(u, v)$ 和 $S_O(u, v)$ 分别为 $i_m(x, y)$ 和 $s_o(x, y)$ 的傅里叶变换形式; u 和 v 为频域中两个坐标方向上的空间频率。

采用CCD相机对头戴显示器的微显示屏进行拍照的光学系统包括两部分,一个是头戴显示器光学系统,另一个是CCD相机光学系统。设前者的光学传递函数为 $H_{VR}(u, v)$,后者的光学传递函数为 $H_{CA}(u, v)$,则(2)式可写为

$$I_M(u, v) = S_O(u, v) \cdot H_{VR}(u, v) \cdot H_{CA}(u, v). \quad (3)$$

设标准平板显示器显示的图形函数为 $r(x, y)$,其傅里叶变换形式为 $R(x, y)$,经过CCD相机光学系统后的像函数为 $i_r(x, y)$,则像函数的傅里叶变换形式为

$$I_R(u, v) = R(u, v) \cdot H_{CA}(u, v). \quad (4)$$

将(3)、(4)式写成矩阵形式:

$$\mathbf{I}_M = \mathbf{S}_O \cdot \mathbf{H}_{VR} \cdot \mathbf{H}_{CA}, \quad (5)$$

$$\mathbf{I}_R = \mathbf{R} \cdot \mathbf{H}_{CA}. \quad (6)$$

设标准测试图形的傅里叶变换矩阵为单位矩阵 $S_0 = R = I$ (I 为单位矩阵), 则(5)、(6)式变为

$$I_M = H_{VR} \cdot H_{CA}, \quad (7)$$

$$I_R = H_{CA}. \quad (8)$$

由(7)、(8)式可得

$$H_{VR} = I_M \cdot I_R^{-1}, \quad (9)$$

(9)式即为头戴显示器光学系统的光学传递函数的矩阵表达式。该式说明, 当标准测试图形函数 $s_0(x, y)$ 的傅里叶变换矩阵为单位矩阵时, 头戴显示器光学系统的光学传递函数可以由头戴显示器和标准平板显示器上两个标准测试图形的 CCD 相机实像的傅里叶变换矩阵和逆矩阵相乘得到。而频域单位矩阵的空间标准测试图形函数矩阵为

$$s_0 = \text{ifft}(I), \quad (10)$$

式中: ifft 为傅里叶逆变换。

3 理论分析

3.1 标准测试图形

根据(10)式对单位矩阵进行傅里叶逆变换, 得到的空间图形如图 2(a)所示。这是一个黑底白线图形, 由向下偏离中心一个像素的 45° 斜线和左上角一个单一像素组成。为了使斜线通过光学系统成像后能体现系统的像差, 根据光学系统中心对称原理将图 2(a)所示的图形对称放置在四个象限中, 作为标准测试图形, 如图 2(b)所示。根据对称性, 物方图形的一个象限对应于像方图形的一个象限, 因此数据处理时只需针对一个象限的数据进行处理。

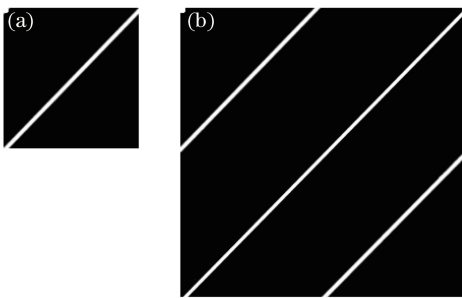


图 2 (a)空间图形和(b)标准测试图形

Fig. 2 (a) Spatial pattern and (b) standard test pattern

3.2 光学传递函数矩阵行列式与球面化像差的关系

场景中存在的直线特征由于受光学系统畸变的影响, 投影到图像后将弯曲成曲线^[18]。采用 Photoshop 软件对标准测试图形进行球面化畸变处理, 模拟仿真光学系统像差引起的图形球面化畸变, 如图 3 所示。首先假设 CCD 相机没有像差, 即 $H_{CA} = I_R = I$, 由(9)式可知 $H_{VR} = I_M$, 即像的傅里

叶变换矩阵就是头戴显示器光学系统传递函数矩阵。模拟头戴显示器标准测试图形在 CCD 相机所成的像的球面化数量在 $-100\% \sim 100\%$ 之间变化时, 头戴显示器光学传递函数矩阵 H_{VR} 的行列式值变化曲线如图 4(a)所示。图 4(a)显示, 当球面化数量为 0% (像没有畸变) 时, 行列式的值为最大值 1。这是因为标准测试图形经过无像差头戴显示器光学系统和无像差 CCD 相机光学系统成像后, 像的傅里叶变换矩阵 $I_M = I_R^{-1} = I$, 由(9)式知头戴显示器光学传递函数矩阵 $H_{VR} = I$ 为单位矩阵, 其行列式 $|H_{VR}|$ 的值恒为 1。从图 4(a)还可以看出: 随着像的球面化数量绝对值增大, $|H_{VR}|$ 值呈指数规律下降; 当球面化数量大于 50% 或小于 -50% 时, $|H_{VR}|$ 的值接近 0。这说明当光学传递函数矩阵行列式 $|H_{VR}|$ 的值小于 1 时, 其值越小, 头戴显示器光学系统的球面化像差越大。

当 CCD 相机存在像差时, $H_{CA} \neq I$ 。设 CCD 相机光学系统产生 20% 正球面化桶形畸变, 软件模拟头戴显示器标准测试图形在 CCD 相机中所成像的球面化数量在 $-100\% \sim 100\%$ 之间变化, 根据(9)式计算得到 H_{VR} 的行列式值的变化曲线如图 4(b)所示。比较图 4(a)和图 4(b)可以看出, $|H_{VR}|$ 的值随像的球面化畸变(包括曲线右侧的正球面化桶形畸变和左侧的负球面化枕形畸变)的变化趋势是相同的, 只是幅值不同。在正球面化畸变一侧(横坐标右侧), $|H_{VR}| = 1$ 对应像的球面化数量为 20% , 因头戴显示器光学系统没有产生像差, 说明畸变是由 CCD 相机光学系统引起的。当像的球面化数量为 0 (像没有畸变) 时, 表明头戴显示器光学系统产生负球面化像差(枕形畸变), 与 CCD 相机光学系统正球面桶形畸变刚好相互抵消, 其值为 -20% , 此时 $|H_{VR}|$ 也达到最大值, 为 8.65。

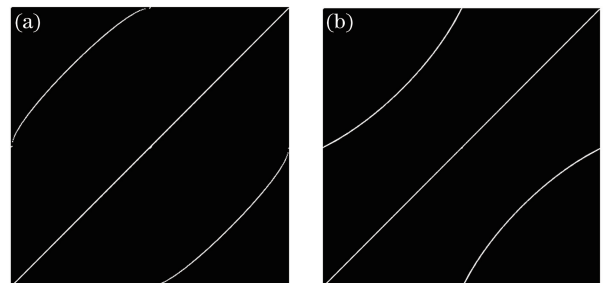


图 3 标准测试图形球面化畸变像。(a) 50% 正球面化桶形畸变像; (b) 50% 负球面化枕形畸变像

Fig. 3 Images of standard test pattern spherical distortion. (a) Image of 50% positive spherical barrel distortion; (b) image of 50% negative spherical barrel distortion

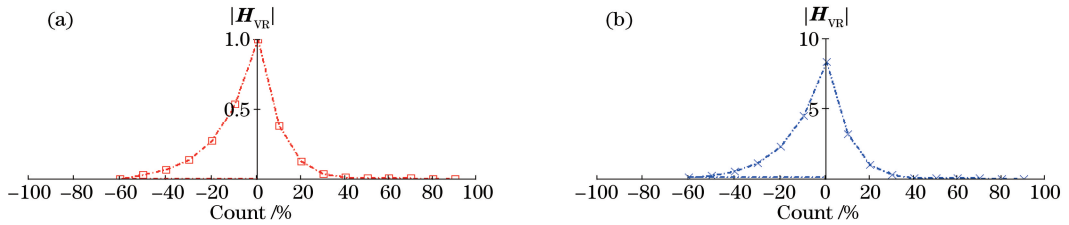


图4 $|H_{VR}|$ 与系统像球面化数量的关系。(a) CCD光学系统无像差, $I_R = I$; (b) CCD光学系统产生20%球面化桶形畸变

Fig. 4 Relationship between $|H_{VR}|$ and quality of spherical disorder.

(a) CCD optical system without aberration, $I_R = I$; (b) CCD optical system with 20% spherical barrel distortion

由(9)式和图4可知,当头戴显示器标准图形的像无畸变时,有 $|H_{VR}|_{\max} = |I_R^{-1}|$,其值为图4曲线的最大值 $|H_{VR}|_{\max}$ 。由于曲线形状不受CCD光学系统畸变的影响,因此只要 $|H_{VR}|_{\max}$ 确定了,就可以通过曲线上 $|H_{VR}| = 1$ 的点得到CCD光学系统引起的像的畸变量(球面化数量) C_{CA} ;通过(9)式计算得到的 $|H_{VR}|$ 和图4曲线可以得到系统像的畸变量 C_{CAVR} ,进而可计算得头戴显示器光学系统的畸变量为

$$C_{VR} = C_{CAVR} - C_{CA} \quad (11)$$

4 头戴显示器畸变实验测量

实验中使用140万像素分辨率的CCD相机,广角镜头最大视场角为 75° ,参考显示器为32 inch (81.28 cm)计算机显示屏。为保证头显图像位于250 mm明视距离处,实验测量前先用CCD相机对250 mm处显示屏上显示固定尺寸的调焦方形图形进行照相,得到一个尺寸参考图像,然后将调焦方形图形缩小 Γ 倍(Γ 为头戴显示器目镜的标称放大倍

数)显示在微显示屏上,再用CCD相机照相,调节头戴显示器目镜的位置,使CCD相机照相得到的图像尺寸和尺寸参考图像的尺寸相同,根据公式 $\Gamma \approx 250/f_0$ (f_0 为目镜焦距)可知,头显图像位于250 mm明视距离处。按照图1所示的检测原理图设计光路,先移走头戴显示器,采用MATLAB软件编辑产生图5(a)所示的标准测试图形,并显示在参考显示器上,其傅里叶变换矩阵 I 的二维分布图形如图5(d)所示;用CCD相机照相得到参考显示器的标准图形的像如图5(b)所示,其傅里叶变换矩阵 I_R 的二维分布图形如图5(e)所示;然后将头戴显示器移回光路,头戴显示器显示图5(a)所示的标准测试图形,同样用CCD相机照相得到头戴显示器标准图形的像如图5(c)所示,其傅里叶变换矩阵 I_M 的二维分布图形如图5(f)所示。从图5中可以看到像的畸变对其傅里叶变换矩阵的影响:像的畸变越大,其傅里叶变换矩阵分散在对角线以外的元素就越多。

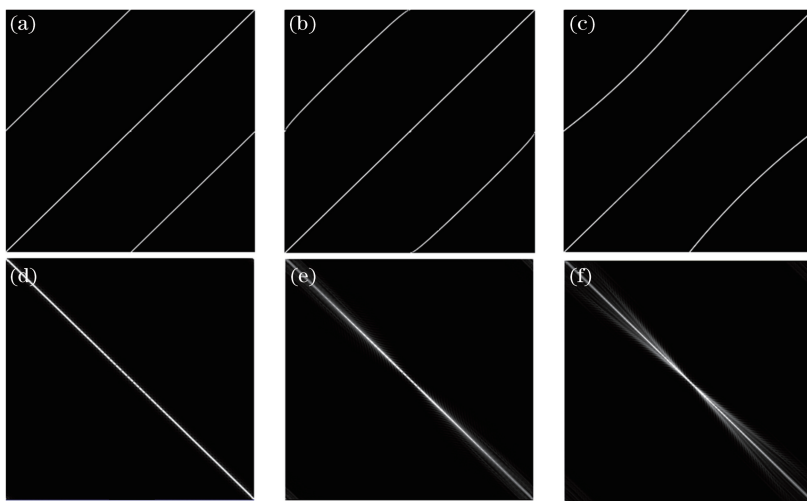


图5 标准测试图样及其傅里叶变换矩阵的二维分布图。(a)标准测试图形;(b)参考显示器标准图形的图像;

(c)头戴显示器标准图形的像;(d)标准图形的傅里叶变换;(e)参考显示器像的傅里叶变换;(f)头戴显示器像的傅里叶变换

Fig. 5 2D standard test pattern and its Fourier transform. (a) Standard test pattern; (b) image of referenced display pattern;

(c) image of standard test pattern of head-mounted display; (d) Fourier transform of standard test pattern;

(e) Fourier transform of referenced display pattern; (f) Fourier transform of standard test pattern of head-mounted display

由图 5 的实验数据可以计算得到： $|\mathbf{H}_{VR}|_{\max} = |\mathbf{I}_R^{-1}| = 4.77$ ， $|\mathbf{H}_{VR}| = |\mathbf{I}_M \cdot \mathbf{I}_R^{-1}| = 1.176$ ；根据图 5(b)可知 CCD 相机产生正球面化桶形畸变；由图 6 得 $C_{CA} = 16\%$ ；同理，根据图 5(c)知头戴显示器光学系统和 CCD 相机光学系统共同产生的畸变为负球面化枕形畸变；由图 6 得 $C_{CAVR} = -22\%$ 。因此，头戴显示器图像畸变量为 $C_{VR} = C_{CAVR} - C_{CA} = -38\%$ 。

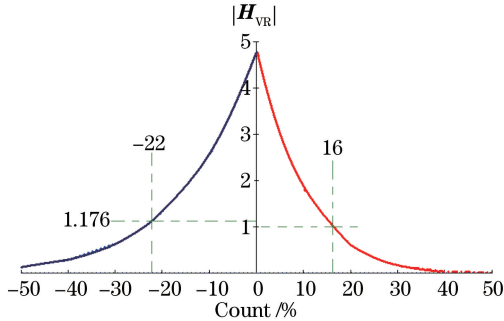


图 6 实验光学系统的 $|\mathbf{H}_{VR}|$ 曲线

Fig. 6 $|\mathbf{H}_{VR}|$ curve of experimental optical system

作为对比,同时进行了方格成像实验。头戴显示器显示的原始方格如图 7(a)所示,经过 CCD 相机照相后的照片如图 7(b)所示,其中 H 为横条纹的中心像高, \bar{H} 为横条纹的边沿像高。方格畸变的

表 1 头戴显示器畸变测量结果

Table 1 Tested results of distortion of head-mounted display

Measure index	Panel inch	Field of view	$C_{VR} / \%$	$D / \%$	C_{VR} / D
Sample 1	0.66"	120°	-22	2.8	-7.8
Sample 2	4.3"	55°	-38	4.7	-8.1
Sample 3	5.0"	65°	-49	6.1	-8.0
Sample 4	5.1"	63°	-50	5.9	-8.5
Sample 5	5.5"	67°	-65	7.9	-8.2

由表 1 的测量结果可以看出,头戴显示器的球面化图像畸变量 C_{VR} 与方格成像实验的畸变量 D 具有一定的线性关系,但方格成像实验包含的 CCD 相机的畸变无法扣除,而且畸变量 D 与视场(屏幕)大小有关。在进行方格畸变测试时,要对测试结果图进行图像计算,所以在采集结果图像时,要保证测试图中心红色的“十”字线在结果图像中仍然保持原来的角度不变,否则会影响畸变值的计算,这会给测试结果的采集带来一定难度。对图 2 所示标准图形的像的数据处理是对整幅图像进行傅里叶变换计算,无需局部对准,所以测量容易,得到的球面化图像畸变量 C_{VR} 更能体现头戴显示器的图像畸变程度,具有更高的参考价值。

5 结 论

针对头戴显示器的原理及特点提出了一种图像

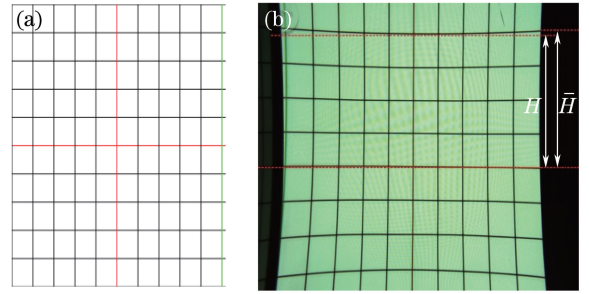


图 7 方格畸变测试。(a)原始方格图;(b)畸变的像

Fig. 7 Grid distortion test. (a) Original grid; (b) image of distortion

计算公式为

$$D = \frac{\bar{H} - H}{H} \times 100\% \quad (12)$$

针对两种产品 5 个规格的头戴式显示器进行图像畸变测试,它们分别是柔宇科技有限公司生产的 ROYOLE-X 3D 版头戴式显示器(Sample 1)和深圳市优吉品科技有限公司生产的 UGP 手机 VR 眼镜分别搭载小米 2 手机(Sample 2)、小米 4 手机(Sample 3)、三星 S5 手机(Sample 4)和华为荣耀 5X 手机(Sample 5),测试结果如表 1 所示。

畸变测量方法,采用单位矩阵的傅里叶变换图像作为标准测试图形。理论分析表明,头戴显示器光学传递函数矩阵的行列式 $|\mathbf{H}_{VR}|$ 随像的球面化发生变化,曲线形状不受 CCD 相机图像畸变的影响,并且 CCD 相机图像畸变量可由 $|\mathbf{H}_{VR}| = 1$ 对应曲线上的点得到。曲线最大值 $|\mathbf{H}_{VR}|_{\max} = |\mathbf{I}_R^{-1}|$,其值为参考显示器上的标准测试图形在 CCD 上的像的傅里叶变换矩阵 \mathbf{I}_R 的逆矩阵行列式,曲线的左半部代表负球面化枕形畸变,右半部代表正球面化桶形畸变。实验分别对 5 种头戴显示器的图像球面化畸变进行测量,并与方格图像畸变进行对比。结果表明,头戴显示器的球面化图像畸变量 C_{VR} 与方格成像实验的畸变量 D 具有一定的线性关系,得到的球面化图像畸变量 C_{VR} 更能体现头戴显示器图像的畸变程度,具有更高的参考价值。图像畸变测量方法可以将主观感受进行客观评价,可对头戴显示器的结构优化

设计提供有效指导;同时,该测试方法简单易行,可推广到其他光学成像系统中。

参 考 文 献

- [1] Sun T C, Gu H R. Study on three-dimensional display technology based on multi-layer semitransparent thin film [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(3): 0312001.
孙天成, 顾华荣. 基于多层半透明薄膜的三维显示技术研究[J]. *光学学报*, 2018, 38(3): 0312001.
- [2] Lu Y J. Application of virtual reality to digital library [D]. Wuhan: Wuhan University, 2013.
陆颖隽. 虚拟现实技术在数字图书馆的应用研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2013.
- [3] Zhang X B, An X W, Liu L, *et al.* Development and application of helmet-mounted displays[J]. *Journal of Electron Devices*, 2000, 23(1): 51-59.
张晓兵, 安新伟, 刘璐, 等. 头盔显示器的发展与应用[J]. *电子器件*, 2000, 23(1): 51-59.
- [4] Xia J Y. The EAST visualization system based on WebGL [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2017.
夏金瑶. 基于 WebGL 的 EAST 可视化系统[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2017.
- [5] Hu J J, Li S M, Chang Y L, *et al.* Measurement of comfortable contrast range of stereo image based on salient region[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(2): 0215001.
胡佳洁, 李素梅, 常永莉, 等. 基于显著区域的立体图像舒适对比度范围的测量[J]. *光学学报*, 2018, 38(2): 0215001.
- [6] International committee for display metrology (ICDM) information display measurement standard. IDMS version 1. 03 [S]. San Jose: International Committee for Display Metrology, 2012.
- [7] ISO Copyright Office. ISO 9241-305 Ergonomics of human-system interaction. Part 305: optical laboratory test methods for electronic visual displays [S]. Switzerland: [s.n.], 2008.
- [8] IISO Copyright Office. ISO 9241-303 Ergonomics of human-system interaction. Part 303: Requirements for electronic visual displays Annex E; virtual display-performance objectives[S]. Switzerland: [s.n.], 2008.
- [9] Järvenpää T, Salmimaa M. Optical measurements of different near-eye display types[J]. *Sid Symposium Digest of Technical Papers*, 2016, 47(1): 1056-1059.
- [10] Chen W, Xiao X, Li Z Z, *et al.* An image quality evaluation method of near-eye displays [J]. *Sid Symposium Digest of Technical Papers*, 2016, 47(1): 1060-1063.
- [11] Shen L L, Zhang J, Fan K F, *et al.* Research on quality analysis and measurement of stereoscopic display[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 42(2): 219-223.
沈丽丽, 张晶, 范科峰, 等. 立体显示器质量测试与性能分析研究[J]. *光子学报*, 2013, 42(2): 219-223.
- [12] Wang C, Jin J, Shen L L. Measurement and research of optical characteristics of auto-stereoscopic display [J]. *Laser Technology*, 2016, 40(3): 367-371.
王丛, 金杰, 沈丽丽. 自由立体显示器的光学性能测量与研究[J]. *激光技术*, 2016, 40(3): 367-371.
- [13] Zhu Y. Star test for optical system [J]. *Infrared*, 2004(9): 31-37.
朱瑶. 光学系统的星点检验方法[J]. *红外*, 2004(9): 31-37.
- [14] Dang L P, Dai B M, Tang S G. Research on the auto-detecting resolution of optical system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 1995, 24(3): 278-281.
党丽苹, 戴炳明, 唐树刚. 光学系统分辨率自动检测的研究[J]. *光子学报*, 1995, 24(3): 278-281.
- [15] Zhang Y. Studies on digital knife-edge testing technology[D]. Chengdu: Sichuan University, 2004.
张艳. 数字刀口检测技术的研究[D]. 成都: 四川大学, 2004.
- [16] Li H Z, Wang Z C, Wang F G, *et al.* Method of wavefront error test in the outfield for large aperture telescope[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, 41(1): 39-42.
李宏壮, 王志臣, 王富国, 等. 大口径望远镜波像差的外场检验方法[J]. *光子学报*, 2012, 41(1): 39-42.
- [17] Zeng M Z, Li H F. Real-time MTF measurement system for projection lens [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008, 35(2): 134-139.
曾明智, 李海峰. 投影机镜头的 MTF 实时检测系统[J]. *光电工程*, 2008, 35(2): 134-139.
- [18] Liu L X, Hu C H, He C, *et al.* An improved non-metric distortion calibration method based on straight line characteristics[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(9): 0915001.
刘炼雄, 胡昌华, 何川, 等. 一种改进的基于直线特征的非量测畸变校正方法[J]. *光学学报*, 2017, 37(9): 0915001.