

面向头戴式三维显示的图像质量测评方法和系统

王雪琦 何泽浩 朱巧芬 曹良才

Image quality evaluation method and system for head-mounted three-dimensional display

WANG Xueqi, HE Zehao, ZHU Qiaofen, CAO Liangcai

引用本文:

王雪琦, 何泽浩, 朱巧芬, 等. 面向头戴式三维显示的图像质量测评方法和系统[J]. 应用光学, 2024, 45(3): 598–607. DOI: 10.5768/JAO202445.0301002

WANG Xueqi, HE Zehao, ZHU Qiaofen, et al. Image quality evaluation method and system for head-mounted three-dimensional display[J]. Journal of Applied Optics, 2024, 45(3): 598–607. DOI: 10.5768/JAO202445.0301002

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0301002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

远距离成像汽车平视显示光路结构设计

Optical structure design of automotive head-up display with long-distance imaging

应用光学. 2019, 40(5): 894–900 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0505006>

超表面图像显示技术研究

Study on metasurfaces image display technology

应用光学. 2019, 40(6): 1045–1049 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0602001>

多路角度复用体全息三维显示技术

Volume holographic display technology based on angular multiplexing

应用光学. 2017, 38(2): 215–220 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0202002>

头盔显示器视差自动测量中眼位点的自动对准

Alignment automation of observation point in automatic measurement on parallax of helmet mounted display

应用光学. 2019, 40(1): 39–44 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0101007>

一种单色全息平板波导显示系统的研究

Study on monochromatic holographic planar waveguide display system

应用光学. 2019, 40(2): 241–245 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0201010>

基于针孔成像面参数提取的单板机镜头显微成像质量评价方法

Method of microscopic imaging quality evaluation for board lens based on image parameter extraction of pinhole imaging

应用光学. 2021, 42(5): 839–847 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0502003>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2024) 03-0598-10

面向头戴式三维显示的图像质量测评方法和系统

王雪琦¹, 何泽浩², 朱巧芬¹, 曹良才²

(1. 河北工程大学 数理科学与工程学院, 河北 邯郸 056038; 2. 清华大学 精密仪器系, 北京 100084)

摘要: 头戴式三维显示设备是虚拟现实、增强现实和元宇宙等领域人机交互界面的常用呈现载体, 当前, 面向头戴式三维显示图像质量测评的方法和系统依然较为缺乏。提出了基于人眼视觉特性的三维显示质量评价理论, 设计了基于人眼视觉特性的三维显示质量测评方法和系统, 实现了对头戴式三维显示深度表达能力、畸变、极限可分辨能力和视场角等参量的定量化测评。利用双目视觉原理测试深度表达能力, 利用像点弯曲程度和多项式变换关系表示畸变程度, 利用条纹MTF值和曲线谷峰比评价极限可分辨能力, 利用小孔成像原理拟合视场角。针对两款待测试头戴式显示设备, 测得的深度相对误差小于3.5%, 畸变程度小于3%, 视场角分别为 $77^{\circ}1'44''$ 和 $86^{\circ}56'26''$ 。测评结果与人眼主观感受具有高度的一致性, 相关方法和系统具有较高的工程适用性, 有望在头戴式三维显示质量测评与设计改进方面发挥重要的作用。

关键词: 三维显示; 头戴式显示; 显示质量; 图像质量测评

中图分类号: TN206; O432

文献标志码: A

DOI: [10.5768/JAO202445.0301002](https://doi.org/10.5768/JAO202445.0301002)

Image quality evaluation method and system for head-mounted three-dimensional display

WANG Xueqi¹, HE Zehao², ZHU Qiaofen¹, CAO Liangcai²

(1. School of Mathematics and Physics Science and Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China; 2. Department of Precision Instrument, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Head-mounted three-dimensional (3D) display device is a common presentation carrier of human-computer interaction interfaces in the fields of virtual reality, augmented reality and metaverse. Currently, the image quality evaluation methods and systems for head-mounted 3D display are insufficient. A 3D image quality evaluation theory based on the human visual system was proposed, and a 3D image quality evaluation method and the corresponding system were designed. Some parameters including depth reconstruction, distortion, ultimate resolution, and field angle were quantitatively evaluated. The depth reconstruction was tested based on binocular vision principle, the distortion was expressed by curvatures and polynomial transformations of specific points, the ultimate resolution was evaluated by MTF and valley-to-peak ratio of patterns, and the field angle was measured based on pinhole imaging method. In the test of two head-mounted display devices, the relative error of depth reconstruction is smaller than 3.5%, the distortion is smaller than 3%, and the field angle are $77^{\circ}1'44''$ and $86^{\circ}56'26''$, respectively. The evaluation results are highly consistent with the subjective perception of the human eyes. The proposed method and system have high engineering applicability, which are expected to play an important role in the quality assessment and design improvement of the head-mounted 3D display.

收稿日期: 2023-07-18; 修回日期: 2023-09-01

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2021YFB2802300)

作者简介: 王雪琦 (1998—), 女, 硕士研究生, 主要从事三维显示评测研究。E-mail: wangxueqi202107@163.com

通信作者: 曹良才 (1977—), 男, 博士, 教授, 主要从事全息成像和全息显示研究。E-mail: clc@mail.tsinghua.edu.cn

Key words: three-dimensional display; head-mounted display; image quality of display; image quality evaluation

引言

相比二维显示技术,三维显示技术真实性更高、沉浸感更强,可作为虚拟现实、增强现实和元宇宙领域的支撑技术^[1]。配合相应的交互技术^[2-3],三维显示构建的交互界面能够将用户带入一个与现实世界平行的虚拟世界^[4-6],为其提供身临其境的体验感^[7],被认为将在视频游戏、远程医疗和社会教育等领域发挥重要的作用^[8-9]。

目前主流的三维显示技术方案包括双目视觉显示^[10-13]、体显示^[14-15]、光场显示^[16-19]和全息显示^[20-25]等。其中,基于双目视觉技术的显示设备需要将不同视角的两幅图像分别投射至用户的左右眼,进而通过大脑的融合机制获取三维深度感知。凭借原理简单、技术成熟和产业完善等优势,双目视觉显示已经成为当前最为主流的三维显示方案,其中又以头戴式显示(head-mounted display, HMD)形态更为常见。

测评 HMD 设备的三维显示质量,既可以获知当前产品的设计水平,也可以为未来产品的设计提供指导。因此,国内外研究者均在该领域展开了探索。齐敏等人针对不同的应用场景,以主观测评的方式对 HMD 设备的操作性、舒适性和功能性等指标进行了综合评估,分析了各项指标对使用体验的影响权重,但上述测评结果易受测评人员主观感受的影响^[26]。王健等人设计了视场角为 50°的 HMD 光学测试系统,对 HMD 设备的目视系统做出了整体评价,但评价结果针对的是 HMD 设备中的目镜性能,而不是 HMD 设备的整体使用性能^[27]。此外,王孝艳等人提出了基于光学传递函数的 HMD 畸变检测方法^[28],能简单高效地检测畸变;于阳等人通过拟合理想像点和实际像点的位置关系,实现了畸变的表述^[29];田方旭等人通过确定亮度阈值的方式确定了 AR 的视场角^[30]。然而,上述各类评测方法可测评的参数种类较为受限,且部分测评结果只能以定性的方式给出。针对上述问题,本文提出了一种面向头戴式三维显示的图像质量测评方法和系统,能够对 HMD 设备的深度表达能力进行定量化测评,同时也能实现对畸变、极限可分辨能力、图像质量和视场角等参数的量化测评,且测评结果与人眼主观感受有着较高的一致性,具有较高的工程适用性。

1 测评原理

1.1 深度表达能力

双目视觉是人眼感知深度信息的关键因素,双眼捕获略有差别的两幅视差图像后,可通过大脑的融合机制获取三维深度感知。基于双目视觉原理设计的 HMD 设备能否提供深度感知,以及提供的相对深度关系是否准确,在本文中使用深度表达能力进行描述。本文使用 2 个相机模拟深度信息的重建过程。深度重建过程中,采用张正友标定法对相机进行畸变矫正^[31],进而利用小孔成像和双目投影原理进行深度计算,其原理如图 1(a)所示。

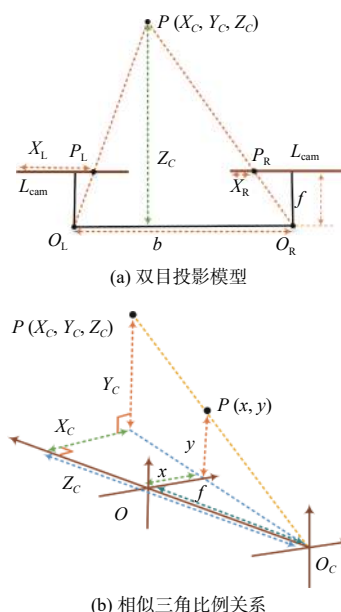


图 1 深度重建原理

Fig. 1 Schematic diagram of depth reconstruction

为了简化计算,将成像平面旋转至与镜头对称位置,对应的重建像旋转 180°成为正立实像。图 1(a)中左右相机光轴平行放置,两相机的焦距均为 f ,二者间的距离为 b ,空间中任意一点 $P(X_C, Y_C, Z_C)$ 在左右 2 个相机上的像点分别为 P_L 和 P_R ,两点与左、右相机左侧边界的物理距离分别为 X_L 和 X_R ,左、右相机的光心分别为 O_L 和 O_R 。由三角相似原理可计算得出:

$$\frac{b - [(X_L - \frac{L_{cam}}{2}) + (\frac{L_{cam}}{2} - X_R)]}{Z_C - f} = \frac{b}{Z_C} \quad (1)$$

式中: L_{cam} 是相机传感器的物理尺寸。由式(1)可将点 $P(X_C, Y_C, Z_C)$ 到相机主透镜平面的距离 Z_C 改

写为如下形式:

$$Z_C = \frac{bf}{X_L - X_R} \quad (2)$$

设单位像素在水平方向上的物理尺寸为 d_x , 垂直方向为 d_y , 点 $P(X_C, Y_C, Z_C)$ 在左、右相机成像平面水平方向上的坐标分别为 u_L 和 u_R , 则式(2)可改写为

$$Z_C = \frac{bf}{(u_L - u_R)d_x} = \frac{bf_x}{d} \quad (3)$$

$$d = u_L - u_R, \quad f_x = f/d_x, \quad f_y = f/d_y \quad (4)$$

式中: f_x, f_y 是相机的内部水平和垂直参数, 可以通过标定获取, 其标定过程如图1(b)所示。设相机坐标系为 xOy , 世界坐标系为 $X_C O_C Y_C$ 。若 O_C 为双目相机中一个相机的光心, 根据三角相似原理可得:

$$\begin{cases} \frac{X_C}{Z_C} = \frac{x}{f} = \frac{(u - u_0)d_x}{f} = \frac{u - u_0}{f_x} \\ \frac{Y_C}{Z_C} = \frac{y}{f} = \frac{(v - v_0)d_y}{f} = \frac{v - v_0}{f_y} \end{cases} \quad (5)$$

式中: u 和 v 分别表示点 $P(X_C, Y_C, Z_C)$ 在相机成像平面水平和垂直方向上的坐标值; (u_0, v_0) 表示相机主点坐标。点 $P(X_C, Y_C, Z_C)$ 的坐标可表示为

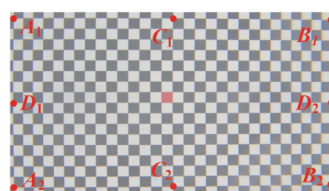
$$\begin{cases} X_C = \frac{b(u - u_0)}{d} \\ Y_C = \frac{b(v - v_0)}{d} \\ Z_C = \frac{bf_x}{d} \end{cases} \quad (6)$$

1.2 畸变

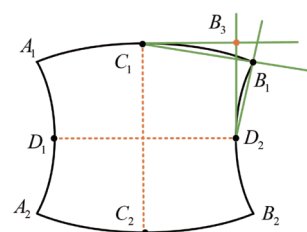
理想光学系统中, 像平面上任意一点的放大率不变, 这一规律被称为理想的物像关系。在实际情况中, 理想的物像关系只存在于光轴附近的局部区域。距离光轴越远, 物像的比例关系越容易受到破坏, 这种偏离理想物像关系的现象被称为畸变, 它是影响显示质量的重要因素^[32]。通常, 镜头焦距越小, 呈现的视野范围越大。为了提供更大视野, HMD 设备往往使用短焦镜头, 其傍轴条件相较于普通镜头更为严格, 因此也更易产生畸变。以往的研究往往基于 TV 法描述畸变, 但是该方法难以描述梯形畸变。为了避免这一问题, 本文中的畸变通过选定区域 4 个边界角点相对于四周的弯曲程度进行描述。图2(a)为一张带有畸变的图片, 其中红色角点位置为选定区域的边界点。假设该区域的局部放大图像如图2(b)所示, 则畸变的程度可以描述为

$$\begin{aligned} D_l &= \frac{\angle B_3 C_1 B_1}{(\pi/2)} \times 100\% \\ D_v &= \frac{\angle B_1 D_2 B_3}{(\pi/2)} \times 100\% \end{aligned} \quad (7)$$

式中: D_l 和 D_v 分别表示水平和垂直方向的畸变, 取值为正时该部位产生枕形畸变, 取值为负时该部位产生桶形畸变。



(a) 畸变测试图片



(b) 基于边界角点的畸变描述

图2 畸变的理想量化描述

Fig. 2 Ideal quantitative evaluation of distortions

图2(b)中, B_3 是像点的位置; B_1 是实际像点位置; B_1 点相对于 C_1 点在水平方向上有向内收缩的趋势, 该部位发生了桶形畸变, 畸变值 D_l 为负; B_1 点相对于 D_2 点有向外扩散的趋势, 该部位发生了枕形畸变, 畸变值 D_v 为正。此外, 考虑到理想像点位置和实际畸变像点位置的联系, 可以由多项式进行描述, 多项式的系数即可作为评价畸变程度的标准。本文在极坐标系中建立拟合多项式^[29]:

$$\rho' = a_0 + a_1\rho^1 + a_2\rho^2 + a_3\rho^3 + a_4\rho^4 + a_5\rho^5 \quad (8)$$

$$\theta' = b_0 + b_1\theta^1 + b_2\theta^2 + b_3\theta^3 + b_4\theta^4 + b_5\theta^5 \quad (9)$$

式中: (ρ, θ) 表示理想像点的极坐标值; (ρ', θ') 表示实际像点的极坐标值; $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5$ 表示半径畸变系数; $b_0, b_1, b_2, b_3, b_4, b_5$ 表示极角畸变系数。

1.3 其他可测评参数

本文提出的方法和系统还可测评 HMD 设备的极限可分辨能力、图像质量和视场角等参数。其中, 极限可分辨能力采用不同宽度的黑白条纹作为测试标靶。测试过程中, 采用调制传递函数(modulation transfer function, MTF)作为衡量标准, 即:

$$\text{MTF} = \frac{\max(I) - \min(I)}{\max(I) + \min(I)} \times 100\% \quad (10)$$

式中: $\max(I)$ 表示显示画面强度的最大值; $\min(I)$ 表示显示画面强度的最小值。实际显示时, 考虑到不同区域强度的不均匀性和可能存在的显示噪声, 单一的 MTF 值不能作为判断条纹可分辨的唯一条件。为此, 本文额外引入了条纹谷峰比作为判断依据。基于条纹谷峰比的极限分辨能力判定步骤如下: 首先, 求条纹方向上(行或列)像素灰度值的平均值; 第二, 基于获取的像素平均值, 将二维灰度图像压缩为离散的一维数列; 第三, 采用三次样条法, 将一维数列拟合为连续的曲线; 最后, 根据瑞利判据, 若条纹谷峰比小于 0.8, 则认为条纹可分辨。考虑到 HMD 设备不同区域的极限分辨能力可能存在较大差异, 因此本文选取了 9 个不同的区域进行极限分辨能力测评。

HMD 设备的图像质量通过相关系数 (correlation coefficient, CC) 和峰值信噪比 (peak signal to noise ratio, PSNR) 共同描述。图像质量测评过程中, 首先基于图形生成软件获取 3D 模型的双目视图并通过 HMD 设备进行显示, 然后通过双目相机分别拍摄 HMD 设备显示的左、右视图画面。图像质量可描述为

$$V_{CC} = \frac{\sum_m \sum_n (C_{mn} - \mu_c)(O_{mn} - \mu_o)}{\sqrt{\sum_m \sum_n (C_{mn} - \mu_c)^2} \sqrt{\sum_m \sum_n (O_{mn} - \mu_o)^2}} \quad (11)$$

$$V_{PSNR} = 10 \log_{10}(G_{\max}^2 / V_{MSE}) = 10 \log_{10} \left[G_{\max}^2 / \left(\frac{1}{mn} \sum_m \sum_n (C_{mn} - O_{mn})^2 \right) \right] \quad (12)$$

式中: C_{mn} 、 O_{mn} 分别为拍摄到的图像和原始图像在 (m, n) 像素点处的取值; $G_{\max}$ 表示像素的最大值; μ_c 、 μ_o 分别为两幅图像的像素平均值。

为了测试 HMD 设备的动态显示特性, 系统中加入了响应时间分析仪。考虑到两款 HMD 产品最高频率均为 90 Hz, 测试视频设置为 90 Hz 的黑白交替画面。此外, HMD 设备的视场角利用小孔成像原理进行测评, 其原理如图 3 所示。使用相机采集 HMD 设备的最大画面。当相机成像面内的图像相对于镜头中心的夹角和显示画面相对于镜头中心的夹角一致时, 该夹角被认为是 HMD 设备的视场角, 即:

$$\theta = \arctan \tan \theta' = \arctan \left(\frac{n_p \times d_m}{f} \right) = \arctan \left(\frac{n_p}{f_d} \right) \quad (13)$$

式中: d_m 为单位像素在相机成像平面的物理尺寸, 在水平和竖直方向上分别表示为 d_x 和 d_y ; f_d 在水平和竖直方向上分别表示为 f_x 或 f_y ; n_p 为拍摄图像在相机成像面内占据的像素数量。上述 2 个参数的乘积 h' 为成像面内的像高, 它们间的关系可以由式(14)表示:

$$h' = n_p \cdot d \quad (14)$$

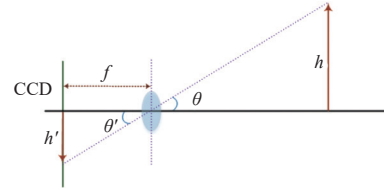


图3 HMD设备视场角测试原理

Fig. 3 Measurement principle of field angles for HMD device

2 测评装置

本文构建了如图4所示的实验系统, 用以完成 HMD 设备参数的测量。该系统由三菱机械臂、控制系统、转接件、位移平台和测试相机等部件组成。其中, 三菱机械臂拥有 6 个可以自由活动的旋转轴, 可实现测试距离和平面位置的改变; 控制系统操控三菱机械臂的运动轨迹, 可实现测试距离和平面位置的粗调; 转接件用于测试相机的固定; 位移平台需要手动调节, 可实现六自由度的精细运动, 既用于待测设备的固定, 也用于测试距离和平面位置的微调; 测试相机可采集待测试设备左、右视点处的显示图像, 其型号为索尼 $\alpha 7c$, 安装有焦距为 28 mm~60 mm 的标准变焦镜头。基于采集到的显示图像进行计算, 可获得深度表达能力、畸变、极限可分辨能力、图像质量和视场角等参数的具体值。

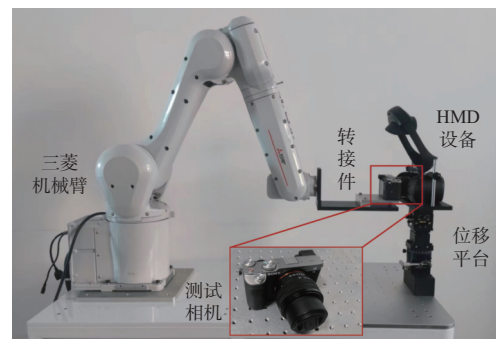


图4 HMD设备参数测量系统

Fig. 4 Measurement system for HMD device parameters

3 测评结果

3.1 深度表达能力

使用 3ds Max 软件构建双目相机以生成待测的左、右视图,如图 5(a)所示。模拟过程中,目标测试图像为倾斜的黑白棋盘格。考虑到待测 HMD 设备左、右出瞳的间距,双目相机的间距设置为 65 mm,双目相机的焦距设置为 35 mm。将上述左、右视图上传至图 4 所示的待测 HMD 设备上,使用测试相机采集左、右视图的显示结果,随后重建三维点云,基于点云的三维坐标评价头戴式显示器的深度表达能力。

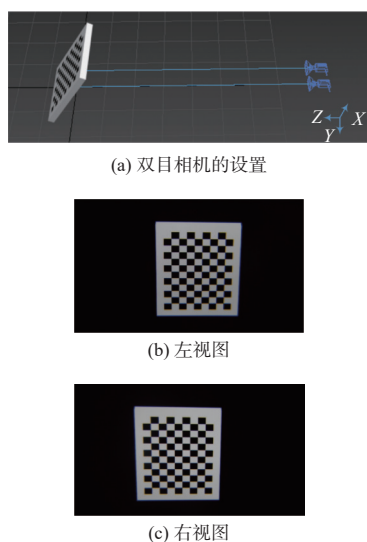


图 5 基于 3ds Max 的双目图像构建

Fig. 5 Binocular images obtained by 3ds Max

当棋盘格与竖直方向的夹角为 30° 时,测试相机采集到的左、右视图分别如图 5(b)和图 5(c)所示。基于采集到的左、右视图,利用 1.1 节所述方法,可以计算获取显示三维棋盘格的点云信息。由于本文测试的三维图像为倾斜的平面,理想情况下,重建点云竖直方向的 Y 轴坐标值与深度方向的 Z 轴坐标值为一次函数关系。本文在棋盘格点云中选取 20 组特征点,使用最小二乘法拟合特征点 Z 轴和 Y 轴坐标值,验证是否满足相应的一次函数关系,即验证 HMD 设备是否能够正确地表达深度信息。

实际拍摄中,相机拍摄到的图像与原始图像的尺寸存在差异。具体来说,即式 (4) 中 d 、 $(u-u_0)$ 和 $(v-v_0)$ 等 3 个参数放大了特定的倍数。这一问题导致重建点中 Z 轴坐标值缩小,但 X 轴和 Y 轴的坐标值不变,进而造成了深度测评中出现测评误

差。为了解决这一问题,本文根据图像放大倍数对合成点云的深度值进行修正。修正后,当棋盘格与竖直方向的夹角分别为 30° 和 45° 时,拟合得到的一次函数斜率分别为 0.575 8 和 0.965 5,此时理想的一次函数斜率分别应为 0.577 4 和 1,拟合斜率和理想斜率间的相对误差分别为 0.28% 和 3.5%,如图 6 所示。本文在测评过程中发现,对于显示距离在 $[0, 2\text{ m}]$ 范围的目标测试物体, HMD 设备均能提供深度感知,且相对深度准确性较高。因此,可以认为待测 HMD 设备的深度表达能力较为优秀。

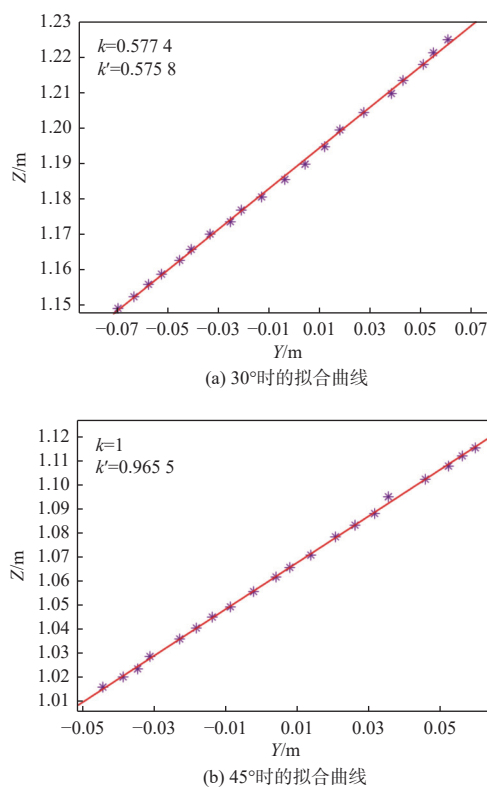


图 6 深度表达能力测试

Fig. 6 Test of depth reconstruction

3.2 畸变

以图 2(a)所示的图像作为测试标靶,以投影中心作为原点,以投影中心处 4 个黑白方格长度的平均值作为方格长度标准值,基于式 (7) 和式 (8) 对显示画面的畸变进行测评。表 1 为基于式 (7) 得到的计算结果,其中 D_{lhl} 、 D_{lhv} 、 D_{lll} 、 D_{llv} 、 D_{rhl} 、 D_{rhv} 、 D_{ril} 和 D_{riv} 分别表示左上角水平方向、左上角竖直方向、左下角水平方向、左下角竖直方向、右上角水平方向、右上角竖直方向、右下角水平方向和右下角竖直方向上的畸变;表 2 和表 3 为基于式 (8)

和式 (9) 得到的计算结果。表 1 结果表明,在任意方向上,显示画面的畸变程度均可控制在 1.5% 以内;表 2 和表 3 结果表明,拟合结果中的一次项

系数 a_1 和 b_1 均接近于 1,其余项则接近于 0。综上所述,可以认为待测 HMD 设备的畸变控制能力较为优秀。

表 1 角点位置不同方向上的畸变程度

Table 1 Distortions of selected corner points in different directions

	D_{lhl}	D_{lhv}	D_{lll}	D_{llv}	D_{rlh}	D_{rhv}	D_{rll}	D_{rlv}
左眼/%	0.036 9	-0.530 0	-0.300 0	-0.930 0	-0.640 0	0.083 4	-0.610 0	0.500 0
右眼/%	-1.116 0	-0.230 0	0.350 0	-0.410 0	0.230 0	-1.310	-0.690 0	0.730 0

表 2 角点位置上实际像点与理想像点的半径畸变系数

Table 2 Radius distortion coefficients between actual image point and ideal image point at corner position

	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
左眼	0.000 0	0.992 6	0.003 0	0.000 5	0.000 0	0.000 0
右眼	0.000 0	0.996 9	-0.001 7	-0.000 1	0.000 0	0.000 0

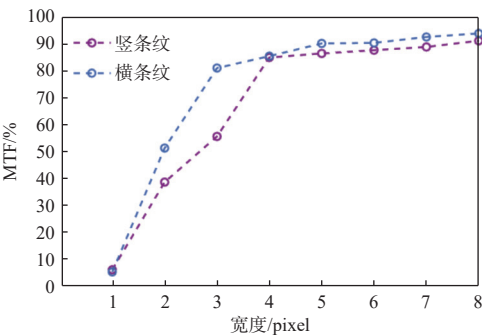
表 3 角点位置上实际像点与理想像点的极角畸变系数

Table 3 Polar angle distortion coefficients between actual image point and ideal image point at corner position

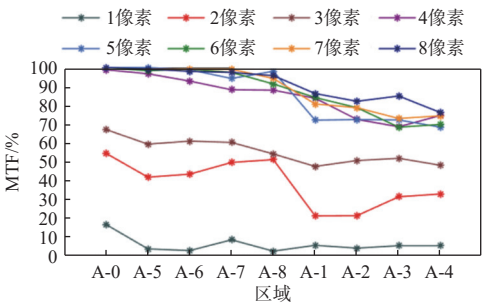
	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5
左眼	0.000 0	0.965 9	-0.007 7	0.041 4	-0.020 2	0.004 0
右眼	0.000 0	0.961 8	0.009 3	0.021 4	0.021 7	-0.011 1

3.3 其他可测评结果

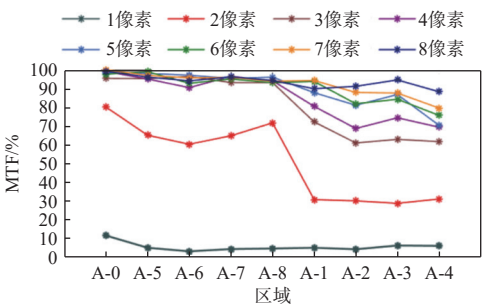
在分辨能力测试中,本文采用了黑白条纹作为测试标靶。实际测试中采用横纵两类条纹图,分别描述待测设备不同方向上的分辨能力,如图 7 所示。其中图 7(a)展示的为纵条纹图,测试条纹图像比例为 16 : 9,分辨率为 3 413×1 920 像素,图中 9 个红色边框围成的区域是实验中的取样区域,每个区域的长宽值均为捕获图像长宽值的 1/10。当黑白条纹宽度分别设置为 1 个像素~8 个像素时,测试区域横纵条纹的 MTF 均值如图 7(b)所示。从图 7(b)可以看出,MTF 均值随着条纹宽度的增加而增加,且横条纹的 MTF 值始终略大于竖条纹。测试结果表明,待测 HMD 设备的纵向分辨能力略高。



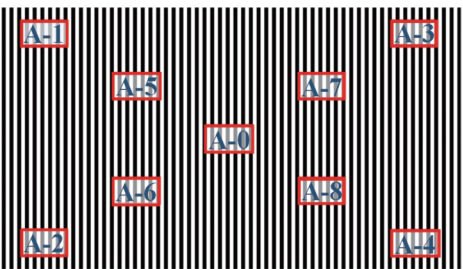
(b) 不同条纹宽度下的 MTF 平均值



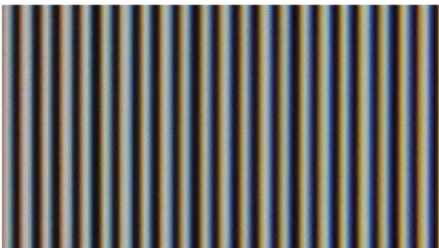
(c) 不同区域处横条纹 MTF 值



(d) 不同区域处竖条纹 MTF 值



(a) 待测竖条纹图



(e) 条纹宽度为 4 像素时,“A-0”区域处的放大图像

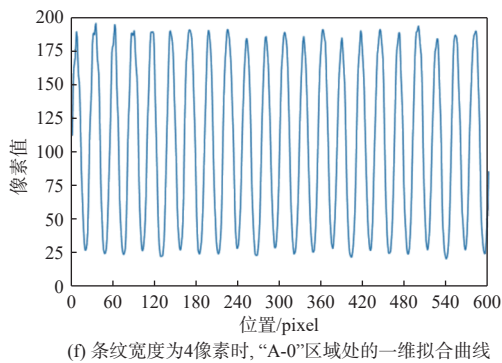


图7 极限可分辨能力测试

Fig. 7 Test of ultimate resolution

HMD 设备在显示黑白图像时容易出现彩色伪影。伪影的随机性导致 MTF 值呈现不规则性,进而影响 HMD 设备的显示质量。为此,本文测试了不同区域处横条纹和竖条纹的 MTF 值,如图 7(c) 和图 7(d) 所示。从测试结果可以看出,中央区域的极限可分辨能力大于周围区域,不同区域 MTF 值基本上随着条纹宽度的增加而增大,但不构成简单的正比关系。

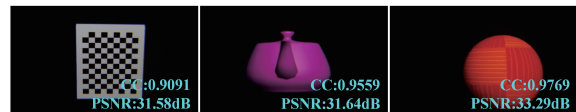
除了 MTF 值外,本文同时使用条纹谷峰比来判断条纹是否可以被分辨。当条纹宽度为 4 像素时,“A-0”区域处的放大图像如图 7(e) 所示,其对应的一维拟合曲线如图 7(f) 所示。基于瑞利判据,当条纹谷峰比不超过 0.8 时,则认为条纹可以分辨。基于拟合数据可知,对于横条纹,“A-0”区域处可分辨条纹的最小宽度为 2 像素,所有区域处均可分辨条纹的最小宽度为 3 像素;对于纵条纹,“A-0”区域处可分辨条纹的最小宽度为 2 像素,所有区域处均可分辨条纹的最小宽度为 4 像素。这一结果也说明了对于待测 HMD 设备,纵向极限可分辨能力大于横向,中央区域极限可分辨能力大于周围区域。根据人眼视觉特性,人眼的细节分辨能力从视野中央到周围区域依次递减^[33]。因此,待测 HMD 设备在日常使用中,不会使用户明显感受到中央与周围区域极限可分辨能力的不同。

图 8(a) 为 3 组待显示图像的左视图,图 8(c) 为 3 组待显示图像的右视图。使用相机拍摄待显示画面经过 HMD 显示后,相应的左视图如图 8(b) 所示,右视图如图 8(d) 所示。如 1.3 节所述,图像质量通过 CC 值和 PSNR 值共同描述。其中,CC 值越接近于 1,显示画面和原始画面的线性相关性越强。由显示结果可知,显示图像与原始图像 CC 值均在 0.8 以上,展现了待测 HMD 设备较好的图像显示质量。需要注意的是,棋盘格图像 CC 值低于

其他显示图像,主要原因在于待测 HMD 设备在显示黑白相间的画面时黑白边界处易出现彩色伪影,但在显示其他颜色画面时不易出现。同时,PSNR 值越高,显示画面和原始画面的像素值差别越小。由显示结果可知,显示图像的 PSNR 值均在 30 dB 以上,展示了待测 HMD 设备较为忠实的显示质量。



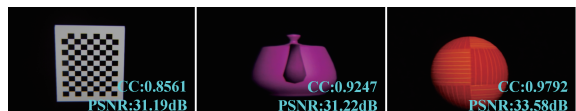
(a) 目标图像原始左视图



(b) 目标图像显示左视图



(c) 目标图像原始右视图

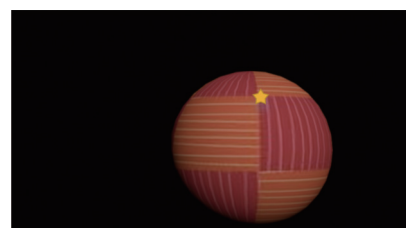


(d) 目标图像显示右视图

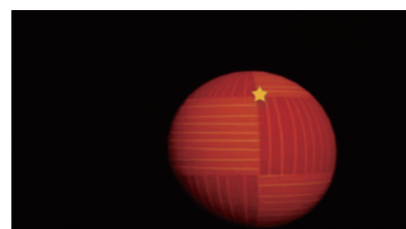
图8 图像质量测试

Fig. 8 Test of image quality

不过,从人眼的主观感受角度来看,茶壶和球的显示图像和原始图像具有较大的颜色差异。选择如图 9(a) 和图 9(b) 所示的黄色五角星标记像素,提取该像素点的 R、G 和 B 颜色分量进行分析,所得的颜色分量直方图如图 9(c) 所示。从图 9(c) 可以看出,显示结果中 R、G 和 B 颜色分量的比例关系被明显改变了。因此,待测 HMD 设备的色准需要进一步提升。



(a) 原始左视图



(b) 显示左视图

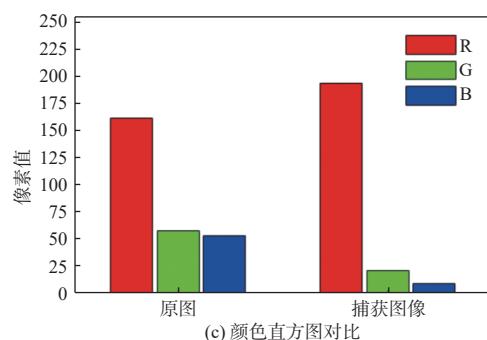


图9 色彩分析

Fig. 9 Test of color components

本文针对 HMD 的显示帧率和响应延迟等动态指标进行了测试。测试结果表明, 使用 90 Hz 的黑白交替画面作为测试对像, HMD 设备的响应延迟为 0 s, 显示帧率为 90 Hz。最后, 采用 1.3 节所述方法, 对待测 HMD 设备进行了 FOV 测试, 结果表明, 本文中待测 HMD 设备的 FOV 为 $77^{\circ}1'44''$ 。需要注意的是, 当前 HMD 设备的 FOV 测试尚没有形成统一的测评标准, 不同的测评方案可能得到不同的 FOV 值。在不同设备的对比评测中, 需要保证 FOV 在同一标准下进行测评。

此外, 本文还采用上述方法, 对另一款 HMD 设备进行了测评。评测结果表明, 第二台 HMD 设备的深度相对误差小于 2.5%, 深度表达能力优异; 畸变程度小于 3%, 多项式拟合时一次项系数接近 1, 高次项系数接近 0, 畸变程度较低; 在“A-0”、“A-5”、“A-6”、“A-7”和“A-8”区域内横纵条纹可分辨的最小宽度为 3 像素, 在其他区域内可分辨的条纹最小宽度为 4 像素, 中央区域清晰度大于周围区域; 显示画面的 CC 值大于 0.8, PSNR 值大于 30 dB, 图像显示质量良好, 且色准高于第一台 HMD 设备; 黑白画面切换延迟为 0, 但显示帧率略低于 90 Hz, 显示过程中产生了轻微掉帧; 视场角大于第一台 HMD 设备, 最高可达到 $86^{\circ}56'26''$ 。

4 结论

本文提出了一种面向 HMD 设备的 3D 显示质量评价方法, 设计了针对不同性能参数的测评方案, 搭建了 3D 显示质量测评系统, 实现了对 HMD 设备深度表达能力、畸变、极限可分辨能力、图像显示质量和视场角等参数的定量化测评。针对选定的两款 HMD 设备, 利用本文所述系统进行测评, 可知其深度相对误差分别小于 3.5% 和 2.5%, 深度表达能力优异; 畸变程度分别可控制在 1.5%

和 3% 以内, 画面畸变较小; 中心视野处可分辨条纹的最小宽度分别为 2 像素和 3 像素, 仍有继续优化空间; 显示图像 CC 值均大于 0.8, PSNR 值均大于 30 dB, 画面质量良好, 主要是色准表现仍有待提升; FOV 分别为 $77^{\circ}1'44''$ 和 $86^{\circ}56'26''$, 基本可实现沉浸式显示; 黑白画面切换延迟均为 0, 显示帧率接近 90 Hz, 动态显示性能良好。总体来看, 本文所述系统的测评结果与人眼主观感受具有高度的一致性, 评价方法和系统有望在 HMD 设备的测评与改进方面发挥重要作用。

参考文献:

- [1] 刘锴, 华鉴瑜, 陈林森, 等. 虚实融合裸眼 3D 显示现状与展望[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(20): 57-68.
LIU Kai, HUA Jianyu, CHEN Linsen, et al. Present situation and prospect of glasses-free augmented reality 3D display[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(20): 57-68.
- [2] FAN Y C, LEE C M, LEE M Y, et al. 3D display and interactive technology in metaverse[J]. ITE Transactions on Media Technology and Applications, 2022, 10(4): 179-189.
- [3] 朱富丽, 杨磊, 申玉斌, 等. 基于眼动特征的视觉交互状态分类方法研究[J]. 航天医学与医学工程, 2021, 34(6): 426-431.
ZHU Fuli, YANG Lei, SHEN Yubin, et al. Research on visual interaction states classification method based on eye movement characteristics[J]. Space Medicine & Medical Engineering, 2021, 34(6): 426-431.
- [4] MYSTAKIDIS S. Metaverse[J]. Encyclopedia, 2022, 2(1): 486-497.
- [5] ZHAO Y, JIANG J, CHEN Y, et al. Metaverse: perspectives from graphics, interactions and visualization[J]. Visual Informatics, 2022, 6(1): 56-61.
- [6] 王文喜, 周芳, 万月亮, 等. 元宇宙技术综述[J]. 工程科学学报, 2022, 44(4): 744-756.
WANG Wenxi, ZHOU Fang, WAN Yueliang, et al. A survey of metaverse technology[J]. Chinese Journal of Engineering, 2022, 44(4): 744-756.
- [7] 张汉乐, 邢妍, 胡晓帅, 等. 面向元宇宙的集成成像 3D 显示技术进展[J]. 指挥与控制学报, 2022, 8(3): 239-248.
ZHANG Hanle, XING Yan, HU Xiaoshuai, et al. Metaverse-oriented integral imaging 3D display technology[J]. Journal of Command and Control, 2022, 8(3): 239-248.

- [8] 曹良才, 何泽浩, 刘珂瑄, 等. 元宇宙中的动态全息三维显示: 发展与挑战[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(1): 267-281.
- CAO Liangcai, HE Zehao, LIU Kexuan, et al. Progress and challenges in dynamic holographic 3D display for the metaverse[J]. Infrared and Laser Engineering, 2022, 51(1): 267-281.
- [9] 何泽浩, 隋晓萌, 赵燕, 等. 基于全息光学的虚拟现实与增强现实技术进展[J]. 科技导报, 2018, 36(9): 8-17.
- HE Zehao, SUI Xiaomeng, ZHAO Yan, et al. Advances in virtual reality and augmented reality technology based on holographic optics[J]. Science & Technology Review, 2018, 36(9): 8-17.
- [10] SONG W, WANG Y, CHENG D, et al. Light field head-mounted display with correct focus cue using micro structure array[J]. Chinese Optics Letters, 2014, 12(6): 060010-1-4.
- [11] SONG W, CHENG D, DENG Z, et al. Design and assessment of a wide FOV and high-resolution optical tiled head-mounted display[J]. Applied optics, 2015, 54(28): 15-22.
- [12] ITOH Y, LANGLITZ T, SUTTON J, et al. Towards indistinguishable augmented reality: a survey on optical see-through head-mounted displays[J]. ACM Computing Surveys, 2021, 54(6): 1-36.
- [13] KI-HYUK Y, MIN-KOO K, HWASUN L, et al. Autostereoscopic 3D display system with dynamic fusion of the viewing zone under eye tracking: principles, setup, and evaluation (Invited)[J]. Applied Optics, 2018, 57(1): A101-A117.
- [14] KUMAGAI K, YAMAGUCHI I, HAYASAKI Y. Three-dimensionally structured voxels for volumetric display[J]. Optics Letters, 2018, 43(14): 3341-3344.
- [15] SONG W, ZHU Q, HUANG T, et al. Volumetric display based on multiple mini-projectors and a rotating screen[J]. Optical Engineering, 2015, 54(1): 013103.
- [16] 王琼华, 邓欢. 集成成像3D拍摄与显示方法[J]. 液晶与显示, 2014, 29(2): 153-158.
- WANG Qionghua, DENG Huan. 3D pickup and display method of integral imaging[J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2014, 29(2): 153-158.
- [17] CHEN D, SANG X, YU X, et al. Performance improvement of compressive light field display with the viewing-position-dependent weight distribution[J]. Optics Express, 2016, 24(26): 29781-29793.
- [18] HUANG H, HUA H. Systematic characterization and optimization of 3D light field displays[J]. Optics Express, 2017, 25(16): 18508-18525.
- [19] YANG L, SANG X, YU X, et al. A crosstalk-suppressed dense multi-view light-field display based on real-time light-field pickup and reconstruction[J]. Optics Express, 2018, 26(26): 34412-34427.
- [20] MOON E, KIM M, ROH J, et al. Holographic head-mounted display with RGB light emitting diode light source[J]. Optics Express, 2014, 22(6): 6526-6534.
- [21] CHEN J, CHU D. Improved layer-based method for rapid hologram generation and real-time interactive holographic display applications[J]. Optics Express, 2015, 23(14): 18143-18155.
- [22] HE Z, SUI X, CAO L. Holographic 3D display using depth maps generated by 2D-to-3D rendering approach[J]. Applied Sciences, 2021, 11(21): 9889.
- [23] BLANCHE P A. Holography and the future of 3D display[J]. Light: Advanced Manufacturing, 2021, 2(4): 446-459.
- [24] 吴圣涵, 王靖, 曹良才, 等. 多路角度复用体全息三维显示技术[J]. 应用光学, 2017, 38(2): 215-220.
- WU Shenghan, WANG Zheng, CAO Liangcai, et al. Volume holographic display technology based on angular multiplexing[J]. Journal of Applied Optics, 2017, 38(2): 215-220.
- [25] 周鹏程, 毕勇, 孙敏远, 等. 多平面全息三维显示及其噪声消除研究[J]. 应用光学, 2014, 35(6): 996-1002.
- ZHOU Pengcheng, BI Yong, SU Minyuan, et al. Multi-plane holographic display and its noise elimination[J]. Journal of Applied Optics, 2014, 35(6): 996-1002.
- [26] 齐敏, 张向东, 吕军锋, 等. 头盔显示器效能评估分析[J]. 火力与指挥控制, 2022, 47(7): 174-178.
- QI Min, ZHANG Xiangdong, LYU Junfeng, et al. Effectiveness evaluation and analysis of helmet mounted display[J]. Fire Control & Command Control, 2022, 47(7): 174-178.
- [27] 王健, 李淳, 刘英, 等. 头盔显示器光学检测系统[J]. 液晶与显示, 2022, 47(7): 174-178.
- WANG Jian, LI Chun, LIU Ying, et al. Optical evaluation system for head mounted display[J]. Chinese Journal of Liquid and Displays, 2022, 47(7): 174-178.
- [28] 王孝艳, 刘楚嘉, 漆宇, 等. 基于光学传递函数的头戴显示器图像畸变检测[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(8): 327-332.

- WANG Xiaoyan, LIU Chujia, QI Yu, et al. Image distortion detection of head mounted display based on optical transform function[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(8): 327-332.
- [29] 于阳. 头盔显示器畸变检测设备的研制[D]. 长春: 长春理工大学, 2013.
- YU Yang. Research on the distortion detection equipment of HMD[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2013.
- [30] 田方旭, 张军. 增强现实光学系统虚像视场角测量方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(20): 184-190.
- TIAN Fangxu, ZHANG Jun. Measurement method of virtual in augmented reality optical systems[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(20): 184-190.
- [31] ZHANG Z. A flexible new technique for camera calibration[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [32] 何泽浩, 曹良才. 面向沉浸式元宇宙的显示、交互和应用: 进展和展望[J]. *科技导报*, 2023, 41(5): 6-14.
- HE Zehao, CAO Liangcai. Display, interaction, and application for immersive metaverse: advances and prospects[J]. *Science & Technology Review*, 2023, 41(5): 6-14.
- [33] 唐宁. 人眼视觉效果的实时模拟与渲染[D]. 上海: 上海交通大学, 2015.
- TANG Ning. Real-time human vision simulation and rendering[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2015.