

光学学报

基于人眼跟踪的 360° 悬浮显示系统及其畸变校正方法

徐丁天^{1,2}, 李海峰^{1,2*}, 徐良^{1,2}

¹浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027;

²浙江大学光电科学与工程学院, 浙江 杭州 310027

摘要 传统平面显示技术无法满足 360° 视角、高分辨率的显示效果。提出了一种基于人眼跟踪的 360° 悬浮显示系统。利用多摄像头人眼跟踪算法实时获取观察者视点位置, 并利用 OpenGL 生成对应视角画面。为实现 360° 显示, 设计了一种折反射式柱面投影光学系统。为充分利用投影机有限的分辨率, 提出了一种半周显示方案。为显示正确图像, 提出了基于贝塞尔曲面的预畸变校正方法和极坐标系转换方法, 最终实现了系统 360° 水平视角和一定范围内垂直视角可视。实验结果表明, 所提系统能以高分辨率、低成本的方式实现静态或动态的悬浮显示效果。

关键词 光学设计; 悬浮显示; 人眼跟踪; 投影光学系统; 畸变校正

中图分类号 TN27

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.0922002

360° Floating Display System Based on Human Eye Tracking and Its Distortion Correction Method

Xu Dingtian^{1,2}, Li Haifeng^{1,2*}, Xu Liang^{1,2}

¹ State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang, China;

² College of Optical Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang, China

Abstract The traditional flat-panel display technology cannot satisfy the display effect of 360° viewing angle and high resolution. A 360° floating display system based on human eye tracking is proposed. The multi-camera eye tracking algorithm is used to obtain the observer viewpoint position in real time, and the corresponding view angle picture is generated by OpenGL. In order to realize 360° display, a catadioptric cylindrical projection optical system is designed. In order to make full use of the limited resolution of the projector, a half-circle display scheme is proposed. In order to display the correct image, a predistortion correction method based on Bezier surface and a polar coordinate system conversion method are proposed, and the 360° horizontal viewing angle and vertical viewing angle with a certain range of the system are finally realized. The experimental results show that the proposed system can achieve static or dynamic floating display effects with high resolution and low cost.

Key words optical design; floating display; human eye tracking; projection optical system; distortion correction

1 引言

在二维显示技术趋向成熟的今天, 传统平面显示器已经无法满足用户对于真实感的需求, 真实感中的一个重要指标为多视角显示。业界不乏对于多视角显示的研究, 如视差型自由立体显示技术, 主要分为两类: 1) 基于柱面镜阵列或视差障栅的自由立

体显示技术; 2) 基于多投影机多视角的三维(3D)显示技术^[1]。前者结构简单, 缺点也很明显, 在液晶屏分辨率固定的情况下, 视角越多, 单个视角所分得的分辨率就越低。基于多投影机多视角的 3D 显示技术缺点在于视点位置的固定和不连续, 只有位于指定视点位置才能够看到正确的图像。一种更简单的方法是测量和补偿运动视差, 即随着观察者视点位

收稿日期: 2021-10-18; 修回日期: 2021-10-31; 录用日期: 2021-11-22

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB1002900)

通信作者: *lihaifeng@zju.edu.cn

置的改变,所显示画面能产生明显移动,运动视差允许大脑随着时间的推移将空间信息聚合成一个连续的 3D 形状^[2]。目前实现 360°成像的方式主要为折反射全景成像系统^[3]。Sony 公司 Nakamura 等^[4]搭建了一个 360°透明全息显示系统。该系统采用红外光来定位观察者位置,用户需要额外佩戴红外标记设备。此外,由于无法定位人眼位置,故该系统只支持水平 360°可视,不支持垂直方向的视差。该系统采用了锥面反射镜来调控光线,导致成像面上下像素分布不一致,上部像素分布较为紧凑,下部像素分布较为分散,使得系统整体显示范围较小。

投影到非平面的图像需要进行几何预畸变校正。Raskar 等^[5]通过保形映射和二次曲面变换的方法最小化了投影到非平面的图像拉伸。Sajadi 等^[6]通过单相机提取出非平面屏幕的上下边缘,利用迭代算法计算出相机内外参数,实现了几何畸变校正。

本文针对上述问题提出了一种基于人眼跟踪的

360°悬浮显示系统,支持水平方向 360°视差和一定范围内的垂直视差,主要工作包括:1)实现了基于多相机的 360°人眼跟踪算法;2)为增大显示区域,设计了一种折反射式柱面投影光学系统,其中柱面屏直径为 206 mm,显示高度为 160 mm,显示分辨率达到 1280 pixel × 720 pixel,观看距离为 0.25 ~ 1.50 m;3)为保证正确显示图像,实现了图像的预畸变校正和极坐标系转换。

2 基本原理

2.1 基于人眼跟踪的 360°悬浮显示系统的原理

基于人眼跟踪的 360°悬浮显示系统的工作原理如图 1 所示。该系统由 DLP 微型投影仪、非球面反射镜、透明柱面散射屏、USB 摄像头和步进电机组成。该系统是基于运动视差的,当观察者围绕装置进行观看时,系统会根据人眼所在的位置生成对应视角的画面,所看到的场景好像悬浮在空中一般。

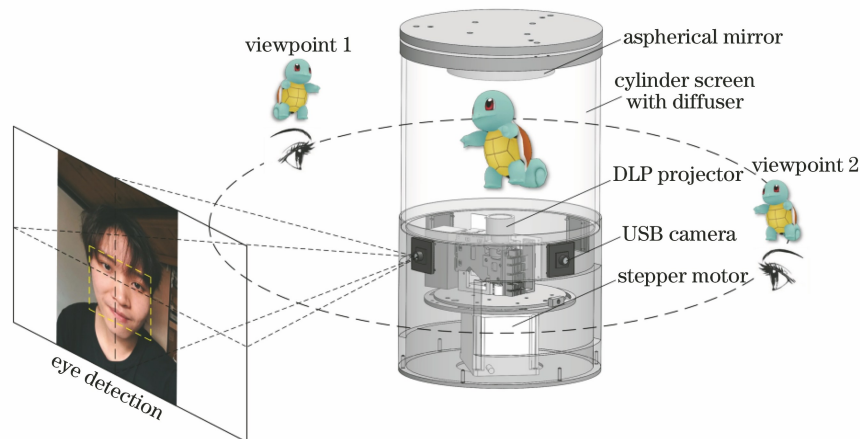


图 1 基于人眼跟踪的 360°悬浮显示系统基本原理

Fig. 1 Basic principle of 360° floating display system based on human eye tracking

显示系统的工作流程如图 2 所示,为将投影机画面正确成像至透明柱面散射屏上,需要一系列的图像转换过程:

1) 360°人眼位置跟踪,利用 4 个 USB 摄像头环绕柱面屏以实时定位人眼位置;

2) 利用 OpenGL^[7]生成 3D 模型场景,根据步骤 1)中获得的视点位置,在 OpenGL 中配置出与实际视点相对应的虚拟视点位置,进而实时生成对应视角的画面。

3) 对投影图像进行预畸变校正,之后将预畸变校正完的图像由笛卡儿坐标系转换至极坐标系,最终投影到透明柱面散射屏上。

在步骤 1)中,360°人眼跟踪需要用到 4 个摄像头,如图 3(a)所示。采用 4 个摄像头画面互相拼接

的方式,根据人眼在拼接图像中的像素位置来定位视点位置,故该系统只支持单人观看。若同时检测到多个人脸,则只会考虑距离系统最近的用户。为提高检测帧率和精度,人眼跟踪算法采用以 MobileNetV2^[8]为主干网络的 RetinaFace^[9]人脸检测模型,该模型可输出人脸检测框和 5 个特征点位置(包括人眼位置)。MobileNetV2 可分为 stage1、stage2 和 stage3,将各个 stage 的特征图送入特征图金字塔网络(FPN)中^[10-11]。该模型检测精度高、鲁棒性好,如图 3(b)所示,即使摄像头只捕获一部分人脸,也能较为准确地定位出人脸和人眼位置,省去图像特征点匹配带来的算法耗时。为满足实时性需求,利用 TensorRT^[12]对模型进行推理加速,使得检测帧率可以达到 50 frame/s 以上。

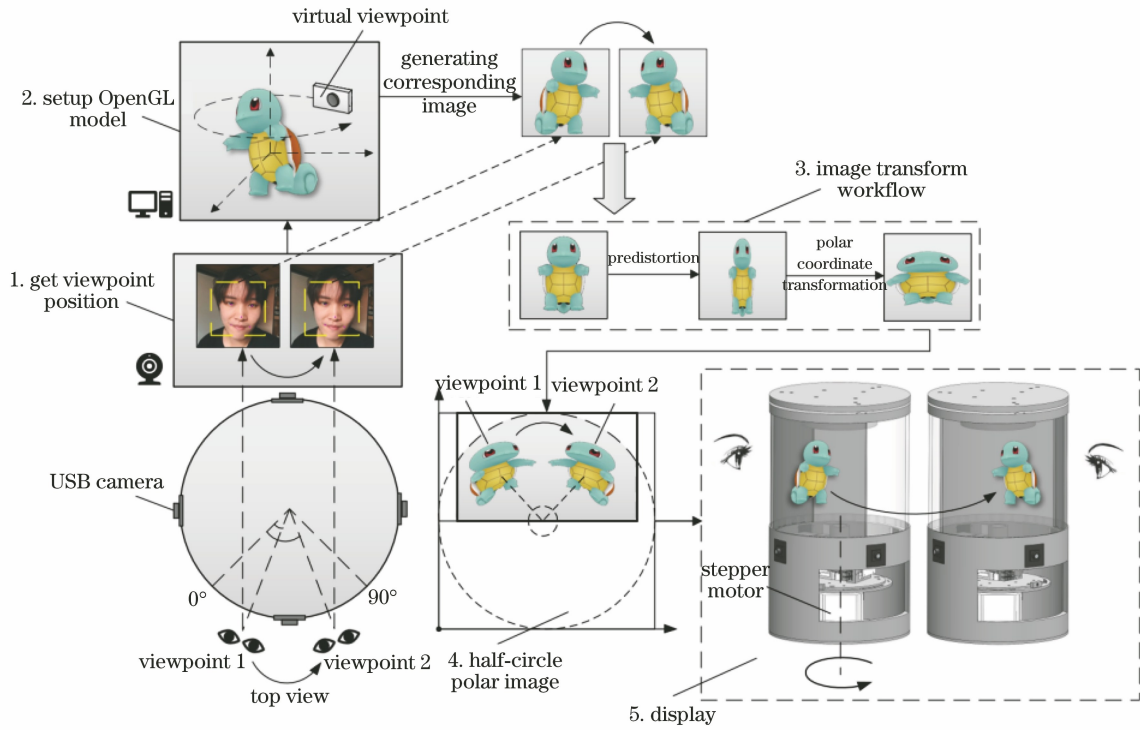


图 2 显示系统工作流程

Fig. 2 Display system workflow



图 3 图像拼接方法和拼接处检测效果。(a)图像拼接方法;(b)拼接处检测效果

Fig. 3 Image stitching method and detection effect of stitching place. (a) Image stitching method; (b) detection effect of stitching place

拼接图像采用 2×2 拼接方式,根据拼接图像中的两眼像素坐标 (x_{p1}, y_{p1}) 和 (x_{p2}, y_{p2}) ,取平均得

到中心视点像素坐标 (x_p, y_p) ,水平视点角度 φ 和以摄像头为中心计算的垂直视角 θ 的表达式为

$$(\varphi, \theta) = \begin{cases} \left(\frac{x_p \theta_{FOV,H}}{w_p}, \frac{\theta_{FOV,V}}{2} - \frac{y_p \theta_{FOV,V}}{h_p} \right), & x_p < w_p \text{ and } y_p < h_p \\ \left(\frac{(x_p - w_p) \theta_{FOV,H}}{w_p} + \theta_{FOV,H}, \frac{\theta_{FOV,V}}{2} - \frac{y_p \theta_{FOV,V}}{h_p} \right), & x_p \geq w_p \text{ and } y_p < h_p \\ \left(\frac{x_p \theta_{FOV,H}}{w_p} + 2\theta_{FOV,H}, \frac{\theta_{FOV,V}}{2} - \frac{(y_p - h_p) \theta_{FOV,V}}{h_p} \right), & x_p < w_p \text{ and } y_p \geq h_p \\ \left(\frac{(x_p - w_p) \theta_{FOV,H}}{w_p} + 3\theta_{FOV,H}, \frac{\theta_{FOV,V}}{2} - \frac{(y_p - h_p) \theta_{FOV,V}}{h_p} \right), & x_p \geq w_p \text{ and } y_p \geq h_p \end{cases}, \quad (1)$$

式中: w_p 和 h_p 为单个摄像头所获取图像的水平 and 垂直像素个数; $\theta_{\text{FOV,H}}$ 和 $\theta_{\text{FOV,V}}$ 为单个摄像头水平和垂直视角(本设计中分别为 90° 和 50°)。

如图 4 所示,由于摄像头的位置与柱面屏显示中心存在垂直高度差(80 mm),因此垂直方向的视点角度不能直接利用式(1)中的 θ 来获取。考虑到人脸越接近相机,两眼之间的像素距离就越大,反之则越小,提出了一种根据两眼像素距离来获取人眼距离摄像头的水平距离 D 的方法,具体计算步骤为

$$\Delta E_p = \sqrt{(x_{p2} - x_{p1})^2 + (y_{p2} - y_{p1})^2}, \quad (2)$$

$$\alpha = \frac{\Delta E_p - \Delta E_{p1}}{\Delta E_{p2} - \Delta E_{p1}}, \quad (3)$$

$$D = (1 - \alpha)D_1 + \alpha D_2, \quad (4)$$

式中: ΔE_p 为两眼像素距离; α 为距离插值系数。 D 以 1 cm 为步长,记录当 D 位于可视距离(0.25 ~ 1.50 m)时 ΔE_p 的值。当算法实时跟踪人眼时,通过当前 ΔE_p 来查找已缓存的最接近 ΔE_p 的两个 ΔE_p , 记为 ΔE_{p1} 和 ΔE_{p2} , 以及它们分别对应的人眼到相机的距离 D_1 和 D_2 , 利用线性插值即可计算出此时人眼距离摄像头的水平距离 D 。垂直方向视角 θ' 的计算公式为

$$\theta' = \arctan \frac{D \tan \theta - D_{\text{offset}}}{R + D}, \quad (5)$$

式中: D_{offset} 为摄像头与柱面屏显示中心的垂直高度差; R 为柱面屏半径。可以发现,垂直方向的可视角度取决于人眼距离摄像头的远近和摄像头的垂直视角范围。

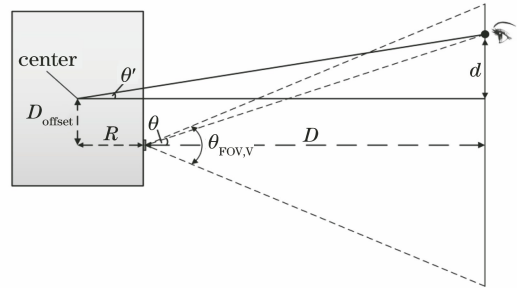


图 4 垂直观点角度计算方法

Fig. 4 Calculation method of vertical viewpoint angle

2.2 折反射式柱面投影光学系统设计

如图 5 所示,折反射式柱面投影光学系统包括投影镜头和非球面反射镜,其中投影镜头由 6 片球面透镜、1 片非球面透镜组成。非球面反射镜参数如表 1 所示,其中 r 为非球面中心曲率半径, k 为二次曲面的圆锥系数, $\alpha_2, \alpha_4, \alpha_6, \alpha_8$ 为高次非球面系数。光线经过非球面镜反射到柱面屏上的显示区域高度达到 160 mm。

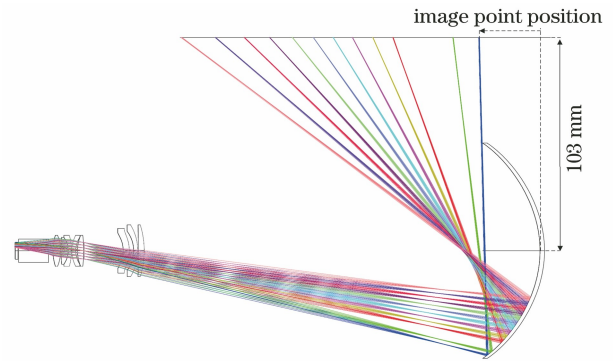


图 5 折反射式柱面投影光学系统

Fig. 5 Catadioptric cylindrical projection optical system

表 1 非球面反射镜参数

Table 1 Parameters of aspheric mirror

Parameter	Surface No.	r	k	α_2	α_4	α_6	α_8
Value	21	-57.201	-0.052	0	7.362×10^{-7}	-7.799×10^{-11}	3.414×10^{-14}

DLP 光机芯片采用 TI 公司生产的对角线长度为 7.62 mm 数字微镜器件(DMD)芯片,显示分辨率为 $1280 \text{ pixel} \times 720 \text{ pixel}$ 。如图 5 所示,为充分利用投影仪有限的分辨率,DMD 采用全偏轴设计,使得投影仪的有效分辨率始终集中于正对用户的半周柱面上,背对用户的半周柱面不会显示(以下称为半周显示)。如图 2 中 half-circle polar image 所示,在半周显示方案下,相应极坐标图也需设置为半周极坐标图。如图 2 中 display 所示,半周显示方式需要结合步进电机来实现 360° 可视。 360° 显示算法工作流程如图 6 所示。首先需要判断水平方向上当前视

点位置与上一次步进电机旋转后的视点位置的间隔是否超过 60° 。若不超过 60° ,则步进电机不旋转,仅极坐标图像跟随视点位置旋转相应角度。若超过 60° ,则步进电机朝观察者运动方向旋转 60° ,同时极坐标图像保持与步进电机相等的速度反向旋转 60° ,进而保证显示画面始终位于柱面屏中心。此外,每次旋转结束后将每帧所记录的水平视点间隔清零。

若所设计的柱面屏的半径为 103 mm,则实际柱面屏的半周长为 $103\pi \text{ mm}$,共覆盖 DMD 上 720 个像素点,计算出投影在柱面屏上的像素大小为

0.143 mm, 对应截止频率 f_c 为 3.5 cycle/mm。采用物方高度作为视场, 利用 Zemax 对系统进行优化, 在归一化视场 1.000, 0.750, 0.500 处设置操作数 REAY 控制目标像点位置分别为 -35, -90, -145 mm, 其中像点位置如图 5 所示, 表示以非球面中心为原点到像点的距离。

优化后不同视场位置相对畸变如表 2 所示。可以看到, 系统仍然存在非线性径向畸变。相对畸变 q 的计算公式为

$$q = \frac{Y - y}{y} \times 100\%, \quad (6)$$

式中: Y 为实际像点位置; y 为理想像点位置。

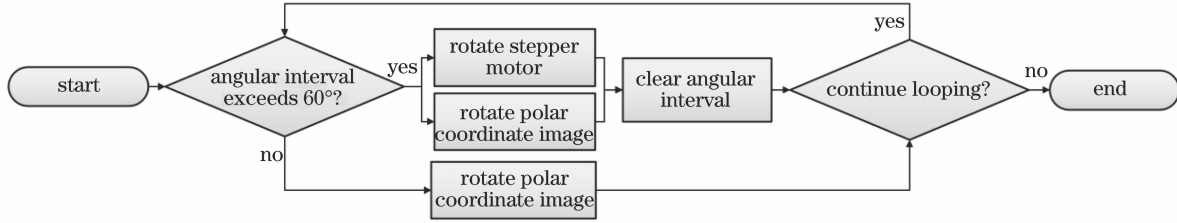


图 6 360°显示算法工作流程

Fig. 6 360° display algorithm workflow

表 2 不同视场位置相对畸变

Table 2 Relative distortion of different fields of view

Normalized field of view	Target position /mm	Real position /mm	Relative distortion /%
1.000	-35.000	-40.411	15.46
0.875	-62.500	-69.139	-10.62
0.750	-90.000	-92.593	2.88
0.625	-117.500	-117.015	-0.41
0.500	-145.000	-147.678	1.84
0.375	-172.000	-193.761	12.65

系统调制传递函数(MTF)曲线如图 7 所示, 考虑到系统的特殊性结构, 在 f_c 处 MTF 值大于 0.2 即达到设计要求。其中, OTF 为光学传递函数。

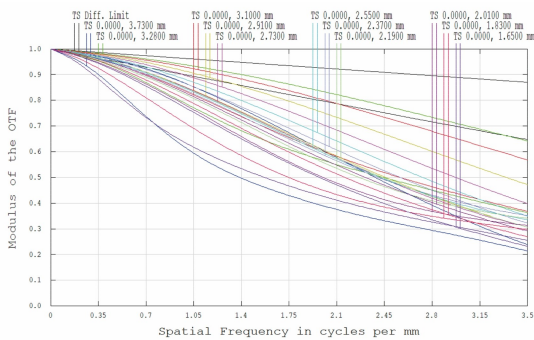


图 7 折反射式柱面投影光学系统 MTF 曲线

Fig. 7 MTF curves of catadioptric cylindrical projection optical system

2.3 柱面投影校正方法

非球面镜虽然减小了光学系统非线性径向畸变, 但是仍无法完全避免, 同时将图片转为极坐标图会造成径向拉伸, 故需要对所显示图像进行预畸变校正。通过计算投影仪帧缓冲区空间和柱面屏空间对应点间的映射关系^[13]来对图像进行预畸变校正。给定要在柱面屏上显示的任何图像, 都可以基于此

映射关系生成馈送到每个投影仪帧缓冲区的图像。

不同空间坐标系下的映射关系如图 8 所示。首先在柱面屏上贴好等间距的基准点, 基准点采用分布为 10×6 的点阵, 由相机拍摄得到位于相机空间下的基准点, 记为 $S_{SFIC}(x, y)$ 。想象将柱面屏展平, 并建立归一化的平面直角坐标系(范围为 $0 \sim 1$), 则可以得到位于柱面屏空间下的基准点, 记为 $S_{SFIS}(s, t)$, 其中 s 和 t 为柱面屏空间的横纵坐标轴, 进而得到相机空间到柱面屏空间的映射关系 $[M_{cs}(\cdot)]$, 相应表达式为

$$S_{SFIS}(s, t) = M_{cs}[S_{SFIC}(x, y)]. \quad (7)$$

利用相机拍摄得到投影仪投射帧缓冲区空间的标准点阵图位于相机空间下的基准点, 记为 $F_{FFIC}(x, y)$ 。基于相机空间到柱面屏空间的映射关系 $M_{cs}(\cdot)$ 可以得到在柱面屏空间下的基准点坐标, 记为 $F_{FFIS}(s, t)$, 相应表达式为

$$F_{FFIS}(s, t) = M_{cs}[F_{FFIC}(x, y)]. \quad (8)$$

若已知投影仪帧缓冲区空间的基准点坐标为 $F_{FFIP}(x, y)$, 结合式(8)中所得 $F_{FFIS}(s, t)$, 则可以计算投影仪帧缓冲区空间到屏幕空间之间的映射关系 $M_{ps}(\cdot)$, 相应表达式为

$$F_{FFIS}(s, t) = M_{ps}[F_{FFIP}(x, y)]. \quad (9)$$

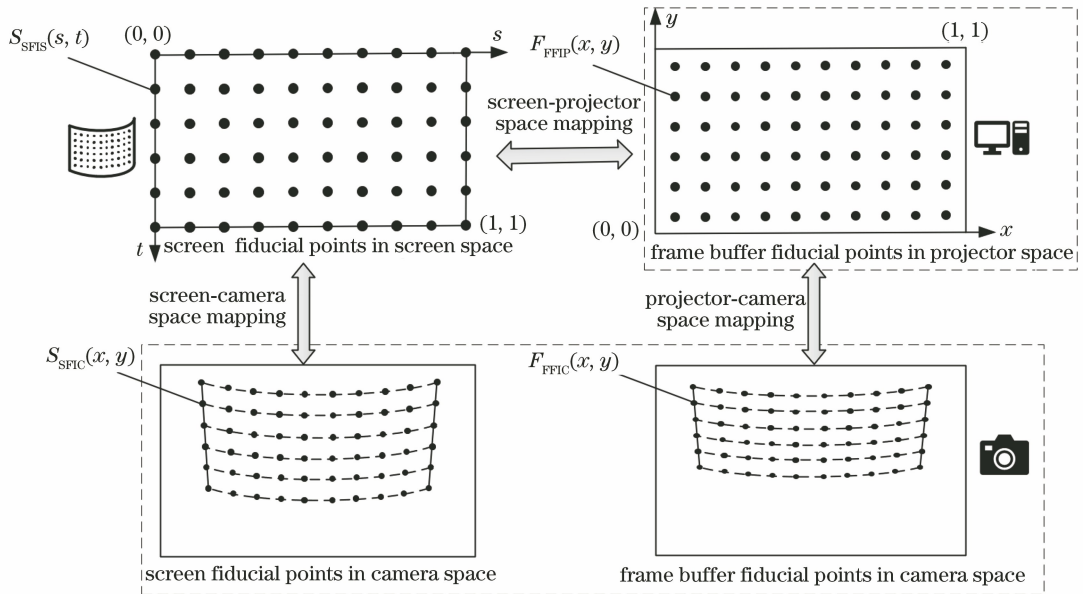


图 8 不同坐标空间下的映射关系

Fig. 8 Mapping relations in different coordinate spaces

以上所述映射关系可以用 Bezier 曲面^[14]来表示,即

$$p(u, v) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m B_i^n(u) B_j^m(v) p_{ij}, \quad u, v \in [0, 1], \quad (10)$$

$$B_i^n(t) = \frac{n!}{i! (n-i)!} t^i (1-t)^{n-i}, \quad i \in [0, n], \quad (11)$$

式中: p_{ij} 为横向第 $i+1$ 和纵向第 $j+1$ 个控制点的坐标; $B_i^n(u)$ 和 $B_j^m(v)$ 分别为横向和纵向的

Bernstein 多项式系数^[14]。

以式(7)为例,其中 $S_{SFIC}(x, y)$ 对应 (u, v) , $S_{SFIS}(s, t)$ 对应 $p(u, v)$,代入式(10),利用最小二乘法即可拟合出控制点坐标。设定投影仪帧缓冲区图像大小为 $1920 \text{ pixel} \times 1080 \text{ pixel}$,定义一系列位于每一个像素中心且归一化的 (u, v) 坐标,根据投影机帧缓冲区空间到屏幕空间的映射关系 $M_{ps}(\cdot)$,计算出每个 (u, v) 坐标所对应的预畸变纹理坐标 (u_L, v_L) ,并将其存储为纹理查找表 (LUT),如图 9 所示。

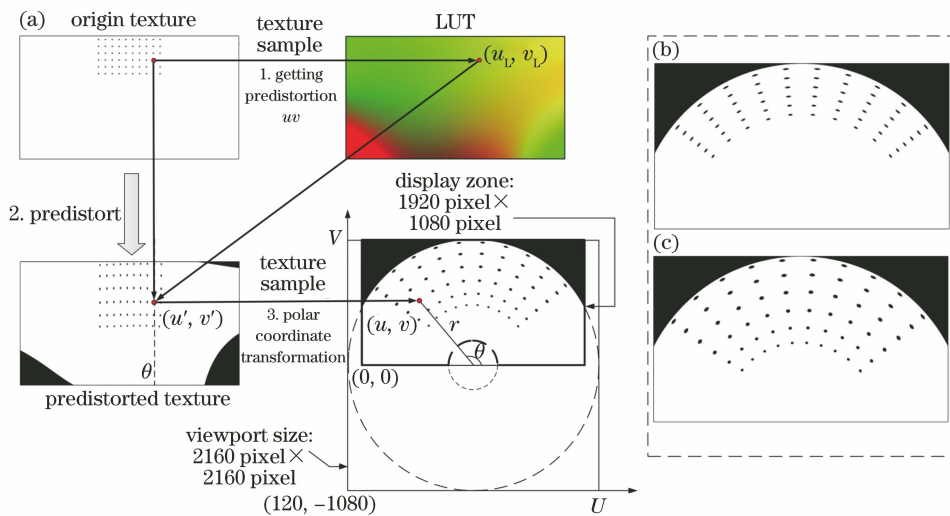


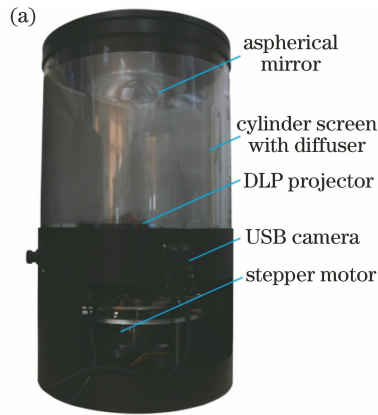
图 9 预畸变校正与极坐标系转换原理。(a)校正原理;(b)预畸变校正前;(c)预畸变校正后

Fig. 9 Principles of predistortion correction and polar coordinate system conversion. (a) Correction principle; (b) before predistortion correction; (c) after predistortion correction

图像的预畸变校正与极坐标系转换如图 9(a) 所示,校正前后极坐标图分别如图 9(b)、(c) 所示。首先,在 OpenGL 片段着色器^[15]中采样 LUT 纹理获得预畸变纹理坐标 (u_L, v_L) 。然后,以此坐标采样原始纹理获得预畸变校正纹理。最后,将预畸变校正纹理进行极坐标系变换得到最终图像。其中,极坐标系到笛卡儿坐标系的纹理坐标转换过程为

$$\theta = \arctan\left(\frac{v - 0.5}{u - 0.5}\right), \quad (12)$$

$$r = \sqrt{(u - 0.5)^2 + (v - 0.5)^2}, \quad (13)$$



$$u' = \theta / (2\pi), \quad (14)$$

$$v' = 2r, \quad (15)$$

式中: θ 为极角; r 为极径; (u', v') 为笛卡儿坐标系下的纹理坐标。

3 实验结果与分析

360°悬浮显示系统实物结构如图 10(a) 所示,显示系统参数如表 3 所示。本系统所用的 DLP 投影仪光机为安华光电 H6H 微型投影光机,如图 10(b) 所示,其中投影镜头为自行设计。

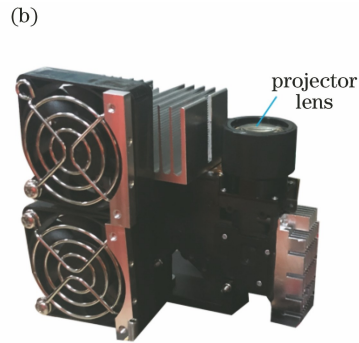


图 10 360°悬浮显示系统实物结构。(a) 系统结构; (b) DLP 投影仪光机结构

Fig. 10 Physical structure of 360° floating display system. (a) System structure; (b) DLP projector optical and mechanical structure

表 3 显示系统参数

Table 3 Parameters of display system

Parameter	Value
Frame rate of DLP projector / (frame · s ⁻¹)	60
Resolution of DMD / (pixel × pixel)	1280 × 720
Diagonal length of DMD / mm	7.93
Diameter of cylinder screen / mm	206
Display height / mm	160
Frame rate of display system / (frame · s ⁻¹)	40
Viewing distance / m	0.25 - 1.50

在预畸变校正实验中,贝塞尔曲面选择 4 × 4 控制点校正效果最佳。柱面屏空间实际基准点和通过贝塞尔曲面拟合所得的基准点的误差如图 11 所示,其中横坐标为基准点序号,纵坐标为误差。由于柱面屏空间点已归一化,故可采用 (x_1, y_1) 与 (x_2, y_2) 之间的欧氏距离来表示误差,误差表达式为

$$E_{\text{Error}} = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}. \quad (16)$$

实际 $S_{\text{SFIS}}(x, y)$ 与拟合后 $S_{\text{SFIS}}(x, y)$ 最大误差仅为 0.00359, 实际 $F_{\text{FFIS}}(x, y)$ 与拟合后 $F_{\text{FFIS}}(x, y)$

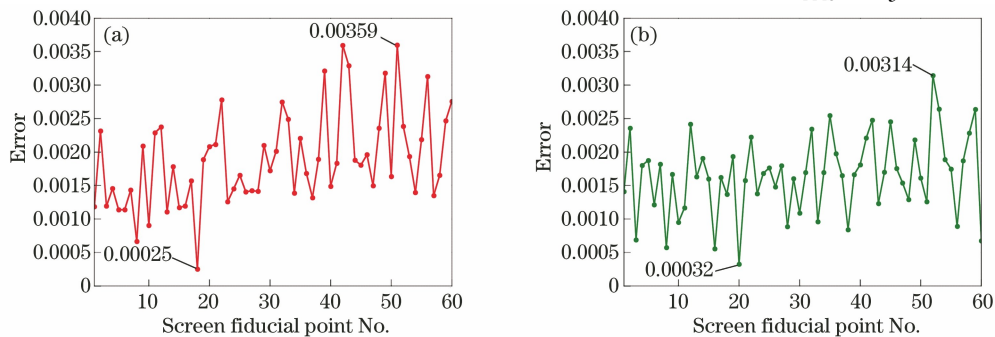


图 11 柱面屏空间中实际基准点和拟合基准点误差。(a) SFIS 误差; (b) FFIS 误差

Fig. 11 Error of actual reference fiducial point and fitting reference fiducial point in cylindrical screen space.

(a) Error of SFIS; (b) error of FFIS

y)最大误差仅为 0.00314,可见利用贝塞尔曲面构建坐标空间映射的方法精度较高。

柱面屏畸变校正结果如图 12 所示。其中,图 12(a)为目标校正结果,表示在相机空间下,柱面屏贴上标准点阵图所得的图像,每个基准点即为 $S_{SFIC}(x,y)$ 。图 12(b)为校正前效果,表示在相机

空间下,投影仪投射标准点阵图所得的图像,每个基准点即为 $F_{FFIC}(x,y)$,可以看出校正前的画面存在较为明显的径向畸变。图 12(c)表示实际校正结果,根据式(16),图 12(a)与图 12(c)中每个基准点(归一化后)的误差如图 13 所示,其中最大误差为 0.01526,最小误差为 0.00185,平均误差为 0.00780。

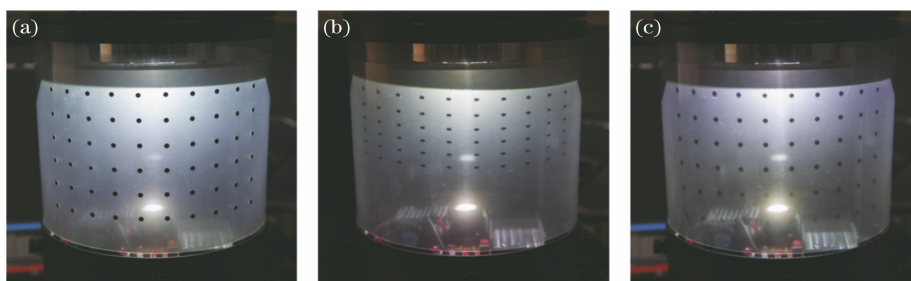


图 12 柱面屏畸变校正结果。(a)目标校正结果;(b)校正前;(c)实际校正结果

Fig. 12 Cylindrical screen distortion correction results. (a) Target correction result; (b) before correction; (c) actual correction result

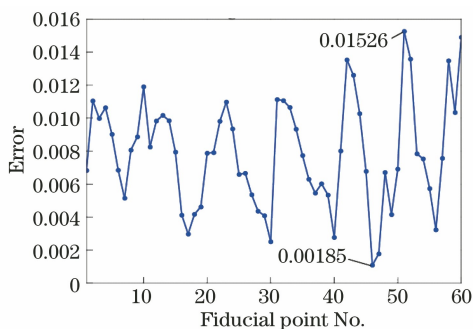


图 13 相机空间中目标校正结果和实际校正结果的误差

Fig. 13 Error between target correction result and actual correction result in camera space

360°悬浮显示系统的显示效果如图 14 所示,分别选取了左侧、正对、右侧三个方向进行观察。其中,图 14(a)~(c)表示平视系统时所观察到的结果,图 14(d)~(f)表示俯视系统时所观察到的结果。系统可以随着视点位置的改变而呈现出不同视角的图像,显示帧率在 30 frame/s 以上,支持静态、动态画面显示,运动视差所带来的心理暗示满足用户对于显示真实性的需求。

4 结 论

设计了一种基于人眼跟踪的 360°悬浮显示系

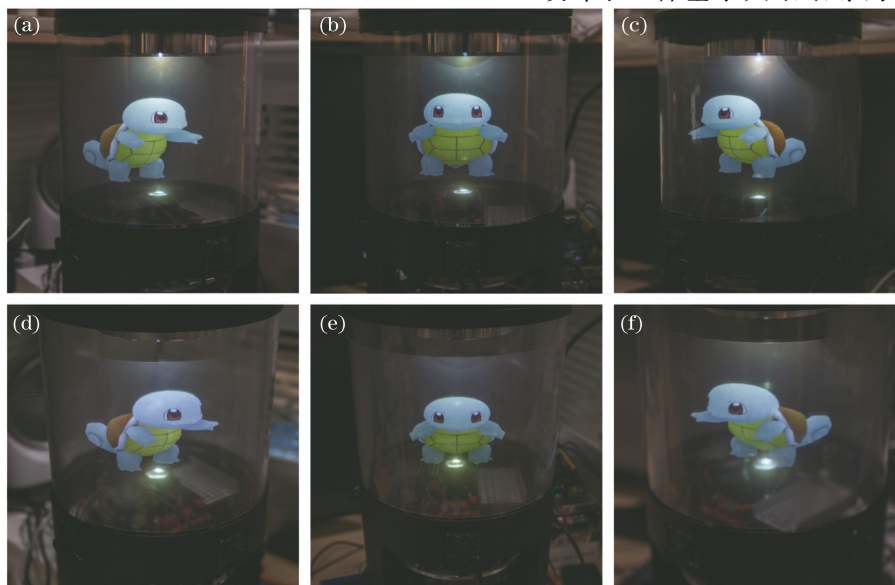


图 14 不同视点位置显示效果。(a)左侧平视;(b)正对平视;(c)右侧平视;(d)左侧俯视;(e)正对俯视;(f)右侧俯视

Fig. 14 Display effect of different viewpoint positions. (a) Looking straight on left side; (b) looking straight in middle; (c) looking straight on right side; (d) looking down on left side; (e) looking down in middle; (f) looking down on right side

统,利用多摄像头人眼跟踪算法定位观察者位置,进而实时生成对应视角的画面。设计了一种折反射式柱面投影光学系统,可以有效调控投影光线至柱面屏区域,增大了显示范围。提出了一种半周显示方案,保证 DMD 有限的分辨率可以被充分利用。着重实现并分析了柱面投影校正方法,其中包括利用贝塞尔曲面的预畸变校正和图像的半周极坐标系转化过程。实验结果表明,所提系统具备多视角、较高分辨率、低成本和优秀的悬浮显示效果等优点,满足用户对显示真实性的需求。

参 考 文 献

- [1] Hong J, Kim Y, Choi H J, et al. Three-dimensional display technologies of recent interest: principles, status, and issues [Invited] [J]. *Applied Optics*, 2011, 50(34): H87-H115.
- [2] Gibson E J, Gibson J J, Smith O W, et al. Motion parallax as a determinant of perceived depth [J]. *Journal of Experimental Psychology*, 1959, 58(1): 40-51.
- [3] 景文博, 高雪峰, 黄炳坤, 等. 圆柱物体内壁的锥面折反射全景图像展开[J]. *光学学报*, 2021, 41(3): 0311002.
Jing W B, Gao X F, Huang B K, et al. Expansion of conical catadioptric panoramic image of inner surface of cylindrical objects[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(3): 0311002.
- [4] Nakamura T, Yano T, Watanabe K, et al. 360-degree transparent holographic screen display [C] // Special Interest Group on Computer Graphics and Interactive Techniques Conference, July 28-August 1, 2019, Los Angeles, CA, USA. New York: ACM Press, 2019.
- [5] Raskar R, Baar J V, Beardsley P, et al. iLamps: geometrically aware and self-configuring projectors [J]. *ACM Transactions Graphics*, 2003, 22(3): 809-818.
- [6] Sajadi B, Majumder A. Markerless view-independent registration of multiple distorted projectors on extruded surfaces using an uncalibrated camera [J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2009, 15(6): 1307-1316.
- [7] Sellers G, Wright R S, Jr, Haemel N. OpenGL superBible: comprehensive tutorial and reference [M]. London: Addison-Wesley, 2013: 33-40.
- [8] 高刘雅, 孙冬, 卢一相. 基于轻量级注意机制的人脸检测算法[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(2): 0210010.
Gao L Y, Sun D, Lu Y X. Face detection algorithm based on a lightweight attention mechanism network [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(2): 0210010.
- [9] Deng J K, Guo J, Verweras E, et al. RetinaFace: single-shot multi-level face localisation in the wild [C] // 2020 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), June 13-19, 2020, Seattle, WA, USA. New York: IEEE Press, 2020: 5202-5211.
- [10] Lin T Y, Dollár P, Girshick R, et al. Feature pyramid networks for object detection [C] // 2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), July 21-26, 2017, Honolulu, HI, USA. New York: IEEE Press, 2017: 936-944.
- [11] 刘英杰, 杨风暴, 胡鹏. 基于 Cascade R-CNN 的并行特征金字塔网络无人机航拍图像目标检测算法[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(20): 201505.
Liu Y J, Yang F B, Hu P. Parallel FPN algorithm based on cascade R-CNN for object detection from UAV aerial images [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(20): 201505.
- [12] 周立君, 刘宇, 白璐, 等. 使用 TensorRT 进行深度学习推理[J]. *应用光学*, 2020, 41(2): 337-341.
Zhou L J, Liu Y, Bai L. Using TensorRT for deep learning and inference applications [J]. *Journal of Applied Optics*, 2020, 41(2): 337-341.
- [13] Harville M, Culbertson B, Sobel I, et al. Practical methods for geometric and photometric correction of tiled projector [C] // 2006 Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshop, June 17-22, 2006, New York, NY, USA. New York: IEEE Press, 2006.
- [14] Zhang J W. C-bézier curves and surfaces [J]. *Graphical Models and Image Processing*, 1999, 61(1): 2-15.
- [15] Rost R J, Licea-Kane B, Ginsburg D, et al. OpenGL shading language [M]. London: Pearson Education, 2009: 106-115.