

## 基于景深的增强现实光学系统虚像视距测量方法

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** 针对 AR 光学系统中虚像视距(VID)测量方法基于主观判断、易受摄影系统的景深干扰等问题,从 VID 的测量原理出发,提出了利用景深特性使 AR 虚像视距与参考实物物距保持一致的方法,通过构建实验系统和分析算法,采用基于边缘的空间频率响应检测同一摄影系统在拍摄虚像和参考实物过程中图像清晰度的相对变化,将 VID 转换为摄影系统在相应对焦位置时的远景距离,实现对 AR 光学系统 VID 的定量测量。实验结果表明:设计的 VID 测量系统的测量结果(1397 mm)与所测的 AR 波导镜片样品的理论设计值(1400 mm)相符,说明了该测量系统的有效性;测量误差为 10~40 mm,即将理论误差降低到传统测量方法的 1.6%~6.45%,显著提高了 VID 的测量精度。该方法仅基于常用实验器件即可实现 AR 光学系统 VID 的测量,有利于将 VID 检测系统更便捷地投入到 AR 设备的生产和研发环境中,助力 AR 设备设计和生产工艺的进步。

**关键词** 增强现实; 虚像视距; 景深; 图像清晰度; 空间频率响应

中图分类号 O439

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.2011017

## Field Depth Based Virtual Image Viewing Distance Measurement in Augmented Reality Optical System

Tian Fangxu, Zhang Jun\*

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

**Abstract** Due to their subjective nature, conventional virtual image viewing distance (VID) measurement methods in AR optical systems are easily disturbed by field depth of the photography system. To mitigate this issue, this study proposes a method to stabilize object distances between virtual images and actual reference objects using the field depth property based on the measurement principle of VID. In our experimental analysis, the edge-based spatial frequency response is used to measure the relative change of image sharpness in shooting virtual images and reference objects by the same photography system. During this process, the VID is converted into view distance at the corresponding focus position, and a corresponding quantitative measurement is returned. Experimental results show that the VID measurement result generated in this study (1397 mm) matches the theoretical design value of the AR waveguide lens sample (1400 mm), which demonstrates the measurement system's validity. Furthermore, a measurement error of 10–40 mm is observed, which is 1.6%–6.45% of that generated by conventional measurement methods. Because this method enables VID measurement in common experimental optical systems, it is highly applicable across AR-equipped devices, which in turn should help advance these devices' design and production.

**Key words** augmented reality; virtual image viewing distance; depth of field; image sharpness; spatial frequency response

## 1 引言

增强现实(Augmented reality, AR)是一种将计算机生成的虚拟内容在现实世界中无缝叠加,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。随着 Micro-LED 等微显示技术以及微纳波导结构制作工艺的迅猛发展,AR 设备的轻薄化和小型化逐渐成为可能<sup>[1-3]</sup>。作为 AR 设备中光学系统的关键结构参数,虚像视距(Virtual image viewing distance, VID)不仅表征了用户所观察的 AR 虚拟图像的位置

收稿日期: 2022-03-21; 修回日期: 2022-06-17; 录用日期: 2022-06-28

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

信息,也是计算视场角(Field of view, FOV)的重要参量,虚拟图像显示位置与现实物体位置的差异会极大程度影响用户使用 AR 设备时的注意力和观察效果<sup>[4-5]</sup>。能否便捷地测量 VID 对于验证虚拟图像与现实物体叠加的准确性至关重要<sup>[6-7]</sup>,故 VID 是 AR 设备研发中最主要的设计目标之一<sup>[8-17]</sup>。

目前对于 AR 光学系统 VID 的测量均是通过摄影系统拍摄 AR 虚拟图像完成,按光路特征可分为单光路测量和双光路测量,按计算方式可分为根据实际物距计算和根据相机聚焦特性计算<sup>[18-19]</sup>。Gao 等<sup>[8]</sup>、Su 等<sup>[11]</sup>、Liu 等<sup>[12]</sup>、Duan 等<sup>[14]</sup>采用单光路测量,根据实际物距计算 VID,即通过摄影系统在同一光路中拍摄 AR 虚像和实际物体,使二者同时呈清晰像,从而以此时实际物体在摄影系统中的物距作为 AR 光学系统的 VID。Yoneyama 等<sup>[10]</sup>、Shi 等<sup>[15]</sup>采用单光路根据相机的聚焦特性进行测量,即通过摄影系统直接拍摄 AR 虚拟图像,当相机对焦在指定距离时,虚像呈清晰像,则认为此时的距离即为 AR 光学系统的 VID。京东方公司<sup>[20]</sup>在其专利中采用双光路实现 VID 测量,即利用摄影系统在一个光路上拍摄 AR 虚拟图像,当虚像呈清晰像时再将该摄影系统保持状态转移至另一个光路上拍摄实际物体,使实际物体同样呈清晰像,进而将此时的物距认定为 AR 光学系统的 VID。

以上 VID 测量方法中对于虚像和实际物体是否呈清晰像的判定标准较为模糊,均属于主观的定性判定,缺乏对清晰像的定量判断。由于摄影系统存在景深,即物体位于景深范围内均会呈清晰像,这意味着即使主观判断虚像与实际物体同时呈清晰像,二者间也可能存在一定的物距差,导致以上方法所得的 VID 结果存在较大误差。

为解决此问题,提出利用摄影系统的景深特性解决 AR 虚拟图像与实际参考物体物距一致性的方法,通过构建实验系统和分析算法,计算同一摄影系统在拍摄虚像和实际物体的 2 个过程中清晰度的相对变化,更准确地将 VID 转换为实际物体在摄影系统中的物距,从而实现 AR 光学系统 VID 的定量测量。

## 2 测量原理

### 2.1 VID

VID 是指人眼到 AR 光学系统所显示虚拟图像的距离。用户观察到的具有 AR 效果的图像实际为 AR 光学系统显示的虚像,如图 1 所示。由于虚像无法被屏直接接收,所以 VID 需要通过摄影系统将虚像的视距转换为实际物体的物距进行测量。

对于理想光学系统,物空间的一个平面,在像空间只能有一个平面与之共轭。如将成像面称为景像平面,则在物空间仅有一个平面上的物点能够在景像平面上成点像,即可以呈清晰像;其他空间点在景像平面上仅能呈一个弥散斑,无法呈清晰像。基于该原理,当

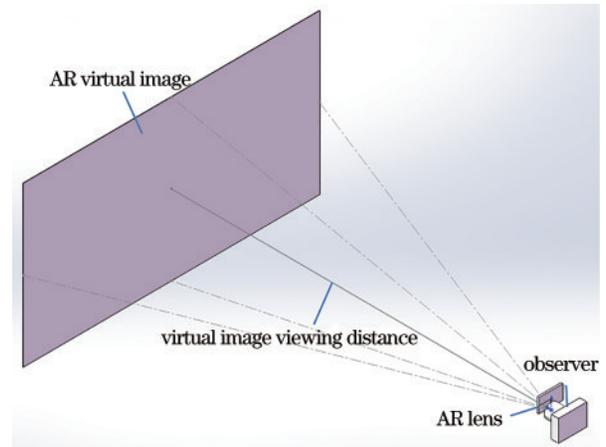


图 1 增强现实光学系统中的 VID

Fig. 1 Virtual image view distance in augmented reality optical systems

AR 虚拟图像和实际参考物体在同一摄影系统可以同时呈清晰像时,可以认为二者此时处于同一个物平面上,即此时 VID 与实际物体的物距相等。

### 2.2 景深

实际情况中,对于数码相机而言,当物点通过相机镜头在景像平面上所呈的弥散斑小于一定限度时仍可以认为是一个点,即此时拍摄到的图像是清晰像。在景像平面上能呈清晰像的物方空间深度范围称为景深。可接受的弥散斑大小与电荷耦合元件(CCD)或互补金属氧化物半导体(CMOS)传感器的像素尺寸有关。

当相机对焦距离为  $x_0$  时,物距为  $x$  处的物点在景像平面上所呈的弥散斑直径  $\delta$ <sup>[21]</sup>为

$$\delta = \frac{|x' - x'_0|}{F}, \quad (1)$$

式中: $F$ 为相机镜头的光圈; $x'$ 为物距  $x$  对应的像距; $x'_0$ 为物距  $x_0$  对应的像距。

根据牛顿公式  $xx' = ff'$ , 可得

$$x' = \frac{f \cdot f'}{x}, \quad (2)$$

$$x'_0 = \frac{f \cdot f'}{x_0}, \quad (3)$$

式中: $f'$ 为像方焦距; $f$ 为物方焦距。

由于相机镜头焦距  $f' = f$ , 将式(2)、式(3)代入到式(1)中可得弥散斑直径为

$$\delta = \frac{f^2 \cdot \left| \frac{1}{x} - \frac{1}{x_0} \right|}{F}. \quad (4)$$

若传感器像素直径为  $\phi_p$ , 呈清晰像的条件可以表示为

$$\delta \leq k\phi_p, \quad (5)$$

式中: $k$ 为常数,表示当弥散斑直径小于传感器像素直径的  $k$  倍时呈清晰像,一般认为  $k$  的取值在 1~2 之间。

将式(4)代入至式(5)中取等号,可计算出物距  $x$

的解为

$$x_1 = \frac{1}{\frac{1}{x_0} + \frac{k\phi_p F}{f^2}}, x_1 < x_0, \quad (6)$$

$$x_2 = \frac{1}{\frac{1}{x_0} - \frac{k\phi_p F}{f^2}}, x_2 > x_0, \quad (7)$$

式中:  $x_1$ 、 $x_2$  分别为此时摄影系统的近景位置和远景位置。从式(6)和式(7)可知摄影系统的景深仅与其本身的参数设置有关,当相机光圈  $F$ 、对焦位置  $x_0$  固定时,其景深空间的位置不变。

由式(6)、式(7)可得景深范围  $\Delta x$  为

$$\Delta x = x_2 - x_1 = \frac{\frac{2k\phi_p F}{f^2}}{\frac{1}{x_0^2} - \left(\frac{k\phi_p F}{f^2}\right)^2} \quad (8)$$

由式(8)可知:相机镜头焦距越小,景深越大;镜头光圈数越大,景深越大;对焦距离越远,景深越大。

### 2.3 VID 转换为实际物距的方法

由于景深的存在,即使判定虚像与实际物体同时呈清晰像,也只能说明二者同时处于摄影系统的景深

范围中,二者间仍存在物距差,即为传统 VID 的测量方法的理论误差,误差上限即为此时摄影系统的景深范围。

在 AR 虚拟图像的拍摄过程中,拍摄系统对焦平面由近到远地通过 AR 光学系统所显示的虚拟图像面,拍摄图像会依次呈现出模糊-清晰-再模糊的过程,如图 2 所示。即当相机的对焦平面处于如图 2(b)所示的虚像和镜头之间的位置时,虚像从此时镜头的远景位置进入相机景深,开始呈清晰像,对应相对清晰度曲线(图 2(a))中的横坐标  $a$ ;随着对焦平面逐渐远离镜头,虚像和对焦平面会出现重叠的情况,如图 2(c)所示;最后,当相机的对焦平面处于图 2(d)所示的位置时,虚像从此时镜头的近景位置离开相机景深,不再呈清晰像,对应相对清晰度曲线(图 2(a))中的横坐标  $c$ 。由于摄影系统的近景、远景位置只随系统对焦距离的变化而变化,该摄影系统在其他状态不变的情况下,拍摄 AR 虚像呈清晰像的对焦位置范围也是不变的,即其存在固定的相对清晰度临界点。如果通过调整相机的对焦位置,使 AR 虚像的相对清晰度达到该临界点,则可使 AR 虚拟图像与相机此时的远景位置重合,此时相机的远景距离即为 VID。

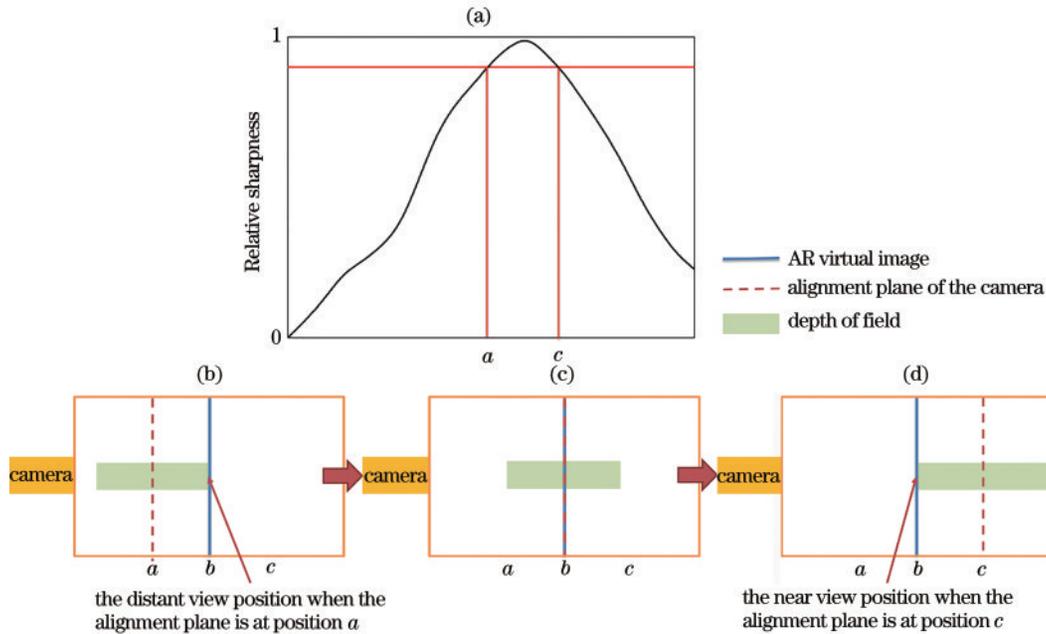


图 2 虚像拍摄过程中相机对焦位置的变化引起景深变化示意图。(a) 相对清晰度曲线;(b) 相机对焦于位置  $a$ ;(c) 相机对焦于位置  $b$ ;(d) 相机对焦于位置  $c$

Fig. 2 Change in depth of field caused by changing camera focus position during photographing a virtual image. (a) Relative sharpness curve; (b) focusing at position  $a$ ; (c) focusing at position  $b$ ; (d) focusing at position  $c$

通过调节摄影系统的对焦位置,使 AR 虚拟图像处于如图 2(b)所示的摄影系统的远景位置上,再通过固定镜头对焦环实现摄影系统的对焦位置固定,同时保持拍摄系统各项参数和设置状态不变,以此保证相机远景位置保持不变。将摄影系统转移至参考实物的拍摄光路,通过调整参考实物的物距采集不同物距处

的实物图像,测量出摄影系统此时的远景距离;摄影系统的远景距离就是 AR 虚像在摄影系统中的物距,即将 AR 虚像的 VID 转换为实物物距的测量。

### 3 测量方案

在实验中基于边缘的空间频率响应检测<sup>[22]</sup>(Edge-

based spatial frequency response measurement, e-SFR) 设计实验方案和分析算法, 从而实现测量过程中对所拍摄图像的清晰度相对变化的定量评估, 绘制所需的对焦环刻度点位(参考实物物距)与相对清晰度的关系图。

空间频率响应(Spatial frequency response, SFR) 定义为成像系统对输入空间频率(Spatial frequency) 的相对振幅响应, 其与光学系统中的调制传递函数(MTF)定义类似, 将对比度的降低程度作为空间频率的函数进行测量。图像中细节处的对比度越高(即 SFR 检测值越大), 从视觉上判断这些细节渲染的图像越清晰<sup>[14,22-24]</sup>, 故可以将 e-SFR 的检测结果作为清晰像临界点的判定依据。

### 3.1 实验环境设计

检测 AR 镜片样品 VID 的实验系统如图 3 所示, 包括用于 AR 虚像位置确定的虚像检测光路和用于远景位置测定的参考实物检测光路: 虚像检测光路(图 3(a))包括图像源、透镜、相机、位移台等装置, 图像源为德州仪器公司的 DLP5530PGUQ1EVM, 其输出的图像光通过中继透镜入射到 AR 镜片样品的入耦合区域。实验中测试的 AR 器件为具有三光栅多层波导结构的 AR 镜片样品<sup>[25]</sup>。

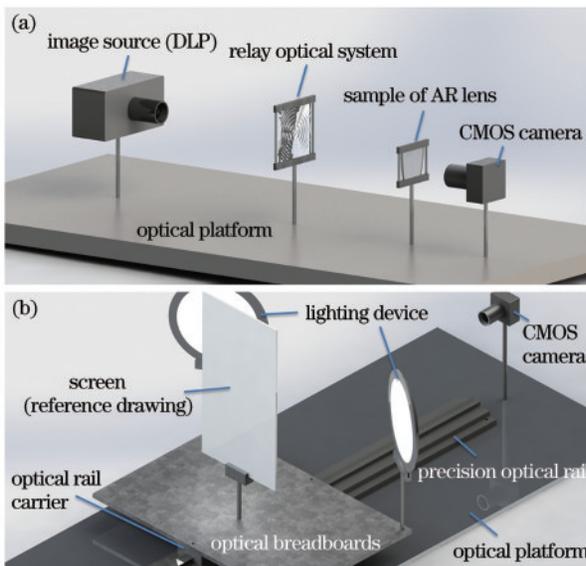


图 3 测试系统实验装置图。(a) 虚像检测光路;  
(b) 参考实物检测光路

Fig. 3 Experimental setup of the test system. (a) Virtual image detection light path; (b) reference object detection light path

摄影系统的相机镜头设置于 AR 镜片样品的出瞳(Eyebow)中心处。虚拟图像光从 AR 镜片的出耦合区出射进入摄影系统中形成图像。参考实物检测光路(图 3(b))包括相机、导轨及滑块、参考实物和照明装置等。相机和导轨固定在实验台上, 导轨方向与相机光轴方向保持一致。参考实物图样与相机光轴垂直, 可以在导轨上移动以满足拍摄不同物距下参考实物图

像和物距精准测量的要求。照明装置与参考实物保持相对位置不变以确保参考实物的照明条件在实验过程中维持不变。

摄影系统的相关参数如表 1 所示, 在整个实验流程中, 除对焦位置以外的所有参数均保持不变。

表 1 摄影系统相关器件参数

Table 1 Parameters of the devices used in the photography system

Parameter	Value
Size of CMOS	1/2"
Resolution of CMOS	2048 pixel × 1536 pixel
Exposure time	50 ms
Focal length of lens	6 mm
FOV of lens	41.6° × 53.8°
$F/\#$	1.4
Colour temperature	6503 K
Distortion of lens	<0.1%

实验中 AR 镜片样品的输入图像和参考实物图样均选取自 ISO 12233 标准中所提供的测试图样<sup>[22]</sup>, 如图 4(a)、图 4(b)所示。

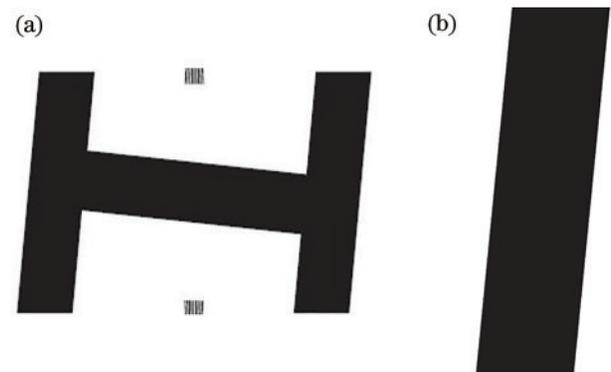


图 4 测量中所使用的测试图样。(a) AR 镜片样品的输入图像;(b) 参考实物图样

Fig. 4 Test pattern used in the measurement method. (a) Input image displayed by AR device; (b) pattern on the reference object

### 3.2 分析算法设计

为判定拍摄得到的 AR 虚拟图像和参考实物图像是否呈清晰像, 设计了算法进行分析, 如图 5 所示, 分析算法包含预处理、e-SFR 计算和归一化汇总 3 个部分。

#### 3.2.1 预处理

对拍摄图像(图 5(a))进行预处理, 包括亮度图转换和检测区域提取, 排除色彩对测量的干扰以及获得满足 e-SFR 计算要求的斜边图像(图 5(b))。将拍摄图像从原始 RGB 格式转换为亮度图, 并进行二值化, 提取出边缘像素; 按亮点个数排序行向量和列向量, 得到图像中斜边中点的像素位置; 在以该像素为中心点的一定范围内, 截取图像得到所需的感兴趣区域

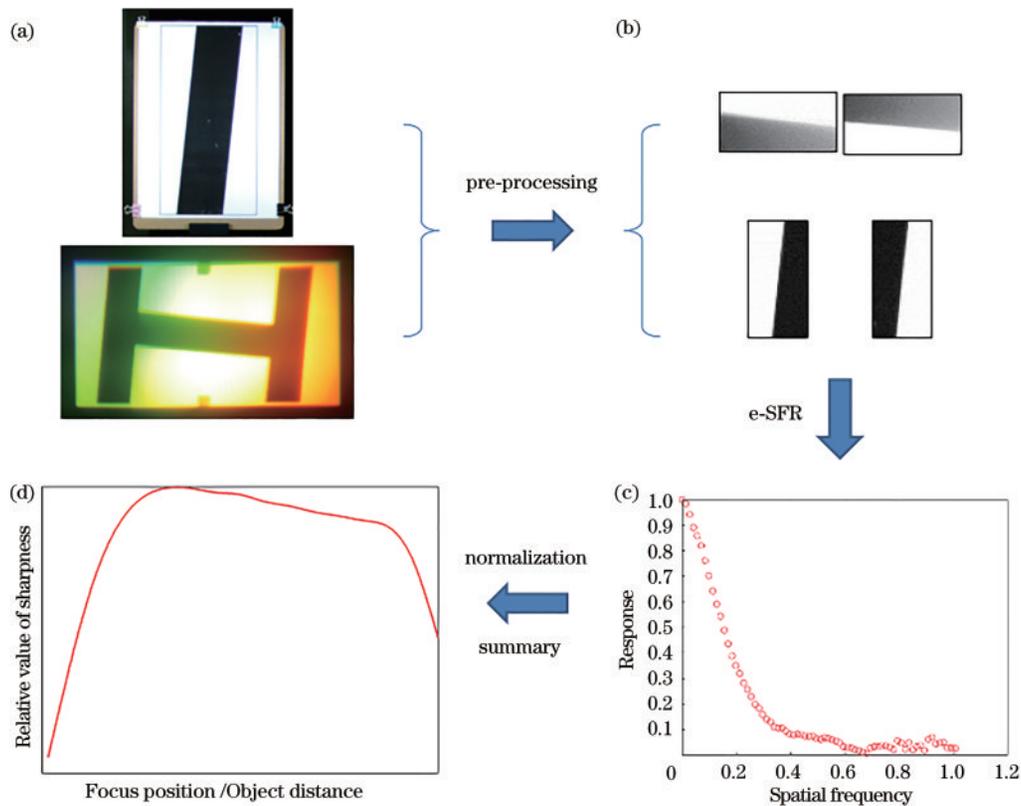


图5 拍摄图像清晰度相对变化分析算法流程。(a)实验拍摄图像;(b)预处理后得到的ROI;(c)e-SFR计算数据;(d)相对清晰度随相机对焦位置或参考实物物距变化关系示意图

Fig. 5 Flow of the analysis algorithm used to calculate the relative change in sharpness of the shooting image. (a) Experiment image; (b) ROI after pre-processing; (c) e-SFR calculation data; (d) schematic diagram of the relationship between relative sharpness and the focus position of the camera or the object distance of the reference object

(Region of interest, ROI)(图5(b))。实验中ROI沿斜边方向的长度和穿过斜边方向的长度均为140 pixel、70 pixel,以满足e-SFR算法对输入斜边至少有32 pixel以上的要求<sup>[22]</sup>。

### 3.2.2 e-SFR计算

调用e-SFR计算算法对预处理后提取的ROI进行计算,得到一组以周期/像素(cycle/pixel)为单位的空间频率及其对应SFR结果的数据(图5(c)中的数据点),进行多项式拟合,以拟合曲线在0到相机Nyquist采样频率(0.5 cycle/pixel)范围内定积分的结果作为该ROI进行e-SFR计算所得的结果。

### 3.2.3 归一化汇总

将不同对焦位置或物距下拍摄图像相同位置ROI的e-SFR计算结果进行归一化,对同一拍摄图像不同ROI的归一化结果取平均值,即为该图像的清晰度相对值,汇总所有对焦位置或物距下拍摄图像的清晰度相对值,得出AR虚拟图像清晰度随对焦位置相对变化的关系以及在所固定对焦位置时摄影系统的景深分布(图5(d))。

## 3.3 实验流程

VID实验流程分为AR虚像位置确定(图6(a)和

图6(b))和远景位置测定(图6(c)和图6(d))2个部分,既包含实验数据采集(图6(a)和图6(c)),也包含算法分析(图6(b)和图6(d))。

整体实验流程如图6所示:1)首先搭建虚像检测光路,在镜头对焦环上预设刻度点位,使对焦平面由远及近拍摄AR光学系统所显示的虚拟图像(图6(a));2)对拍摄图像进行算法处理,实现图像清晰度相对值评估,从而得到虚像清晰度随对焦位置相对变化的关系图,关系图中对焦在近处的清晰像临界点即为图2(a)所示的远景位置,然后将相机对焦环固定在此位置上(图6(b));3)将对焦环固定后的相机转移至参考实物检测光路,参考实物在导轨上移动,拍摄其处于不同物距时的图像(图6(c));4)对拍摄到的实物图像同样进行算法处理,评估其清晰度相对值,计算出在该对焦位置下摄影系统的景深分布,从而得出摄影系统此时的远景位置,即获得AR光学系统的VID(图6(d))。

## 4 结果与分析

重复进行3次实验测量,每次实验由远及近拍摄17个不同对焦位置下AR镜片样品所显示的虚拟图像,其清晰度随对焦位置相对变化的关系如图7所示。

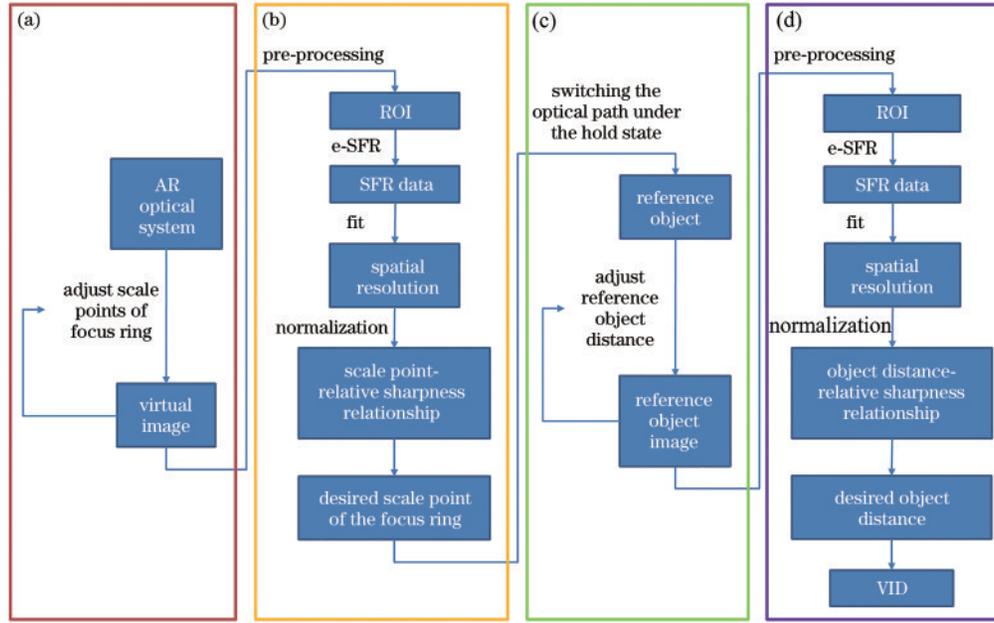


图 6 VID 检测总体流程。(a) 虚像拍摄; (b) 虚拟图像算法分析; (c) 参考实物拍摄; (d) 参考实物图像算法分析

Fig. 6 General flow of the virtual image viewing distance measurement. (a) Virtual image photography; (b) virtual image algorithm analysis; (c) reference object photography; (d) reference object image algorithm analysis

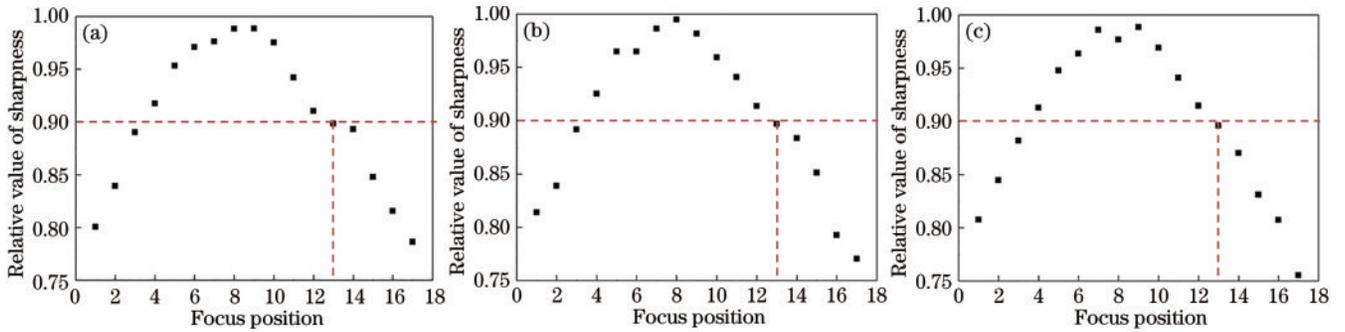


图 7 虚像清晰度随对焦位置相对变化的关系图。(a) 实验 1; (b) 实验 2; (c) 实验 3

Fig. 7 Relative change in sharpness of the AR virtual image with change in focus position. (a) Test 1; (b) test 2; (c) test 3

实验中以清晰度相对值下降至最大值的 90% 作为清晰像的临界点, 可以得到实验 1、实验 2、实验 3 中的临界点均为对焦位置 13。

将镜头固定在对焦位置 13 处, 3 次实验测量得到的固定在相应对焦位置时摄影系统的景深分布如图 8

所示, 同样采用清晰度相对值下降至最大值的 90% 作为清晰像的临界点, 从图 8 中可知, 实验 1、实验 2、实验 3 中摄影系统的远景位置分别为 1410 mm、1370 mm、1410 mm, 即为 AR 波导镜片样品通过实验测量所得到的 VID 结果。

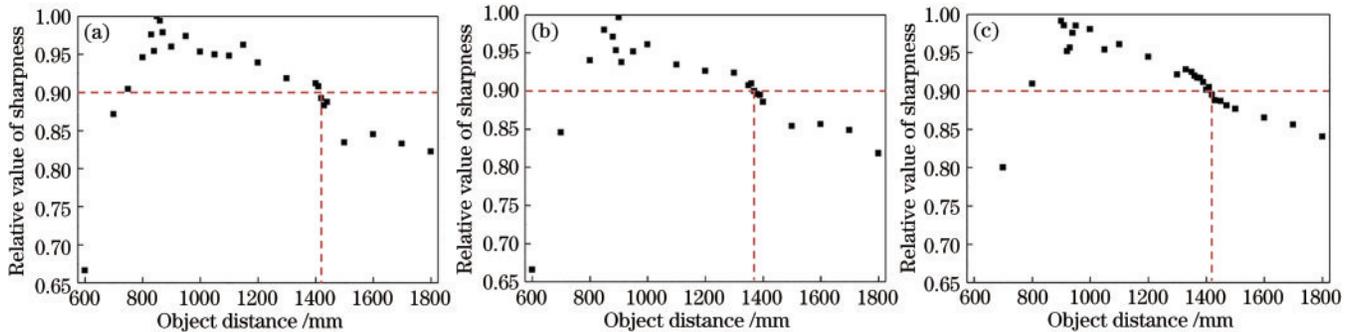


图 8 固定在相应对焦位置时摄影系统的景深分布。(a) 实验 1; (b) 实验 2; (c) 实验 3

Fig. 8 Depth of field distribution of the camera system at the corresponding focus positions. (a) Test 1; (b) test 2; (c) test 3

测量过程中 AR 虚拟图像和参考实物图像的 e-SFR 计算数据多项式拟合结果的统计情况如表 2 所示,说明拟合结果良好,可以反映所计算的 e-SFR 数据。

表 2 实验中对 e-SFR 计算数据多项式拟合的统计情况  
Table 2 Fitting error statistics for the polynomial fit to the e-SFR calculated data

e-SFR data	Coefficient of determination	Root mean squared error
Test 1-AR virtual images	0.977297668	0.028879586
Test 1-reference object images	0.997338809	0.013510731
Test 2-AR virtual images	0.977416845	0.028222864
Test 2-reference object images	0.997199176	0.013745758
Test 3-AR virtual images	0.978895160	0.027285000
Test 3-reference object images	0.997376298	0.013348483

实验测量结果与 AR 波导镜片样品 1400 mm 的理论设计值相符,表明了 VID 测量方法的可行性和实验测量系统的稳定性。测量方法的误差理论上产生的原因包括导轨、测距仪测量长度的误差,以及虚像、实物图像清晰度计算导致的误差。长度测量的误差会直接影响测量结果,而清晰度计算导致的误差会影响清晰像临界点,即远景位置的确定。以清晰度相对值在 0.89~0.91 范围内的物距范围作为单次 VID 的测量误差,3 次 VID 测量的误差分别为 10 mm (VID 的测量结果为 1410~1420 mm)、40 mm (1350~1390 mm)、20 mm (1400~1420 mm),远小于此时通过实验所得到的景深范围 620 mm (800~1420 mm)。因此,所提出的基于景深的 AR 光学系统 VID 测量方法可以实现 VID 测量误差的显著降低,新方法测量误差仅为传统方法理论误差的 1.6%~6.45%。

## 5 结 论

针对 AR 光学系统 VID 测量方法基于主观判断、易受摄影系统的景深所干扰等问题,提出了利用摄影系统景深特性解决 AR 虚拟图像与参考实物物距一致性的方法:通过构建实验系统和分析算法,计算同一摄影系统在拍摄 AR 虚像和参考实物 2 个过程中的清晰度相对变化,进而使 AR 虚拟图像处于对焦距离最近的清晰像临界点,即摄影系统此时的远景位置;再固定系统对焦状态,测量此状态下摄影系统的远景位置,从而更准确地将 VID 转换为参考实物在摄影系统中的物距,最终实现了对 AR 光学系统 VID 的定量测量。

实验结果表明,VID 测量系统所得出的测量结果 (1397 mm) 与 AR 波导镜片样品的理论设计值 (1400 mm) 相符,验证了所设计的 VID 测量系统的有效性。相对于传统测量方法分米量级 (620 mm) 的理论误差,将 VID 转化为摄影系统远景位置的方法将 VID 测量误差降低到厘米量级 (10~40 mm),仅为以

往理论误差的 1.6%~6.45%,显著提高了 AR 光学系统 VID 的测量精度。所设计的方案通过配合电动精密对焦镜头和电动精密位移导轨等装置可以实现更加准确的自动化测量,使 VID 检测系统更便捷地投入到 AR 设备的生产和研发环境中,助力器件设计和生产工艺的进步。

## 参 考 文 献

- [1] 周自平, 黎垚, 严银菓, 等. Micro-LED 应用于近眼显示的现状与趋势[J]. 液晶与显示, 2022, 37(6): 661-679. Zhou Z P, Li Y, Yan Y G, et al. Current situation and trend of Micro-LED application in near-eye display[J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2022, 37(6): 661-679.
- [2] 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): 1006002. 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): 1006002.
- [3] 杨柳, 蒋世磊, 季雪淞, 等. 用于平板波导显示的反射型体全息光栅制备[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(3): 0305001. Yang L, Jiang S L, Ji X S, et al. Preparation of reflective volume holographic grating for plate waveguide display[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(3): 0305001.
- [4] Lin C J, Woldegiorgis B H, Caesaron D, et al. Distance estimation with mixed real and virtual targets in stereoscopic displays[J]. Displays, 2015, 36: 41-48.
- [5] Kang H, Ko J, Park H, et al. Effect of outside view on attentiveness in using see-through type augmented reality device[J]. Displays, 2019, 57: 1-6.
- [6] Frémont V, Phan M T, Thouvenin I. Adaptive visual assistance system for enhancing the driver awareness of pedestrians[J]. International Journal of Human-Computer Interaction, 2020, 36(9): 856-869.
- [7] El Jamiy F, Marsh R. Survey on depth perception in head mounted displays: distance estimation in virtual reality, augmented reality, and mixed reality[J]. IET Image Processing, 2019, 13(5): 707-712.
- [8] 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.
- [9] Soomro S R, Urey H. Light-efficient augmented reality 3D display using highly transparent retro-reflective screen [J]. Applied Optics, 2017, 56(22): 6108-6113.
- [10] 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.
- [11] Su Y F, Cai Z J, Liu Q, et al. Projection-type dual-view holographic three-dimensional display and its augmented reality applications[J]. Optics Communications, 2018, 428: 216-226.

- [12] 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.
- [13] Fan C K, Huang S H, Shen C, et al. Analog LCOS SLM devices for AR display applications[J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2020, 28(7): 581-590.
- [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] 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.
- [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] 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.
- [18] Miletti T, Truant N, Gurabardhi E, et al. HMD quality evaluation of projected image: hardware assessment and software evaluation for distortions correction[J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10676: 106760C.
- [19] Paelke V, Röcker C, Bulk J. A test platform for the evaluation of augmented reality head mounted displays in industrial applications[M]//Karowski W, Trzcielinski S, Mrugalska B, et al. *Advances in manufacturing, production management and process control. Advances in intelligent systems and computing*. Cham: Springer, 2018, 793: 25-35.
- [20] 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. A virtual image viewing distance measurement system and virtual image viewing distance determination method: CN108362479B [P]. 2021-08-13.
- [21] Smith W J. *Modern optical engineering: the design of optical systems*[M]. London: McGraw-Hill Professional, 2008.
- [22] ISO. *Photography-electronic still picture imaging-resolution and spatial frequency responses: ISO 12233: 2017*[S]. Switzerland: International Organization for Standardization, 2017.
- [23] Williams D, Wueller D, Matherson K, et al. A pilot study of digital camera resolution metrology protocols proposed under ISO 12233, edition 2[J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, 6808: 680804.
- [24] Li K, Lake A. 31-3: eyebox evaluation in AR/VR near-eye display testing[J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2019, 50(1): 434-437.
- [25] 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. Multilayer holographic planar waveguide display system[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(12): 1209001.