

增强现实光学系统虚像视场角测量方法

田方旭, 张军*

暨南大学理工学院广州市可见光通信重点实验室, 广东 广州 510632

摘要 由于增强现实(AR)光学系统虚像视场角(VFOV)测量中存在测量方法、虚像边缘判断标准不明确的问题,开展了针对AR光学系统VFOV测量方法的研究。设计了基于摄影系统采集图像计算VFOV的方法,采集了不同虚像视距(VID)时AR镜片样品所显示的最大虚拟图像,然后分析了6类像素亮度统计参数以不同倍率作为视场边缘像素的亮度阈值、不同VID对VFOV测量结果的影响。结果表明:6类统计参数所得VFOV测量结果存在 $11^\circ(\text{V}) \times 7^\circ(\text{H})$ 的差别;同一亮度阈值不同VID下VFOV最大波动范围为 $\pm 2.630^\circ(\text{V}) \times \pm 1.685^\circ(\text{H})$,最小波动为 $\pm 0.228^\circ(\text{V}) \times \pm 0.360^\circ(\text{H})$ 。因此判定边缘像素的亮度阈值与VFOV结果高度相关,VID对VFOV测量的影响远小于亮度阈值的影响。推荐采用像素亮度算术平均值的64%作为阈值,该方案所得的VFOV结果最稳定,相对波动仅为0.91%,所设计的测量方案为测量AR光学系统的VFOV提供了普适的测量方法和流程,具有一定指导意义。

关键词 增强现实光学系统; 虚像视场角; 虚像视距; 虚像视场边缘判定方法

中图分类号 O439

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.2011019

Measurement Method of Virtual Field of View in Augmented Reality Optical Systems

Tian Fangxu, Zhang Jun*

Guangzhou Key Laboratory of Visible Light Communication, College of Science and Engineering, Jinan University, Guangzhou 510632, Guangdong, China

Abstract The virtual field of view (VFOV) is an important design parameter of augmented reality (AR) optical systems. The measurement method and the standard used to assess virtual image edges are not clearly established. A measurement method for determining the VFOV of an AR optical system is investigated in this study. First, the method is designed to calculate the VFOV of the AR optical system based on image acquisition by the camera system, and the maximum virtual image displayed by the AR lens sample at different virtual image view distances (VIDs) is acquired. Then, the effects of different pixel luminance statistical parameters as luminance thresholds in the determination of the virtual image edge and different VIDs on the VFOV measurement results are analyzed. The results show that there is a difference of $11^\circ(\text{V}) \times 7^\circ(\text{H})$ in the VFOV measurements obtained for the six types of statistical parameters. Further, the maximum fluctuation range in VFOV for different VIDs at the same luminance threshold is found to be $\pm 2.630^\circ(\text{V}) \times \pm 1.685^\circ(\text{H})$ and the minimum is $\pm 0.228^\circ(\text{V}) \times \pm 0.360^\circ(\text{H})$. It is concluded that the luminance threshold of edge pixels is highly correlated with the VFOV results. The influence of the VID on the VFOV measurement is found to be significantly less than that of the luminance threshold. A threshold value of 64% of the arithmetic mean of the pixel luminance is used in this study as the VFOV results obtained with this value are the most stable, with a relative fluctuation of only 0.91%. The proposed measurement method and the process can be considered to be highly significant for AR optical systems.

Key words augmented reality optical system; virtual field of view; virtual image viewing distance; determination method of edge of virtual image

1 引言

增强现实(Augmented reality, AR)技术是一种将

计算机生成的内容与现实世界相融合,使用户可以同时虚拟和现实对象进行感知和交互的新兴技术。近年来得益于图像处理、物联网等技术以及微纳器件制

收稿日期: 2022-03-08; 修回日期: 2022-05-06; 录用日期: 2022-05-24

基金项目: 广东省重点领域研发项目(2020B090921002)、广东省基础与应用基础研究基金(2021A1515011933)

通信作者: *Tzhangjun_oe@jnu.edu.cn

造工艺的长足进步,AR设备逐步开始从实验室研究转化为更广泛的消费级产品,并随着元宇宙概念的兴起获得更多关注。

AR设备的虚像视场角(Virtual field of view, VFOV)是指AR器件所能显示的最大虚拟图像对观察者的张角,其表征了用户在使用AR器件时可以看到虚拟图像即具有增强现实效果的最大视野范围。对于研究人员而言,VFOV的大小是衡量AR光学系统性能优劣的必要评价指标,也是AR光学系统研发过程中重要的设计目标之一^[1-6]。由于AR光学系统所显示的图像实际为虚像,虚像无法直接测量其实际尺寸,所以VFOV的测量一般是采用将AR虚拟图像转换为实像的方式进行^[7-11]。

目前有两种虚、实像转换方法:1)利用透镜对虚像再成像以形成实像,进而可以用屏来接收,测量屏上实像的尺寸,再基于透镜的成像公式计算出虚像的实际尺寸,最终得出VFOV的测量结果;2)利用摄影系统实现虚像到实像的转换,采用相机镜头对AR虚拟图像成像,通过分析拍摄图像来获取AR虚拟图像的实际尺寸。黄兴洲^[12]在对车载平视显示系统的VFOV进行测量时,采用了第一种方法,虽然计算简单,但需要设计光学系统对虚像进行再成像,这对设计的光学系统的成像质量和装配精度要求较高,会引入更多的误差,准确性缺乏保证。多数文献采用第二种方法,如:Yoneyama等^[13]在设计全息头戴式显示器时,利用十字点线图测量了所设计器件的垂直VFOV和水平VFOV;Duan等^[14]在设计具有80°视场的全彩透明近眼全息显示器时,使用132°视场的摄像机来测量显示器的虚拟图像VFOV;王睿等^[15]对设计的车载平视显示光学系统的VFOV进行了计算;王闯等^[16]提出了一种可有效扩展衍射响应带宽的双重体光栅波导结构,并搭建全息波导显示系统,用标尺测量显示网格图尺寸的方式进行测量,得到显示系统的水平和垂直视场角为33.4°和22.6°,对角线视场角为40.3°。上述文献测量VFOV的问题是采用了不同的测试图案,且测量时虚像边缘判定标准不一,可能会导致测量结果产生较大误差。随着智能驾驶技术的发展,针对车载抬头显示系统,国际自动机工程师学会(Society of Automotive Engineers International, SAE International)于2018年11月出台了SAE J1757-2标准^[17],为车载抬头显示系统提供光学测量结构和方法给出了VFOV定义和计算公式,并基于主观判断得到虚像实际尺寸的测量,但具体实施仍然存在实际问题。

本文针对AR光学系统VFOV测量时测量方法、虚像边缘判定标准不明确的问题,从AR平板波导样品的实验测试出发,构建实验环境和测量算法,对VFOV的测量方法以及影响因素进行了研究。

2 虚像视场角的测量原理

根据定义VFOV一般基于虚像视距和最大虚像尺寸计算得出^[17],如图1所示,虚像视距(Virtual image viewing distance, VID)是指人眼与AR光学系统所显示的虚拟图像在光轴方向的间距,最大虚像尺寸是指AR光学系统所能显示的最大虚拟图像的实际尺寸。

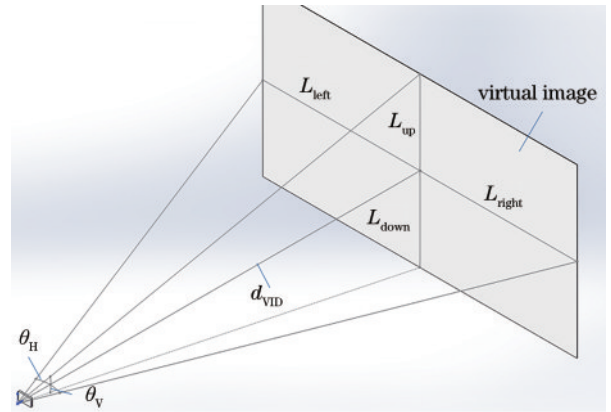


图1 AR光学系统虚像视场角计算示意图

Fig. 1 Schematic of virtual field of view calculation in AR optical system

由图1可知,VFOV的具体计算公式为

$$\theta_v = \theta_{up} + \theta_{down} = \arctan\left(\frac{L_{up}}{d_{VID}}\right) + \arctan\left(\frac{L_{down}}{d_{VID}}\right), \quad (1)$$

$$\theta_H = \theta_{left} + \theta_{right} = \arctan\left(\frac{L_{left}}{d_{VID}}\right) + \arctan\left(\frac{L_{right}}{d_{VID}}\right)$$

式中: θ_v 、 θ_H 分别为垂直(V)和水平(H)VFOV; d_{VID} 为此时的虚像视距; L_{up} 、 L_{down} 、 L_{left} 和 L_{right} 分别为虚像视野中心到AR光学系统所能显示虚拟图像的上、下、左、右边缘的实际距离。

由于AR光学系统所显示的虚像无法直接测量其实际尺寸,所以利用摄影系统实现虚像到实像的转换,即采用相机镜头对AR虚拟图像成像,通过分析所拍摄图像来获取AR虚拟图像的实际尺寸。文献中虚像实际尺寸的获取,通常是直接在测量场景中设置一个带有刻度标尺的背景板,相机同时拍摄AR虚拟图像与背景板,针对二者同时成清晰像时所拍摄的图片,读取背景板上的刻度作为虚拟图像的测量结果^[13,16-17]。该方法实际测量中无法消除主观判断、AR光学系统的自然光透过性能和摄影系统的景深因素影响。故提出:先获取AR虚拟图像在拍摄图像上的像素尺寸,再基于拍摄图像的像素尺寸与实际物理尺寸的换算关系,计算得出AR虚拟图像的实际尺寸。换算关系表示为

$$L_n = D_n \times S, n = up, down, left, right, \quad (2)$$

式中: S 为换算比例; D_n 为图像上与实际尺寸所对应的像素距离。

实际距离 L_n 的计算过程为:1) 先确定 AR 光学系统的 d_{VID} ;2) 摄影系统拍摄物距为 d_{VID} 处的标准物体, 计算标准物体尺寸与该摄影系统所拍摄图像的像素尺寸之间的对应换算比例 S ;3) 测量同一摄影系统所拍摄 AR 设备的虚像的最大显示范围上、下、左、右边缘的像素距离 D_n ;4) 由式(2)计算 L_n 。基于式(1)和式(2)构建的 VFOV 测量算法流程如图 2 所示。

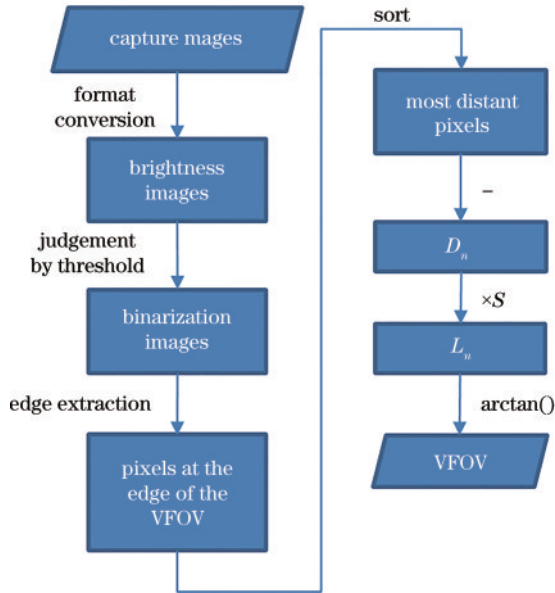


图 2 虚像视场角测量算法流程图

Fig. 2 Flow chart of virtual field of view measurement algorithm

测量算法首先对虚像原始图像进行预处理, 提取亮度图像以排除色彩对视场边缘判断的干扰; 随后基于预设的亮度阈值条件, 对所有像素点进行有效性判断, 当该像素点亮度大于阈值条件时, 才会被认为是属于有效视场中的像素点; 提取处于有效视场边缘位置的像素点的像素位置, 进而计算得到视场中心点到上、下、左、右边缘的像素距离。

3 实验系统与方法

增强现实头盔或者眼镜的核心光学系统是 AR 镜片, 针对三光栅平板波导结构^[18]AR 镜片的 VFOV 进行检测, 搭建的测试系统(如图 3 所示)主要包括: 数字光处理(Digital light procession, DLP)图像源、中继透镜、AR 镜片和相机。测试过程为: DLP 图像源输出图像光利用中继透镜充满 AR 镜片入耦合光栅, 相机记录 AR 镜片输出的虚拟图像。所使用的相机参数如表 1 所示。

VFOV 测量与输入图像直接相关, 若输入的图像过小, 会导致 VFOV 测量结果仅为此时显示图像的 FOV, 从而小于光学系统真实的 VFOV。故输入图像在 AR 镜片入耦合区域上的投影面积需要大于入耦合区域的有效面积, 以确保 VFOV 边缘完全被测试图像

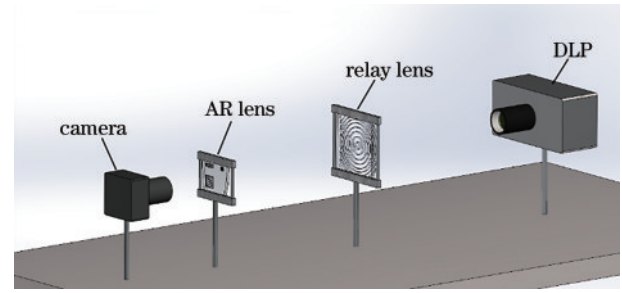


图 3 虚像视场角实验测试系统装置图

Fig. 3 Experimental set-up for the VFOV measurement system

表 1 虚像视场角测试系统实验器件的相关参数

Table 1 Parameters of the devices used in the

VFOV measurement system

Parameter	Value
Image source	DLP5530PGUQ1EVM
Size of CMOS / (")	1/2
Resolution of CMOS	2048×1536
Exposure time /ms	50
Focal length of lens /mm	6
FOV of lens / [(°)×(°)]	41.6 × 53.8
f-number	1.4
Distortion of lens /%	<0.1

填充, 从而保证测量结果的准确性。而输入图像的图形样式也会影响最大虚像边缘到视场中心距离的测量, 文献中使用了中心点线图^[9-13]、网格图^[8,14,16]和九点图^[17]作为输入图像。实验显示以点构成的测试图虽然有利于人眼直观地观察 AR 光学系统的 VFOV 近似大小, 但不利于获取精确测量值。此外, 如果输入图像本身就包含亮度变化, 会对基于拍摄图像像素亮度变化进行的边缘判定造成干扰, 即无论是虚像边缘的亮度下降, 还是图像内部的亮度下降都会被提取出来, 这会提高虚像边缘位置的判断难度, 因此实验最终选择白色网格图作为输入图像, 如图 4 所示。

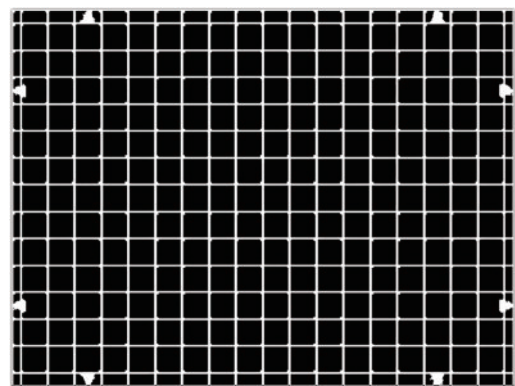


图 4 VFOV 测量所用的输入图像

Fig. 4 Input images used for VFOV measurements

在对虚像图像像素亮度信息进行计算时, 如果环境中存在其他光源, 会为 AR 虚像边缘的判定引入干

扰信息,故选择在实验测量中保持全黑环境,只有 AR 平板波导光学系统所显示的虚拟图像被相机系统采集,以保证 VFOV 测量的客观和准确。

根据相机的聚焦特性,即同一摄影系统拍摄同一物距下的物体,所得到图像的清晰度一致的原理^[19],采集了 VID 实验测量值分别为 1070、1360、1530 mm 时 AR 镜片样品所能显示的最大虚像图像,如图 5 所示。可以看出,最大虚像图像清晰、无明显畸变,三幅图像

肉眼无法观察出差异。对比输入图像(图 4)可知,输出图像并未完全显示出输入图像的全部范围,说明输入光已完整覆盖入耦合光栅的有效区域,而且此时最大虚像图像的大小和形状完全是由 AR 平板波导的各个光栅的大小和形状决定的,这就排除了输入图像过小对 VFOV 测量的影响。图像采集完成后按照图 2 所示的算法流程,利用 Matlab 对 VFOV 进行计算和分析。

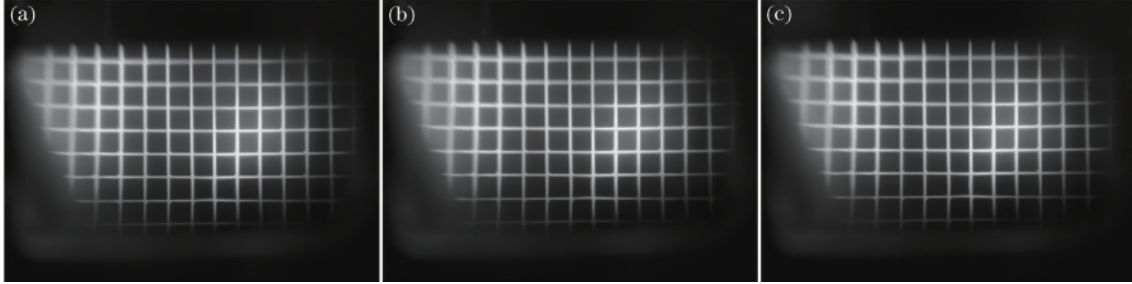


图 5 AR 镜片样品最大显示虚像的拍摄图像。(a) VID 测量值为 1070 mm; (b) VID 测量值为 1360 mm; (c) VID 测量值为 1530 mm

Fig. 5 Photographed images of the maximum displayed virtual images by the AR lens sample. (a) VID measurement is 1070 mm; (b) VID measurement is 1360 mm; (c) VID measurement is 1530 mm

4 实验结果与分析

式(1)和式(2)说明 VFOV 的测量主要取决于 2 个方面因素:1) 最大虚像像素尺寸的测量精度;2) 换算比例的准确性。下面首先讨论最大虚像像素尺寸的测量精度。在分析最大虚像像素尺寸的测量精度时,需要确定虚像像素尺寸的测量方法。

4.1 虚像像素尺寸测量对 VFOV 测量结果的影响

最大虚像像素尺寸就是计算相机拍摄的最大虚像上、下、左、右边缘之间的像素距离。由此可见,像素距离的计算取决于边缘像素位置的判定,因此关键在于作为最大虚像边缘判定标准的亮度阈值 Y_{TH} 。亮度阈值 Y_{TH} 是指用于判断图像中某一像素点是否处于有效视场内的亮度条件,所有满足亮度阈值的像素点构成了拍摄图像中虚像的有效范围,此时计算位于边缘处的像素点的距离即为虚像的像素尺寸。综上所述可以看出计算 VFOV 的核心是确定亮度阈值。

从 AR 器件用户使用的角度出发,当视场中某点的亮度达到一定程度时,该点才可以被使用者观察到,其包含的信息才能被识别。包含信息点的亮度是虚像中的白色图标在黑暗环境中的亮度,背景点的亮度是虚像中的黑色图标在黑暗环境中的亮度。由于测量系统使用黑白纯色网格图,故拍摄 AR 虚像所得到的图像中亮度最大的像素点应为白色网格线上的像素,亮度最小的像素点应为黑暗背景中的像素,所以亮度阈值依据拍摄图像各像素点亮度的最大值或最小值来设定,即当某像素点的亮度大于一定倍率的最小值或一定比例的最大值时,可以认为该像素点属于 AR 虚像

的有效范围。同时也可以选择综合亮度最大值和最小值的各类平均值作为亮度阈值的取值方式。

综上所述,最终选择了以下 6 种基于拍摄图像亮度信息的统计参数作为亮度阈值的取值进行测试:

1) 像素亮度最大值 Y_{max} , 即拍摄图像中所有像素点亮度的最大值,计算公式为

$$Y_{max} = \max(Y); \quad (3)$$

2) 像素亮度最小值 Y_{min} , 即拍摄图像中所有像素点亮度的最小值,计算公式为

$$Y_{min} = \min(Y); \quad (4)$$

3) 像素亮度均值 Y_{mean} , 即拍摄图像中所有像素点亮度的平均值,计算公式为

$$Y_{mean} = \sum_{(i,j)=(0,0)}^{(M,N)} \frac{Y(i,j)}{M \times N}; \quad (5)$$

4) 像素亮度中位数 Y_{med} , 即拍摄图像中所有像素点亮度的中位数,计算公式为

$$Y_{med} = \frac{Y_{\lfloor \frac{M \times N}{2} \rfloor} + Y_{\lfloor \frac{M \times N}{2} + 1 \rfloor}}{2}, \quad (6)$$

式中,下标 $[\]$ 为排序后的标号;

5) 像素亮度算术平均值 Y_{avg} , 即拍摄图像中所有像素点亮度的最大值和最小值的算术平均值,计算公式为

$$Y_{avg} = \frac{\max(Y) + \min(Y)}{2}; \quad (7)$$

6) 像素亮度均方根值 Y_{rms} , 即拍摄图像中所有像素点亮度的最大值和最小值的均方根值,计算公式为

$$Y_{rms} = \sqrt{\frac{\max(Y)^2 + \min(Y)^2}{2}}. \quad (8)$$

以上各式中 Y 为虚像原始图像预处理后的亮度图像数据, M 和 N 分别为图像的行程数和列数, 因此上述像素亮度是指对整幅图像进行计算分析。

这 6 种参数作为虚像边缘亮度阈值的取值范围如表 2 所示。表中 k 为倍率系数, 即所测试的阈值为相应参数乘以 k , 不同参数 k 的取值范围由表 2 中的第 2 列指定。

表 2 所测试的亮度阈值与其取值范围

Table 2 Brightness thresholds tested and their range of values

Brightness thresholds Y_{TH}	Range of values
$Y_{TH} = Y_{max} \times k$	$k = 50 - i, i = 0, 1, \dots, 30$
$Y_{TH} = Y_{min} \times 0.1k$	$k = 50 - i, i = 0, 1, \dots, 30$
$Y_{TH} = Y_{mean} \times k$	$k = 120 - 2i, i = 0, 1, \dots, 30$
$Y_{TH} = Y_{avg} \times k$	$k = 120 - 2i, i = 0, 1, \dots, 30$
$Y_{TH} = Y_{med} \times k$	$k = 120 - 2i, i = 0, 1, \dots, 30$
$Y_{TH} = Y_{rms} \times k$	$k = 100 - 2i, i = 0, 1, \dots, 30$

采用表 2 中 6 种统计参数以每种 31 个不同的取值倍率作为亮度阈值, 对图 5 中 3 个不同的 VID 测量值下拍摄的 AR 平板波导最大虚像图像进行分析, 可以获得共 186 组 VFOV 的实验测量结果。表 3 是不同亮度阈值时的视场角测试结果, 结果表明无论采用哪种统计参数作为亮度阈值, VFOV 测量的结果都与垂直 VFOV 大于 20° 、水平 VFOV 大于 40° 的设计预期相符。从表 3 还可知, 在同一 VID ($d_{VID} = 1530 \text{ mm}$) 下, 6 种统计参数以不同的倍率 k 作为亮度阈值时, VFOV 测量结果存在较大的波动: 以亮度最小值 Y_{min} 、均值

Y_{mean} 、中位数 Y_{med} 作为边缘像素判定的亮度阈值, 垂直 VFOV 测量结果标准差都大于 3.5° ; 以不同统计参数作为亮度阈值所得到的 VFOV 测量结果存在较大差别, 垂直 VFOV ($22^\circ \sim 33^\circ$) 有 11° 的差别, 水平 VFOV ($40^\circ \sim 47^\circ$) 也有 7° 的差别。

表 3 6 种统计参数以不同倍率作为亮度阈值时虚像视场角测量的平均结果

Table 3 Average results of VFOV measurement with each parameter at different magnifications as thresholds

Parameter as threshold	Vertical VFOV result / ($^\circ$)	Horizontal VFOV result / ($^\circ$)
Y_{max}	24.023 ± 1.298	43.484 ± 1.856
Y_{min}	27.072 ± 4.070	45.365 ± 1.353
Y_{mean}	28.063 ± 4.102	46.005 ± 0.889
Y_{avg}	22.380 ± 1.164	40.677 ± 2.102
Y_{med}	33.058 ± 3.679	47.504 ± 1.098
Y_{rms}	22.133 ± 1.695	40.475 ± 2.639

由此可知, 亮度阈值与 VFOV 测量结果具有极高的相关性, 亮度阈值的选择直接影响了 VFOV 的测量结果及精度。下面从不同 VID 测量值的角度, 分析各个亮度阈值下所得的 VFOV 测量结果的稳定性。

4.2 虚像视距对 VFOV 测量结果的影响

同一亮度阈值取值方式下, VID 测量值不同时的 VFOV 测量波动如图 6 所示, 图中横坐标是该参数作为阈值时所取的倍率 k , 纵坐标是 VFOV 测量结果的标准差 (Standard deviation, STDEV), 方形点为垂直 VFOV 的标准差, 圆点为水平 VFOV 的标准差。

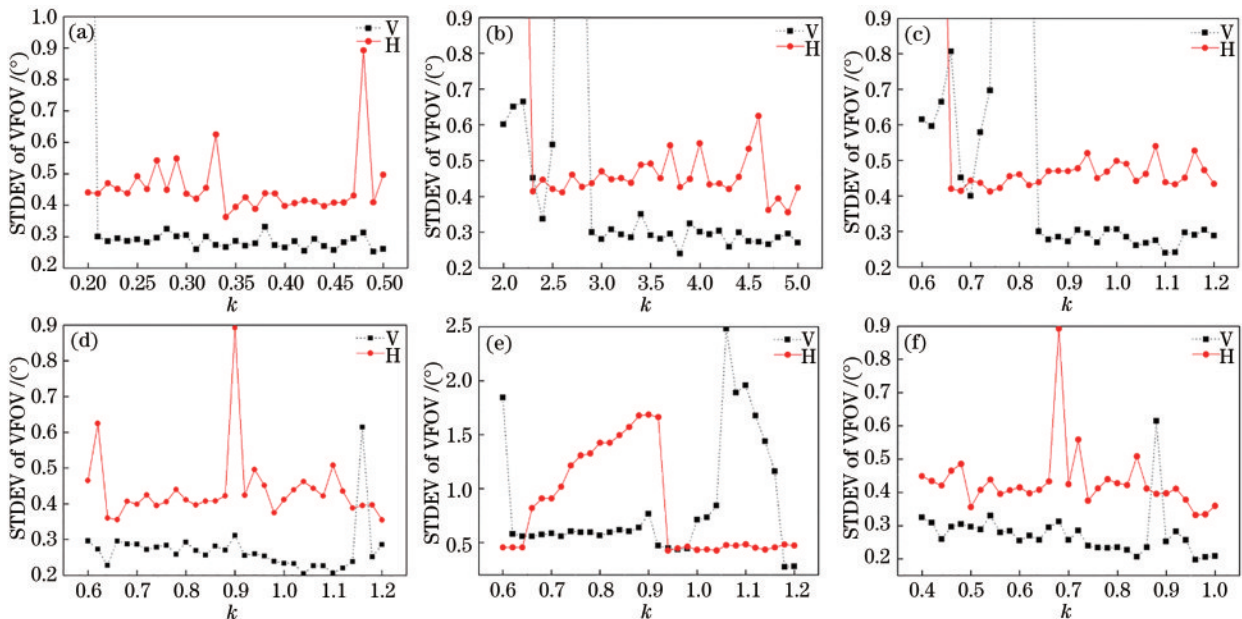


图 6 以各个参数作为亮度阈值时, 不同 VID 导致的 VFOV 的测量波动。(a) Y_{max} ; (b) Y_{min} ; (c) Y_{mean} ; (d) Y_{avg} ; (e) Y_{med} ; (f) Y_{rms}
 Fig. 6 Float range of the measurement result in VFOV due to different VID measurements when each parameter is taken as a threshold. (a) Y_{max} ; (b) Y_{min} ; (c) Y_{mean} ; (d) Y_{avg} ; (e) Y_{med} ; (f) Y_{rms}

由于摄影系统存在景深,即在物方空间存在一定的深度范围,在该深度范围内的物点均可以在电荷耦合元件(CCD)相机像平面上清晰成像^[20],这会导致即使虚拟图像与实际物体的图像清晰度一致,二者之间也可能存在一点物距差,从而使 VID 测量产生较大误差。这也是在实验中同一 AR 光学系统,摄影系统采集同样清晰度的虚拟图像时,3 次实验 VID 测量值不同的原因。

不同 VID 测量值情况下,同一亮度阈值下 VFOV 测量的波动范围的分析结果如表 4 所示。由表 4 可知采用 Y_{max} 的 20% 作为亮度阈值时的垂直 VFOV 的测量波动范围最大,为 $\pm 2.630^\circ$;采用 Y_{med} 的 90% 作为亮度阈值时的水平 VFOV 的测量波动范围最大,为 $\pm 1.685^\circ$; Y_{avg} 的 64% 作为亮度阈值时波动范围最小,垂直 VFOV 为 $\pm 0.228^\circ$,水平 VFOV 为 $\pm 0.360^\circ$ 。

表 4 不同虚像视距测量值下虚像视场角测量结果的波动范围

Table 4 Float range of the virtual image field of view measurements in different values of the virtual image distance measurements

Float range of the measurement result of VFOV	Vertical VFOV result /($^\circ$)	Horizontal VFOV result /($^\circ$)
maximum	28.053 ± 2.630	47.615 ± 1.685
average	25.793 ± 0.473	43.574 ± 0.549
minimum	23.613 ± 0.228	42.936 ± 0.360

表 4 中第二行给出的平均波动范围是指所测试的 186 种亮度阈值在不同 VID 条件下的波动范围的平均结果。实验结果说明:VID 测量误差对 VFOV 测量结果的影响,远小于亮度阈值对 VFOV 结果的影响。

实验中发现:即使 VID 测量存在误差,以像素亮度算术平均值的 64% 作为亮度阈值时 VFOV 测量结果的波动范围最小,其垂直和水平的相对波动范围仅为 0.97% 和 0.84%,结果如表 4 所示,所提取的有效视场范围如图 7 所示。

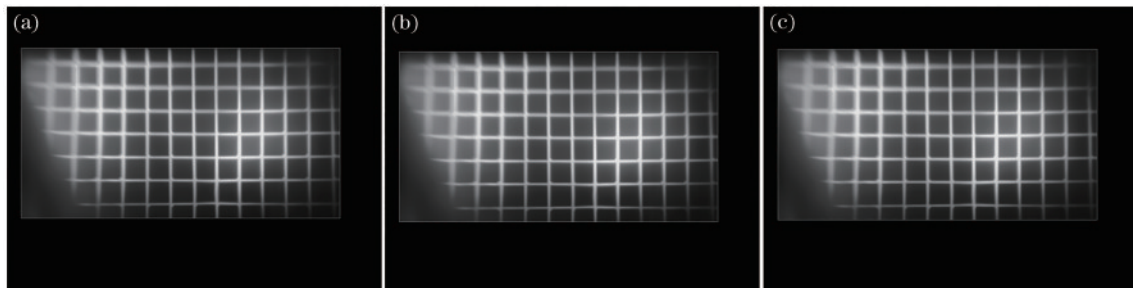


图 7 以像素亮度算术平均值的 64% 作为亮度阈值时所提取的有效视场范围。(a) VID 测量值为 1070 mm; (b) VID 测量值为 1360 mm; (c) VID 测量值为 1530 mm

Fig. 7 Effective field of view extracted when using 64% of average pixel luminance value as the luminance threshold. (a) VID measurement is 1070 mm; (b) VID measurement is 1360 mm; (c) VID measurement is 1530 mm

本文所测试的具有三光栅多层波导结构的 AR 镜片样品与大多数研究中设计的近眼显示类型的 AR 器件在传光原理上相同,均是将 AR 图像光通过输入耦合器耦合到光波导或棱镜中,然后利用全反射特性在光波导或棱镜内部传播、在输出耦合器被扩展并传输到用户眼睛中的器件类型。此外本文所构建的 VFOV 测量方法,从用户角度获取 AR 虚拟图像并拍摄图像进行分析计算,仅涉及用户(摄影系统)和 AR 光学系统生成的虚拟图像,AR 光学系统的结构对于测量系统并不会产生区别化的影响,故认为针对本文实验对象所得出的结论可以广泛引入到同类型 AR 器件的研究中。

5 结 论

从 AR 光学系统 VFOV 的定义出发,搭建了 VFOV 检测系统,采用网格图案作为输入图像,分别采集了 3 种虚像视距条件下 AR 镜片样品的最大虚拟

图像。为确定图像边缘像素位置,基于原始图像的亮度图,设计了 6 种统计参数——像素亮度最大值、最小值、均值、中位数、算术平均值和均方根值作为亮度阈值的取值方式,每种参数选取 31 个不同的取值倍率,获得 186 组 VFOV 的实验测量结果。

实验结果表明,VFOV 测量结果均满足大于 $20^\circ(V) \times 40^\circ(H)$ 的设计要求;对同一视距 VID 条件下以不同统计参数作为亮度阈值时,VFOV 测量结果存在较大差别,垂直 VFOV ($22^\circ \sim 33^\circ$) 有 11° 的差别,水平 VFOV ($40^\circ \sim 47^\circ$) 有 7° 的差别,说明边缘像素亮度阈值的取值方式直接影响 VFOV 测量结果;在 1070 mm、1360 mm 和 1530 mm 3 种 VID 情况下,同一种统计参数垂直 VFOV 的波动最大为 $\pm 2.630^\circ$,水平 VFOV 的波动最大为 $\pm 1.685^\circ$ 。说明亮度阈值对 VFOV 测量结果的影响远大于 VID 测量结果所带来的影响。

即使存在不同的 VID 测量结果,以像素亮度算术平均值的 64% 作为视场边缘判定的像素亮度阈值时,

所测得的 VFOV 测量结果波动最小,为 $23.613^\circ \pm 0.228^\circ (V) \times 42.936^\circ \pm 0.360^\circ (H)$, 相对误差仅为 0.91%, 说明通过该方式所测得的 VFOV 结果最为稳定, 受视距及算法干扰最小。因此推荐该取值方法作为 AR 平板波导系统 VFOV 的测量方法, 其有利于后续研究人员和厂家更准确、便捷地测量 AR 器件的 VFOV 参数, 进而有助于设计和生产工艺的进步, 使 AR 设备更好更快地普及到千家万户。

参 考 文 献

- [1] Gao Q K, Liu J, Duan X H, et al. Compact see-through 3D head-mounted display based on wavefront modulation with holographic grating filter[J]. *Optics Express*, 2017, 25(7): 8412-8424.
- [2] 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.
- [3] Bigler C M, Mann M S, Blanche P A. Holographic waveguide HUD with in-line pupil expansion and 2D FOV expansion[J]. *Applied Optics*, 2019, 58(34): G326-G331.
- [4] 董昊翔, 于迅博, 金秋, 等. 一种基于视点分段式体像素的具有 100° 正面观看视角的桌面式光场显示系统[J]. *中国激光*, 2022, 49(4): 0409001.
Dong H X, Yu X B, Jin Q, et al. Tabletop 3D light-field display with 100° Frontal viewing angle based on view-segmented voxels[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(4): 0409001.
- [5] 徐丁天, 李海峰, 徐良. 基于人眼跟踪的 360° 悬浮显示系统及其畸变校正方法[J]. *光学学报*, 2022, 42(9): 0922002.
Xu D T, Li H F, Xu L. 360° floating display system based on human eye tracking and its distortion correction method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(9): 0922002.
- [6] 杨鑫, 焦述铭, 宋强, 等. 计算机制相位彩虹全息近眼显示[J]. *光学学报*, 2021, 41(22): 2209001.
Yang X, Jiao S M, Song Q, et al. Computer generated phase-only rainbow holographic near-eye display[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(22): 2209001.
- [7] Liu S X, Li Y, Zhou P C, et al. Full-color multi-plane optical see-through head-mounted display for augmented reality applications[J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2018, 26(12): 687-693.
- [8] Gu L, Cheng D W, Wang Q W, et al. Design of a uniform-illumination two-dimensional waveguide head-up display with thin plate compensator[J]. *Optics Express*, 2019, 27(9): 12692-12709.
- [9] Shin B, Kim S, Druzhin V, et al. Eye-box expansion using waveguide and holographic optical element for augmented reality head-mounted display[J]. *Proceedings of SPIE*, 2020, 11310: 113100F.
- [10] Shi J C, Hua J Y, Zhou F B, et al. Augmented reality vector light field display with large viewing distance based on pixelated multilevel blazed gratings[J]. *Photonics*, 2021, 8(8): 337.
- [11] 罗豪, 翁嘉承, 李海峰. 基于液晶偏振体光栅的波导显示系统[J]. *光学学报*, 2022, 42(10): 1005002.
Luo H, Weng J C, Li H F. Waveguide display system based on liquid crystal polarization volume grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(10): 1005002.
- [12] 黄兴洲. 车载平视显示系统光学模组技术研究[D]. 成都: 中国科学院光电技术研究所, 2019.
Huang X Z. Optical technology of automobile head up display system[D]. Chengdu: Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2019.
- [13] Yoneyama T, Murakami E, Oguro Y, et al. Holographic head-mounted display with correct accommodation and vergence stimuli[J]. *Optical Engineering*, 2018, 57(6): 061619.
- [14] Duan X H, Liu J, Shi X L, et al. Full-color see-through near-eye holographic display with 80° field of view and an expanded eye-box[J]. *Optics Express*, 2020, 28(21): 31316-31329.
- [15] 王睿, 江伦, 宋志化. 基于微型投影的集成式车载平显光学系统设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(11): 112201.
Wang R, Jiang L, Song Z H. Optical design of ensemble head-up display system based on mini-projector[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(11): 112201.
- [16] 王闯, 沈忠文, 翁一士, 等. 基于双重体光栅的波导显示系统视场扩展研究[J]. *光学学报*, 2022, 42(7): 0723001.
Wang C, Shen Z W, Weng Y S, et al. Field-of-view expansion of waveguide display system with double-layer volume grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(7): 0723001.
- [17] Society of Automotive Engineers. Standard-optical system HUD for automotive: SAE J1757-2[S/OL]. [2020-09-14]. <http://standards.sae.org/J1757-2> 201811.
- [18] 胡润, 田方旭, 林旗清, 等. 多层全息平板波导显示系统研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(12): 1209001.
Hu R, Tian F X, Lin Q Q, et al. Research on multi-layer holographic planar waveguide display system[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(12): 1209001.
- [19] 张浩, 刘亚丽, 陈丽莉, 等. 一种虚像像距测量系统和虚像像距的确定方法: CN108362479B[P]. 2021-08-13.
Zhang H, Liu Y L, Chen L L, et al. Virtual image distance measuring system and virtual image distance measuring determining method: CN108362479B[P]. 2021-08-13.
- [20] 郁道银, 谈恒英. 工程光学[M]. 3版. 北京: 机械工业出版社, 2011.
Yu D Y, Tan H Y. Engineering optics[M]. 3rd ed. Beijing: China Machine Press, 2011.