

# 光学学报

## 基于双目视觉的抬头显示虚像三维形貌测量

冉舒文<sup>1</sup>, 刘显明<sup>1\*</sup>, 雷小华<sup>1</sup>, 章鹏<sup>1</sup>, 尹韶云<sup>2</sup>

<sup>1</sup>重庆大学光电工程学院光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044;

<sup>2</sup>中国科学院重庆绿色智能技术研究院, 重庆 400714

**摘要** 车载抬头显示系统(HUD)通过挡风玻璃反射形成虚像,由于存在光学系统像差,实际虚像并非呈理想平面分布。在现有HUD虚像测量方法中,虚像被视为垂直光轴的平面图像处理,这与实际情况明显不符。为了解HUD虚像的特点,提出利用光线追迹求解最小弥散圆位置来确定眼动范围内HUD虚像像点三维坐标的方法,由此得出不同位置处观察的HUD虚像形貌;进一步建立了基于双目视觉的HUD虚像测量模型,分析了双目基线和相机参数对测量误差的影响,最后对实际HUD虚像进行了三维坐标测量实验。实测虚像形貌与仿真结果基本一致,整体平均相对误差为2.5%。本文方法可以进一步应用于增强现实HUD系统等虚像的三维形貌测量。

**关键词** 测量; 抬头显示; 虚像测量; 双目视觉; 像差

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1912001

### Three-Dimensional Shape Measurement of Head-Up Display Virtual Image Based on Binocular Vision

Ran Shuwen<sup>1</sup>, Liu Xianming<sup>1\*</sup>, Lei Xiaohua<sup>1</sup>, Zhang Peng<sup>1</sup>, Yin Shaoyun<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Optoelectronic Technology & Systems, Ministry of Education, College of Optoelectronic Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

<sup>2</sup>Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences, Chongqing 400714, China

**Abstract** The on-board head-up display (HUD) system produces virtual images through the reflection of the windshield. Due to the aberration of the optical system, actual virtual images are not distributed in an ideal planar pattern. Existing measurement methods for HUD virtual images treat such images as planar ones perpendicular to the optical axis, which is obviously inconsistent with the actual situation. To understand the characteristics of HUD virtual images, this paper proposes a method of determining the three-dimensional (3D) coordinates of the HUD virtual image points within the eyepoint range by performing ray tracing, so as to solve the position of the minimum circle of confusion. HUD virtual image shapes observed at different positions are thereby obtained. Then, an HUD virtual image measurement model based on binocular vision is further developed, and the effects of binocular baseline and camera parameters on the measurement error are analyzed. Finally, experiments are carried out to measure the 3D coordinates of actual HUD virtual images. The measured virtual image shapes are basically consistent with the simulation results, with an overall average relative error of 2.5%. The proposed method can be further applied to the 3D coordinate measurement of virtual images produced by HUD systems such as augmented-reality HUD systems.

**Key words** measurement; head-up display; virtual image measurement; binocular vision; aberration

## 1 引言

传统的汽车仪表和中控台位于驾驶视野下方,驾驶员低头观察汽车仪表信息时,会将视线转移到车内,

造成驾驶分心甚至引发交通事故。抬头显示(HUD)系统可将车辆、导航和娱乐等重要信息以图像方式实时投影显示于挡风玻璃后,驾驶员在保持视线位于前方道路的前提下,直接观察挡风玻璃前投影的虚像,完

收稿日期: 2022-02-14; 修回日期: 2022-03-20; 录用日期: 2022-03-30

基金项目: 国家自然科学基金(61475199,62175239)、重庆市科技重大主题专项(cstc2018jszx-cyztzxX0003)、中国科学院“西部青年学者”专项

通信作者: \*xianming65@163.com

成信息获取与交互,从而有效解决安全驾驶与信息交互的矛盾,提高行车安全性<sup>[1-3]</sup>。抬头显示系统由高亮像源通过多次反射形成虚像,虚像在车外与真实环境相结合,所成虚像的像质及空间位置是评价抬头显示系统性能的关键。目前,在设计HUD光学系统时,通常以投影面为目标面,以减小投影面像差作为光学系统结构优化的计算目标<sup>[4-6]</sup>。由于光学像差复杂,初始平面图像源经光学系统投影后,实际的成像面并非一个平面,即形成的虚像会发生不同程度的倾斜和畸变等空间形变,形变程度还会随着观察位置的变化而变化。为评价和分析HUD系统的成像质量,准确测量并获取眼动范围(eyebow)内HUD所成虚像的空间坐标非常重要<sup>[7]</sup>。

在HUD虚像测量研究中,所成虚像通常被视为理想的平面图像<sup>[7-9]</sup>,这与实际情况存在偏差。虚像与真实物体不同,没有实际的反射面,激光测量等方法不能用于虚像形貌的三维测量,只能采用图像分析方法<sup>[10-12]</sup>。目前相关研究较少,且尚无针对HUD非规则虚像的三维形貌测量研究报道。为获得虚像三维坐标,有学者对其他一些规则反射面形成虚像的特点进行了研究分析,并采用成像方法对虚像进行测量。其中,调焦法<sup>[13]</sup>和双目法<sup>[14]</sup>是目前实现虚像位置测量分析的主要方法。Murra等<sup>[13]</sup>对圆锥镜顶点上方观察到的虚像位置和形貌进行了研究,光学仿真和基于调焦法的实验证明虚像并不位于锥形透镜的底部,而是具有类似尖顶帽的三维形貌。Radel等<sup>[14]</sup>对半球面反射镜中虚像位置进行了研究,推导得到虚像和物体在镜面反射点之间的关系,并使用双目法测量了虚像位置。然而,HUD光学系统中包括汽车挡风玻璃和自由曲面镜,涉及多个具有不对称和不规则特性的反射镜,已报道的研究方法难以应用于复杂的HUD虚像分析和测量。

调焦法是一种通过高斯光学公式求解物距的方法。通常相机焦距固定,调焦过程只改变像距,即相机传感器到镜头的距离,通过物距、像距、焦距之间的关系可求解物距。但这种方法在应用于HUD虚像测量时存在着两个方面的问题。首先是调焦法的测量范围和测量精度受限。传统抬头显示系统的虚像距离通常在2.5 m左右,新一代增强现实抬头显示系统(AR-HUD)甚至具有8 m以上的虚像距离。当满足调焦法清晰成像的条件时,如果焦距固定,物距较大,根据高斯公式,像距的细微变化都将导致物距的剧烈变化。在常见的50 mm焦距条件下,理论上2.5 m左右的物距变化1 cm,其像距仅变化4  $\mu\text{m}$ 。物距越大,像距变化值越小。这就要求调焦系统的定位精度在 $\mu\text{m}$ 以下,在实际应用中很难做到。虽然可以通过增加焦距来增大测量范围、提高精度,但焦距限制了成像设备的视角。焦距越大,视场越窄,越难以观察到完整的图像。其次,调焦法很难测量HUD虚像的三维形貌,需要通过拍摄图像并对其进行分析来寻找清晰成像时的像距,计算过程中,拍摄虚像将作为一个整体平面图像

进行分析。但是,当实际虚像平面不在与光轴垂直的同一平面上时,虚像面上各点的物距并不相同,往往没有明显规律。已报道的锥透镜虚像形貌测量研究中只能通过将测量结果聚焦在锥透镜上的几个特定位置来对其进行验证,很难完成整个虚像面的坐标测量<sup>[13]</sup>。因此,该方法难以适应HUD系统形成的不规则虚像的三维形貌测量。

相较于调焦法,双目法具有更大的测量范围和更高的测量精度,能实现多点坐标测量,这些优点使其更适应于HUD虚像测量。双目法基于双目视觉,广泛应用于实物对象测距和三维重建领域。在半球镜虚像位置的研究中,假设观察位置是固定的,双目的两个观察点距离半球镜面足够近或观察位置距离半球镜面足够远<sup>[14]</sup>,这样就可以忽略观察位置变化引起的虚像位置变化。然而,当镜面形状复杂时,双目观察的虚像形貌和位置变化不容忽视<sup>[15]</sup>。为了分析HUD系统形成虚像的特点,本文建立了基于双目法测量HUD虚像的空间坐标模型,并以所研制的HUD系统为样品搭建了实验测量系统,对实际虚像进行了测量和分析。

## 2 基本原理

HUD系统工作时,像源发出的光经抬头显示系统内部的自由曲面反射镜反射,投射于挡风玻璃上,再经过挡风玻璃反射之后进入人眼,人眼观察到的虚像悬浮在挡风玻璃后面<sup>[16]</sup>。虚像到人眼的距离称为虚像距离,是评价HUD系统性能的重要参数。在HUD系统的使用过程中,很容易发现在眼动范围内不同位置观察到的虚像位置和形貌是不同的,如图1所示。这种现象在目前的HUD系统中很常见,其产生原因在于HUD系统中的像差。像差校正是HUD光学系统设计的关键步骤<sup>[17]</sup>,但像差不能完全消除,只能尽可能减小<sup>[18]</sup>。因此,平面图像源显示的虚像不仅具有三维形貌,其形貌还会随观察位置的变化而变化。

双目法的测量原理如图2(a)所示。两台参数相同的相机平行放置,焦距为 $f$ ,双目基线距离为 $B$ ,左右两台相机拍摄空间中一点 $P(X, Y, Z)$ , $P$ 点投影在左相机图像坐标系中的坐标为 $(x_l, y_l)$ ,投影在右相机图像坐标系中的坐标为 $(x_r, y_r)$ ,则空间点 $P$ 的三维坐标为

$$X = Z \frac{x_l}{f}, Y = Z \frac{y_l}{f}, Z = f \frac{B}{x_l - x_r}, \quad (1)$$

式中: $x_l - x_r$ 为视差。测距时利用视差来完成点 $P$ 到相机平面距离的求解<sup>[19-20]</sup>。

HUD虚像的双目测量模型与真实物体不同,如图2(b)所示。为了观察到完整的虚像,测量时需要将双目测量点定位在眼动范围平面内。从图像源上的一点 $P$ 发出的光被挡风玻璃反射,并被位于眼动范围内的相机接收。随着相机位置的变化,观察到的虚像点的位置也会发生变化。左观察点的像点为 $P_l$ ,右观察点的像点为 $P_r$ 。根据双目测量的原理,这种变化必然会导致测量结果产生误差。两个观测点越接近,虚像点

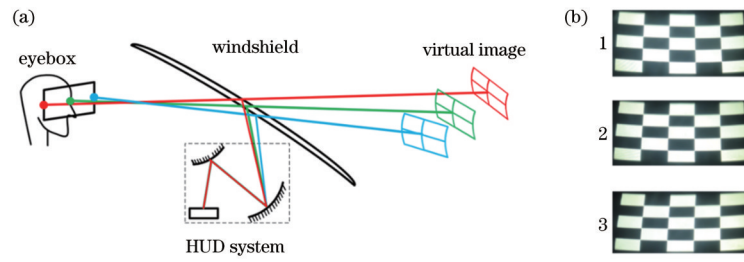


图 1 HUD 系统成像。(a) 成像过程；(b) 不同位置观察到的 HUD 实际虚像(1、2、3 分别是在左、中、右位置观察到的虚像)  
 Fig. 1 Imaging of HUD system. (a) Imaging process; (b) HUD virtual image observed at different positions (1, 2, and 3 are the virtual images observed at the left, center, and right positions, respectively)

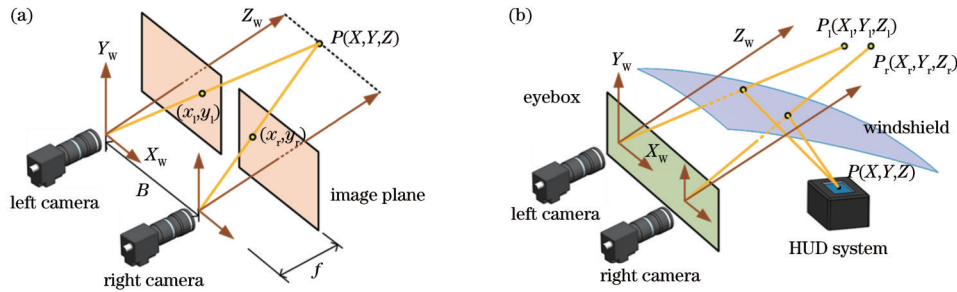


图 2 双目测量与 HUD 双目虚像测量。(a) 双目测量原理；(b) HUD 虚像双目测量  
 Fig. 2 Binocular measurement and binocular virtual image measurement of HUD. (a) Principle of binocular measurement; (b) binocular measurement for HUD virtual images

位置变化越小,但双目测量的精度会降低<sup>[21]</sup>。为了分析观测位置变化对虚像三维形貌测量的影响,以虚像距离为 2.5 m 的实际 HUD 系统为例,建立 HUD 虚像三维坐标模型,并使用双目测量技术来计算其坐标。

### 3 仿真与分析

#### 3.1 虚像仿真

要了解 HUD 虚像的三维形貌,首先遵循传统的 HUD 光学系统设计方法,以投影成像面为目标面进行像差控制,优化光学镜面<sup>[22-23]</sup>。根据汽车挡风玻璃的

表面形状和空间位置设计 HUD 光学系统<sup>[24]</sup>,基本要求包括:虚像距离为 2.5 m,像源尺寸为 60 mm×36 mm,眼动范围为 130 mm×50 mm,虚像尺寸为 293.6 mm×125.6 mm,像源分辨率为 800×480。沿虚像边缘和中心统一设置 9 个视场点,优化设计效果。

图 3(a)为系统仿真示意图,图 3(b)为当观察点位于眼动范围中心时系统的光线轨迹。可以看出:经优化后系统失真仍很难完全消除,整体失真呈扇形。图 3(c)是网格畸变图,图中网格的交点为理想成像位置,散点为实际成像位置。通过比较两者,可以看到更详

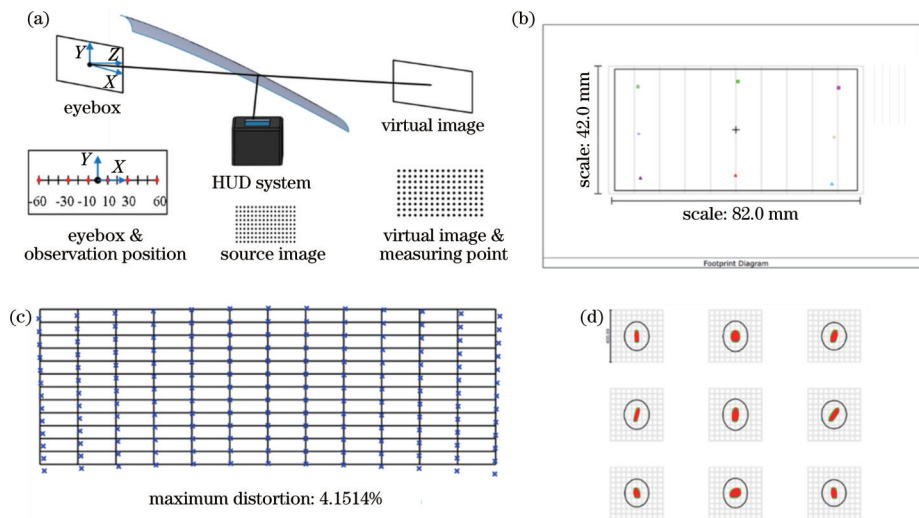


图 3 HUD 设计模型与仿真结果。(a) 仿真示意图；(b) 光线追迹图；(c) 网格畸变图；(d) 点列图  
 Fig. 3 HUD design model and simulation results. (a) Schematic diagram; (b) light trace diagram; (c) grid distortion; (d) spot diagram

细的失真信息。图像的中心部分几乎没有失真,左右两侧有一定程度的扇形失真,畸变率为 4.6%,小于 5%,可以满足大部分应用需求。图 3(d)是点列图,每个视场对应一个点,9 个视场的成像点都在艾里斑内,说明该光学系统具有良好的光学像差性能。

利用上述 HUD 系统的设计,可以通过光线追迹在眼动范围内求解特定观察点对应的虚像点的三维坐标,并拟合出虚像的表面形貌。在不同的观察点获得 HUD 虚像的三维形貌,用于双目测量结果的比较和分析。具体步骤如下:根据设计参数固定 HUD 光学系统和挡风玻璃的位置,以眼动范围的中心为坐标原点,在 X 轴方向从 -60 mm 到 60 mm 以 10 mm 步长

选择 13 个观察点。在图像像源面上设置均匀分布的 9×16 个发光点,进行光线追迹,用均方根(RMS)求解各点对应弥散圆最小处的空间位置,将其作为像点坐标。通过求解 144 个像点的三维坐标,拟合出虚像的表面轮廓。

三组对称观测点对应的仿真结果如图 4 所示。整个虚像面可以认为是由大量的像点组成的,可以发现:虚像面上每个像点的三维坐标会随着观察点的变化而改变。观察点之间的距离越小,对应的像点坐标就越靠近。在整个眼动范围内,虚像形貌变化是不对称的。随着观察点从左到右移动,虚像的形貌也有从左到右拉伸的趋势。

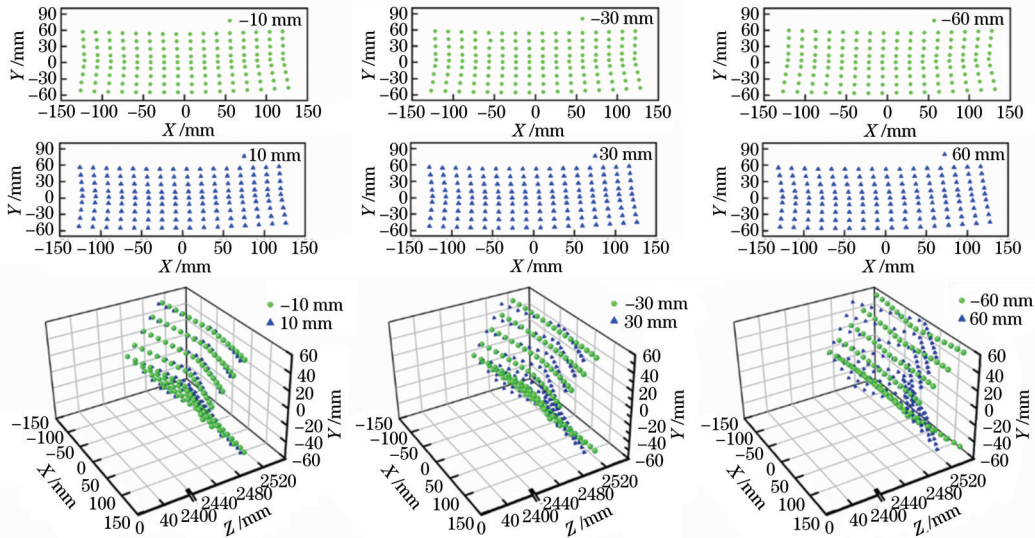


图 4 不同观察位置的虚像坐标仿真结果

Fig. 4 Virtual image coordinates simulated at different observation positions

进一步分析虚像中心位置的坐标变化。当观察位置在眼动范围内从 (-60 mm, 0 mm) 移动到 (60 mm, 0 mm) 时,计算出虚像中心点坐标的轨迹如图 5 所示。可以发现:虚像点在 Y 轴方向的变化最小,不超过 0.6 mm; X 轴方向的偏移小于 5 mm; Z 轴方向的最大偏移达到 70 mm。对于 HUD 系统形成的虚像来说,移

动观察点导致像点在 Z 轴方向的变化远大于 X、Y 方向的变化,因此在双目测量时需要对 Z 轴方向的误差进行重点分析。

### 3.2 双目测量分析

从图 5 结果和 144 个像点坐标的变化可发现:像点在 X 轴方向的坐标变化比在 Y 轴方向的坐标变化要大得多。在双目相机平行且水平放置的条件下,像点的坐标变化会在相机的图像坐标系中表现为 X、Y 坐标的变化,在像点坐标在 Y 轴方向变化较小的情况下,可将其忽略。在像点 Y 轴坐标不变的情况下,像点 Z 轴方向的坐标变化将反映在左右相机中水平视差值中。为了便于分析计算,双目测量模型主要考虑 X 轴方向(沿基线方向)像点位置变化对距离计算的影响。简化的 HUD 虚像双目测量模型如图 6 所示。

假设 HUD 像源上一点 P 投影所成的虚像点在双目左相机中观察为  $P_l$ ,在右相机中观察为  $P_r$ ,  $P_l$  和  $P_r$  在相机中视差值的变化量为  $\Delta n$ ,  $P_l$  和  $P_r$  沿 X 轴方向的坐标变化为  $\Delta m$ , B 为基线距离,根据相似三角形的关系,可得测量误差为

$$\Delta Z_1 = \frac{Z}{B} \Delta m. \quad (2)$$

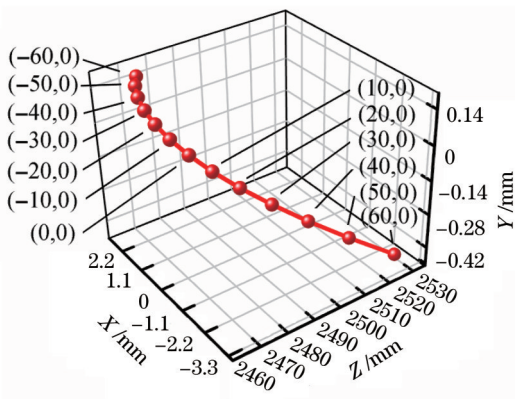


图 5 虚像中心点随观察位置的变化轨迹

Fig. 5 Track of virtual image center varying with observation position

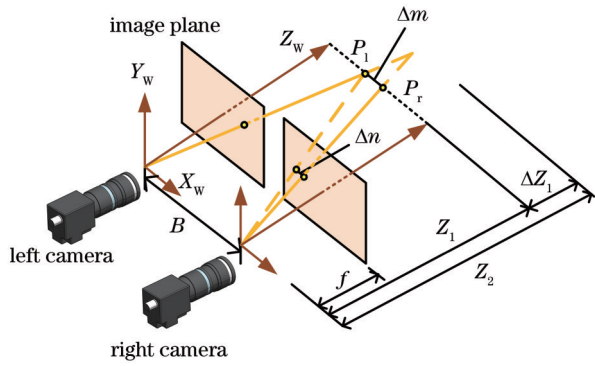


图 6 像点位置变化引起的双目测量误差简化模型

Fig. 6 Simplified model of binocular measurement error caused by position change of image point

像点坐标的变化会引起测量过程中的视差变化,从而导致测量误差,  $\Delta Z_1$  与  $\frac{\Delta m}{B}$  成比例。像点位置的变化增加了双目所形成的测量三角形的面积。因此,像点距离的测量值  $Z_2$  将大于像点距离的真实值  $Z_1$ 。利用上述的虚像点三维坐标分析方法,分析不同观察位置对应的虚像坐标情况。在眼动范围中心两侧对称

选取观察点,分析双目相机在不同基线距离  $B$  条件下观察到的虚像点坐标差异。在左、右观察点单独计算出虚像面上的 144 个像点,以此对应每个双目基线长度,进而计算出 144 个点的坐标差。图 7(a) 是坐标差异的最大值、平均值和最小值与基线之间的关系,可以看出:像点坐标变化值  $\Delta m$  随着基线的增加而增大,像点坐标的变化与基线呈正相关。进一步计算不同基线值对应的双目测量误差,如图 7(b) 所示。由于误差  $\Delta Z_1$  与  $\frac{\Delta m}{B}$  成正比,因此计算出的像点变化误差几乎在一条直线上,测量误差较大的位置主要集中在像差校正效果较差的边缘。

实际测量中还应考虑相机参数的影响<sup>[25]</sup>。取焦距  $f=35\text{ mm}$ ,测距  $Z=2500\text{ mm}$ ,像点提取误差  $\delta=0.0043\text{ mm}$ 。根据误差传播定律,双目基线系统误差可计算为

$$\Delta Z_2 = \frac{\sqrt{2} Z^2}{Bf} \delta. \quad (3)$$

系统误差与基线之间的关系如图 8(a) 所示。结合系统误差和测量误差,总误差与基线的关系如图 8(b) 所示。

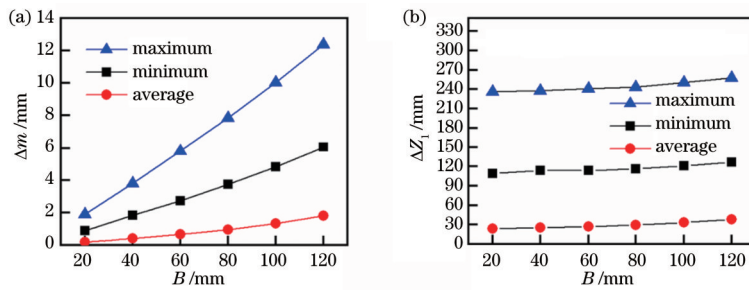


图 7 像点坐标变化与引起的测量误差。(a) 像点坐标变化; (b) 测量误差

Fig. 7 Image point coordinate change and measurement error caused. (a) Change of image point; (b) measurement error

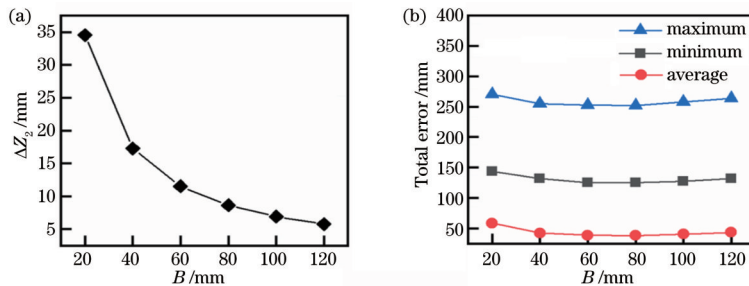


图 8 基线系统误差与基线变化引起的测量总误差。(a) 基线系统误差; (b) 基线变化引起的测量总误差

Fig. 8 Baseline systematic error and total measurement error caused by baseline change. (a) Baseline systematic error; (b) total measurement error caused by baseline change

测量结果主要受像差影响,基线距离变化引入的系统误差相对较小。对于本文研究的 HUD 系统,双目基线值在 40~120 mm 范围内可以有效减小测量误差。基线为 120 mm 时,系统测量误差仅为 0.2%。

## 4 测量实验与分析

使用前文设计加工的 HUD 系统,配合相应的挡风玻璃,搭建了实验测量系统[图 9(a)和图 9(b)]。双目相机安装在一个可调节的二维支架上,其中心位于眼动范围的中心。根据 HUD 设计参数调整 HUD 系

统、挡风玻璃和双目相机的初始位置。双目相机镜头焦距为 35 mm, 双目基线为 120 mm。HUD 系统的源图像设置为白色点阵, 点分布与仿真的位置相同, 如图 9(c) 所示。相机定位完成后, 使用校准后的双目相机

拍摄 HUD 虚像 [图 9(d)]。然后使用匹配算法来匹配左右图像, 并计算出这些点的三维坐标。

以左侧摄像头为主摄像头, 将 (-60 mm, 0 mm) 位置观察到的仿真结果与测量结果进行对比, 如图 10 所示。

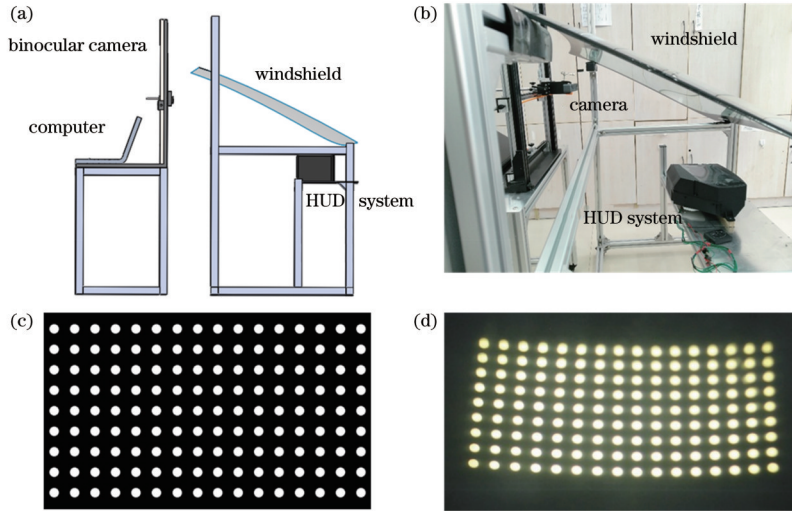


图 9 HUD 虚像实验测量系统。(a) 测量系统示意图; (b) 实验装置; (c) 实际投影图像; (d) 显示虚像 [相机位于 (-60 mm, 0 mm) 位置]

Fig. 9 Experimental system for HUD virtual image measurement. (a) Schematic diagram of measurement system; (b) experimental setup; (c) actually projected image; (d) display virtual image [ camera is located at (-60 mm, 0 mm)]

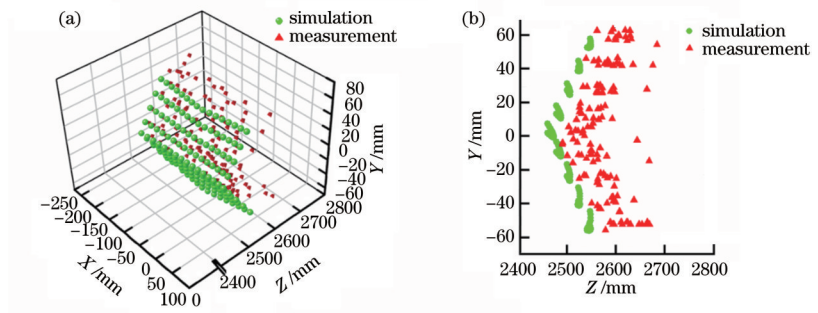


图 10 虚像形貌测量结果。(a) 立体视图; (b) 侧视图

Fig. 10 Virtual image shape measurement results. (a) Stereoscopic view; (b) side view

仿真结果可认为是主相机位置对应的理想虚像形貌, 双目测得的虚像形貌与仿真结果基本一致。像差校正效果在虚像中心区域比较好, 对应的测量结果也较为准确。虚像点坐标变化较大的位置主要位于虚像的上边缘和右边缘。双目测量所得结果受到参考相机中像点空间坐标变化的影响, 因此测得的距离值将大于理想虚像位置。从图 10 中也可以看出, 实测距离值总体上大于仿真结果, 与前文理论分析一致。

将虚像测量结果划分为如图 11 所示的区域, 图中中间 1、2 区域的相对误差范围在 2.3%~4.2% 之间, 而虚像像点坐标变化最大值位于其他区域内。测量值与仿真值最大相差约 189 mm, 最小相差约 12 mm, 相对误差最小为 0.4%, 最大为 7.6%, 整体相对误差为 2.5%。虚像中心区域的像差校正效果较好, 测量结果也相对准确。而边缘区域的像点变化波动较大, 测量误差的变化也相对较大。实验测量还存在抬头显示系

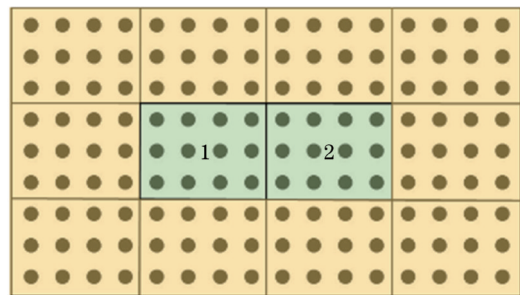


图 11 虚像测量结果分区

Fig. 11 Division of virtual image measurement results

统加工、定位以及测量算法误差, 实验过程中对这些误差的影响通过水平仪、位移台等仪器进行了控制, 其表现为双目测量的虚像离散波动。实验结果表明, 总体测量误差在仿真和分析误差范围之内, 虚像形貌位置

变化对双目测量精度的影响分析得到验证。

## 5 结 论

本文对 HUD 系统虚像的三维变形进行了分析和测量,提出了利用光线追迹求解最小弥散圆位置进而确定眼动范围内 HUD 虚像像点三维坐标的方法。针对 HUD 虚像特点建立像点位置变化引起双目测量误差的理论模型,分析得出测量结果主要受像差影响,基线距离变化引入的系统误差相对较小。结合一款设计投影距离为 2.5 m 的 HUD 系统,对虚像的三维坐标进行仿真,并与实验测量结果进行对比。结果表明,双目视觉方法可以有效获得 HUD 虚像形貌的三维坐标,在像差校正较好的中心区域,可以获得更准确的坐标值。随着像点位置的变化,双目所形成的测量三角形面积增大,实测虚像距离会略大于实际值。本文方法可用于测量和分析传统 HUD 虚像的三维形貌,控制 HUD 产品质量,改进 HUD 系统的光学设计,并可为增强现实 HUD 系统等虚像三维形貌测量提供参考。

### 参 考 文 献

- [1] Park M W, Jung S K. A projector-based full windshield HUD simulator to evaluate the visualization methods [C]//2014 Sixth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN), July 8-11, 2014, Shanghai, China. New York: IEEE Press, 2014: 509-510.
- [2] 安喆, 徐熙平, 杨进华, 等. 结合图像语义分割的增强现实型平视显示系统设计与研究[J]. 光学学报, 2018, 38(7): 0710004.  
An Z, Xu X P, Yang J H, et al. Design of augmented reality head-up display system based on image semantic segmentation[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(7): 0710004.
- [3] Okabayashi S, Sugie N, Imaizumi M, et al. Visual perception of HUD (Head-up display) image with small angle of depression in practical automotive use[J]. Electronics and Communications in Japan (Part III: Fundamental Electronic Science), 1999, 82(4): 1-9.
- [4] 杨通, 段璎哲, 程德文, 等. 自由曲面成像光学系统设计: 理论、发展与应用[J]. 光学学报, 2021, 41(1): 0108001.  
Yang T, Duan Y Z, Cheng D W, et al. Freeform imaging optical system design: theories, development, and applications[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(1): 0108001.
- [5] 张杨柳, 苏宙平, 潘红响, 等. 自由曲面车载抬头显示器的光学设计及公差分析[J]. 光子学报, 2020, 49(9): 0922002.  
Zhang Y L, Su Z P, Pan H X, et al. Optical design and tolerance analysis of freeform automotive head-up display [J]. Acta Photonica Sinica, 2020, 49(9): 0922002.
- [6] 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.
- [7] SAE J1757-2 optical system HUD for automotive[S]. New York: SAE International, 2018.
- [8] 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.
- [9] Kim H, Gabbard J L. Assessing distraction potential of augmented reality head-up displays for vehicle drivers[J]. Human Factors, 2019, 61(1): 844-845.
- [10] Zhou W J, Yu L. Perceptual quality measurement of 3D images based on binocular vision[J]. Applied Optics, 2015, 54(21): 6549-6557.
- [11] Guo K K. 38-2: single-shot scan-less method for virtual image distance measurement for near eye display systems [J]. SID Symposium Digest of Technical Papers, 2019, 50(1): 527-530.
- [12] Levin C A, Haber R N. Visual angle as a determinant of perceived interobject distance[J]. Perception & Psychophysics, 1993, 54(2): 250-259.
- [13] Murra D, di Lazzaro P. Analytical treatment and experiments of the virtual image of cone mirrors[J]. Applied Physics B, 2014, 117(1): 145-150.
- [14] Radel J C, Belanger-Garnier V, Hegedus M P. Virtual image determination for mirrored surfaces[J]. Optics Express, 2018, 26(3): 2599-2612.
- [15] Takaki Y, Urano Y, Nishio H. Motion-parallax smoothness of short-, medium-, and long-distance 3D image presentation using multi-view displays[J]. Optics Express, 2012, 20(24): 27180-27197.
- [16] Mu C T, Lin W T, Chen C H. Zoomable head-up display with the integration of holographic and geometrical imaging[J]. Optics Express, 2020, 28(24): 35716-35723.
- [17] 赵渊明, 崔庆丰, 朴明旭, 等. 基于消像散反射面的离轴虚像系统设计[J]. 光学学报, 2017, 37(10): 1008001.  
Zhao Y M, Cui Q F, Piao M X, et al. Design of off-axis virtual system based on anastigmatic reflection surface[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(10): 1008001.
- [18] 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.
- [19] Zong Y L, Liang J, Wang H, et al. An intelligent and automated 3D surface defect detection system for quantitative 3D estimation and feature classification of material surface defects[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2021, 144: 106633.
- [20] Mrovlje J, Vran D. Distance measuring based on stereoscopic pictures[J]. 9th International PhD Workshop on Systems and Control: Young Generation Viewpoint, 2008, 2: 1-6.
- [21] Kim W S, Ansar A I, Steele R D, et al. Performance analysis and validation of a stereo vision system[C]//2005 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, October 12-12, 2005, Waikoloa, HI,

- USA. New York: IEEE Press, 2005: 1409-1416.
- [22] Lee J H, Yanusik I, Choi Y, et al. Automotive augmented reality 3D head-up display based on light-field rendering with eye-tracking[J]. *Optics Express*, 2020, 28(20): 29788-29804.
- [23] Fan C, He S Y. Micromirror based virtual image automotive head-up display[J]. *Microsystem Technologies*, 2017, 23(6): 1671-1676.
- [24] 欧高焱. 车载增强现实抬头显示光学系统设计与研究[D]. 重庆:中国科学院重庆绿色智能技术研究院, 2019.
- Ou G H. Research and design of augmented reality head-up display optical system for vehicles[D]. Chongqing: Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences, 2019.
- [25] 刘胜道, 邢成聪, 周国华. 远距离三维坐标测量中双目视觉系统的测量精度分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(14): 1415007.
- Liu S D, Xing C C, Zhou G H. Measuring precision analysis of binocular vision system in remote three-dimensional coordinate measurement[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(14): 1415007.