文章编号：1007-2780(2026)07-0970-11

面向曲面屏的透视变换无畸变3D渲染与显示方法

丁　健，张书赫，曹良才*
（清华大学 精密仪器系，北京 100084）

摘要：针对自发光曲面屏因物理弯曲导致的图像几何畸变问题，本文提出一种基于透视变换的自适应分段曲面屏无畸变3D渲染与显示方法，使用户观看曲面屏上的渲染场景等效于无屏直接观察三维场景。将连续曲面屏近似为多段平面屏的拼接结构，基于透视变换原理与已知视点位置，反转物像关系并利用透视变换矩阵计算各子屏显示图像；采用自适应区域划分策略，通过Adam算法最小化曲线与拟合折线间的二维均方误差，确定最优划分；在拼接边界处设置重叠区Δw并采用线性插值权重函数进行平滑处理，消除接缝失真。Blender 4.0仿真表明，本文方法处理后图像的峰值信噪比(PSNR)达到13.23 dB，相比直接渲染的7.65 dB提升了5.58 dB，超过12 dB的畸变可接受阈值；采用30段(m=30)平面屏拟合曲面，兼顾高PSNR与计算量。本方法可显著降低曲面屏显示畸变，适用于大型户外曲面LED及算力受限的柔性消费电子设备，为裸眼3D技术在曲面显示载体上的应用提供了可行技术路径。

关　键　词：3D渲染；曲面屏；无畸变显示；透视变换；区域划分
中图分类号：TN27　**文献标识码：**A　**doi：**10.37188/CJLCD.2026-0082　**CSTR：**32172.14.CJLCD.2026-0082

Distortion-free 3D rendering and display method using perspective transformation for curved screens

DING Jian, ZHANG Shuhe, CAO Liangcai*

(*Department of Precision Instruments*, *Tsinghua University*, *Beijing* 100084, *China*)

Abstract: To eliminate geometric distortion on self-luminous curved screens caused by physical curvature, this paper proposes an adaptive segmented distortion-free 3D rendering and display method for curved screens based on perspective transformation, enabling viewers to see the rendered scene identically to directly viewing the 3D scene without the screen. The curved screen is approximated as multiple planar segments. Using perspective transformation and the known viewpoint, the object-image relationship is reversed, and the perspective matrix computes images on each segment. Adaptive partitioning minimizes the 2D mean square error between the curve and fitted polyline via the Adam algorithm. Stitching boundaries are smoothed with overlapping regions Δw and linear interpolation. Blender 4.0 simulations show the proposed method achieves a PSNR of 13.23 dB, which is 5.58 dB higher than direct rendering (7.65 dB), exceeding the 12 dB distortion threshold. Using m=30 planar segments balances high PSNR and computational cost. This method significantly reduces distortion on

收稿日期：2026-05-12；**修订日期：**2026-06-12.
基金项目：国家自然科学基金(No. 62441613)
Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 62441613)
*通信联系人，E-mail：clc@tsinghua.edu.cn

curved screens and applies to large outdoor curved LEDs and flexible consumer electronics, offering a feasible path for glasses-free 3D on curved displays.

Key words: 3D rendering; curved screen; distortion-free display; perspective transformation; region partition

1 引　　言

随着信息显示技术与材料科学的发展，人类对于视觉体验的要求不断提升，充满沉浸感的三维空间显示技术受到持续关注。近年来，3D显示技术在消费电子、广告传媒及医疗成像等领域需求激增，技术路线日趋多元[1-3]。虚拟现实(VR)和增强现实(AR)为代表的头戴式显示设备(HMD)虽然能够通过双目视差原理提供强烈的空间深度感[4]，但其大规模普及目前受以下两方面制约：一方面，这类设备通常涉及复杂的光学组件与传感器集成，导致硬件成本较高，长期佩戴易引发“视觉辐辏调节冲突”(Vergence-Accommodation Conflict, VAC)，造成用户的眩晕与视觉疲劳[5-8]。另一方面，头戴式设备的封闭性在物理空间上隔离了用户与现实世界的交互，这种非自然的观看方式在一定程度上限制了其在社交、车载导航及日常碎片化娱乐场景中的应用。

相较之下，裸眼3D显示技术在某些方面具有更强的普适性和推广价值。除了实现机制极为复杂、对算力和制造工艺要求苛刻的光场显示[9-12]，以及使用空间光调制器(SLM)设备实现的全息显示技术[13-14]外，裸眼3D显示还可使用更廉价的硬件渲染3D效果[3]。随着有机发光二极管(OLED)技术的成熟，智能手机、平板电脑以及车载中控屏正经历由平面向折叠屏、柔性曲率屏演进的形态变革[15-16]。这些显示载体在消费市场保有量高，为裸眼3D技术的落地提供了完备且廉价的硬件基础。夏仲文等人利用微纳光子器件极佳的光调控能力实现低串扰、辐辏调节冲突较小的裸眼3D显示[17]。文献[18-19]使用光栅并设计专用算法实现裸眼3D效果。李萌等人使用特殊的像素排列方式[20]实现立体显示效果。因其较低的实现门槛和对现有产业链的良好兼容性，裸眼3D显示正成为当前较具商业前景的技术方向[21-22]。

在实际应用中，多个大型裸眼3D项目验证了折叠屏裸眼3D显示方案的可行性。例如，韩国首尔COEX K-POP SQUARE的超大型立体广告牌于2019年展示的“首尔巨浪”项目，利用透视投影原理在折角屏幕上创造了逼真的立体海浪效果，在全球范围内引发了巨大反响[23-24]。此后，中国成都太古里的“外星飞碟”裸眼3D显示、日本东京新宿站Cross Shinjuku Vision的三花猫形象显示等相继出现。这些案例充分证明，只要采用恰当的渲染算法，常规的大尺寸显示设备也具备呈现高质量裸眼3D视觉效果的能力[25]。更值得注意的是，这些案例中的显示大屏均安装在楼宇拐角位置，采用有一定曲率的折叠屏结构。当屏幕为非平面形态时，观众需处于特定位置才能观察到无畸变的渲染效果。除巨屏广告牌外，折叠屏手机也可作为一种显示载体，其与巨型广告牌形态类似而尺寸大幅缩小，也可以渲染出裸眼3D效果。

然而，随着显示介质从刚性平面向柔性曲面(如环幕、柱面屏、折叠屏手机)扩展，传统3D渲染方法面临新挑战。现有的绝大多数裸眼3D内容生成技术均假设投影面为理想平面，直接利用视错觉或视差原理进行映射。将这类算法直接用于曲面屏时，屏幕曲率会引发明显的透视畸变与拉伸，破坏立体效果，降低沉浸感[26]。如何在曲面设备上高效、低成本地实现无畸变3D显示，已成为裸眼3D领域的关键问题。针对上述挑战，本文提出了一种专用于柱面屏的3D场景渲染与校正方法。该方法实现效果为：将某一场景完全遮挡于曲面屏后，渲染效果等价于撤掉曲面屏直接观察场景，且无屏幕特殊形状带来的畸变。本方法无需升级硬件，仅通过优化渲染实现几何校正。它基于透视变换原理，构建出从3D场景到曲面屏显示的映射模型。本方法可用于大型户外曲面LED，以及算力受限的常规柔性消费电子设备[27]。本文的柔性屏裸眼3D渲染算法可为推动3D技术在智能座舱、现实交互[28]以及元宇宙[29-31]接口等新兴领域的广泛应用提供技术参考。

2 实现方法

将三维场景渲染在曲面屏上，观察者在特定视角下观看曲面屏，视觉效果等效于无曲面屏情况下直接观看三维场景效果。具体思路为：将曲面屏近似为多面平面屏拼接结构（图 1(a)～(b)过程），先实现拼接多平面屏的无畸变渲染，再将多屏渲染画面转移至连续曲面（图 1(b)～(a)过程）。在拼接多屏系统中，当面向特定视点渲染时，需要采用透视变换算法消除畸变。

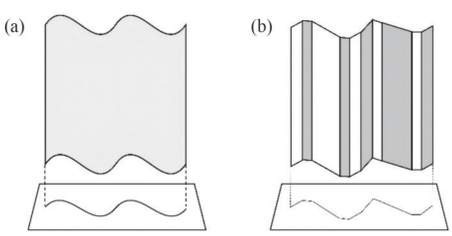


图 1 曲面屏近似多面平面屏拼接。(a)曲面屏；(b)多面拼接屏。

Fig. 1 Curved screen approximated by multi-faceted planar screen splicing. (a) Curved screen; (b) Multi-faceted splicing screen.

2.1 透视变换

如图 2(a)所示，观察者站在虚拟“玻璃窗”P前观察窗外建筑物时，视线与玻璃窗相交，将所有交点连接即可形成透视图。这种以人眼为投影中心的中心投影即为透视投影，“玻璃窗”P为投影平面。

构建如下场景：观察者在“玻璃窗”上使用不透明颜料绘画，若“玻璃窗”后某个位置呈现某种颜色，则用同种颜料涂在窗上对应位置。最终，“玻璃窗”表面会形成一张不透明的图像。若初始时“玻璃窗”与观察者的正视图平面不平行，将“玻璃窗”旋转至正视图平面后可发现，窗上图像并非观察者所观察到的图像。两张图片均为该场景经过透视投影后的结果，只是在不平行的平面上成像，这将导致图像完全不同。在本文研究场景中，屏幕与观察者正视图平面通常不平行，若屏幕直接渲染三维场景，则观察者观察不到理想图像。因此本文首先研究在不平行平面上图像之间的透视变换关系，下文将使用数学模型对透视变换投影过程进行分析。

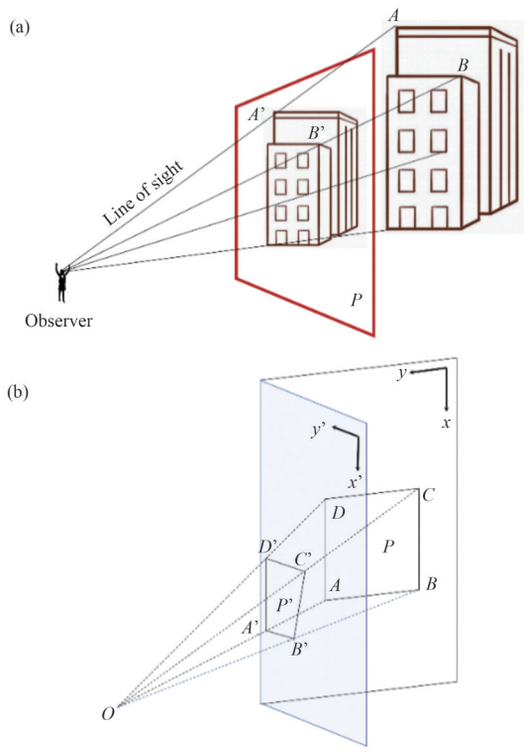


图 2 透视投影。(a)透视投影实际场景；(b)图像透视变换操作。

Fig. 2 Perspective projection. (a) Actual scene of perspective projection; (b) Image perspective transformation operation.

将图 2(a)中透视变换场景简化为图 2(b)。图 2(a)中“玻璃窗”P为物面 P，像面 P'为视点 O 的正视图平面，物面 P 与像面 P'的对应点由视线连接，所有视线汇聚于视点 O。

物面 P 到像面 P'的透视变换实质上为 P 平面上某一点 (x,y) 以视点 O 为基准，投影至像面 P'得到点 (u,v) 的过程。在图 2(b)中，显示屏放置在 P 面，显示图像为 $ABCD$，正视图为 P'，人眼观察到图像为 $A'B'C'D'$。P 屏上 $ABCD$ 透视投影生成 P'屏上 $A'B'C'D'$，对于其中一组对应点 A 与 A'，可建模为图 3。

如图 3 所示，将 P 与 P'屏分别放置在 xyz 坐标系与 $x'y'z'$坐标系中。为简化计算，将屏 P 放置在 x-y 平面内，两边分别与 x、y 轴重合；屏 P'放置在 x'-y'平面内，两边分别与 x'、y'轴重合。P 与 P'屏交线处 x 轴与 x'轴重合，P 屏与 P'屏夹角为 θ，视点 E 设置在 z 轴上，z'轴无使用场景，可忽略。目标为将 P'屏上点 A'坐标 $(u,v,0)$ 表示为其他已知量的组

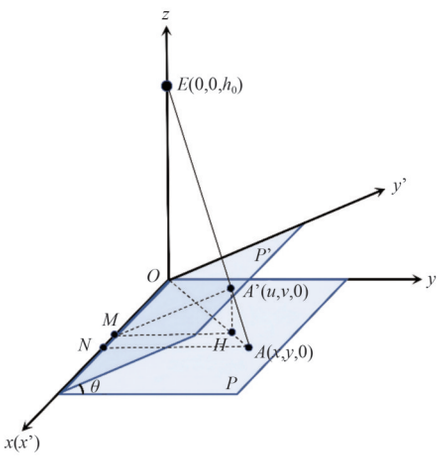


图3　透视变换坐标系建模

Fig. 3　Modeling of perspective transformation coordinate system

合形式。使用相似三角形三边成比例的数学定律进行推导。

由于z轴垂直于P屏,连接OA,则OE垂直OA。过点A'作$A'H$垂直P屏于点H,则点H落在线段OA上。过点H、A分别向x轴作垂线,垂足为M、N,此时有两对直角三角形相似,分别为$\Delta AHA'$与ΔAOE、ΔHMO与ΔANO。根据相似三角形三边成比例定律,可得到如下关系:

$$\frac{A'H}{OE}=\frac{AH}{AO}=\frac{MN}{ON},\frac{OH}{OA}=\frac{OM}{ON}=\frac{MH}{NA},\tag{1}$$

代入坐标值,在P屏所在坐标轴中有:

$$\frac{v\sin(\theta)}{h_0}=\frac{x-u}{x},\frac{u}{x}=\frac{v\cos(\theta)}{y},\tag{2}$$

式(2)化简为:

$$u=\frac{h_0\cos(\theta)}{y\sin(\theta)+h_0\cos(\theta)}x,$$
$$v=\frac{h_0}{y\sin(\theta)+h_0\cos(\theta)}y.\tag{3}$$

目前xyz坐标系为特定坐标系,需将推导条件拓展至任意坐标系。设任意坐标系为XYZ,XYZ经过绕任意轴旋转与平移操作后变为研究坐标系xyz,坐标变换关系为:

$$\begin{bmatrix}x\\y\\z\end{bmatrix}=\boldsymbol{R}\begin{bmatrix}X\\Y\\Z\end{bmatrix}+\boldsymbol{t},\tag{4}$$

其中:$\boldsymbol{R}$为描述坐标轴旋转的旋转矩阵,$\boldsymbol{t}$为描述坐标轴平移的平移向量。将式(4)代入式(3),则式(3)中等式左侧u与v均包含x、y与常数项,形式如式(5)所示:

$$u=\frac{ax+by+c}{gx+hy+1},v=\frac{dx+ey+f}{gx+hy+1}.\tag{5}$$

将A与A'点的坐标对应关系扩展到所有对应点,则公式(5)中x、y对应于$ABCD$图像内的像素坐标,u、v对应于该像素透射变换后在$A'B'C'D'$内的像素坐标,a、b、c、d、e、f、g、h为透视变换参数。为简便计算,将式(5)写为矩阵形式:

$$\begin{bmatrix}u\\v\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}x&y&1&0&0&0&-ux&-uy\\0&0&0&x&y&1&-vx&-vy\end{bmatrix}\begin{bmatrix}a\\b\\c\\d\\e\\f\\g\\h\end{bmatrix}.\tag{6}$$

应用矩阵方程进行图像透视变换,当图像边界为四边形时,需取四边形角点坐标作为已知量。将$ABCD$各角点坐标记为(x_1,y_1)、(x_2,y_2)、(x_3,y_3)、(x_4,y_4),$A'B'C'D'$各角点坐标记为(x_1',y_1')、(x_2',y_2')、(x_3',y_3')、(x_4',y_4'),由此得到式(7):

$$\begin{bmatrix}x_1'\\y_1'\\x_2'\\y_2'\\x_3'\\y_3'\\x_4'\\y_4'\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}x_1&y_1&1&0&0&0&-x_1x_1'&-y_1x_1'\\0&0&0&x_1&y_1&1&-x_1y_1'&-y_1y_1'\\x_2&y_2&1&0&0&0&-x_2x_2'&-y_2x_2'\\0&0&0&x_2&y_2&1&-x_2y_2'&-y_2y_2'\\x_3&y_3&1&0&0&0&-x_3x_3'&-y_3x_3'\\0&0&0&x_3&y_3&1&-x_3y_3'&-y_3y_3'\\x_4&y_4&1&0&0&0&-x_4x_4'&-y_4x_4'\\0&0&0&x_4&y_4&1&-x_4y_4'&-y_4y_4'\end{bmatrix}\begin{bmatrix}a\\b\\c\\d\\e\\f\\g\\h\end{bmatrix},\tag{7}$$

将式(7)简记为：

$$\boldsymbol{b}_{\text{trans}}=\boldsymbol{A}\boldsymbol{h}_{\text{per}}\ , \tag{8}$$

则参数向量$\boldsymbol{h}_{\text{per}}$可通过

$$\boldsymbol{h}_{\text{per}}=\boldsymbol{A}^{-1}\boldsymbol{b}_{\text{trans}}\ , \tag{9}$$

求解得到。此时$\boldsymbol{h}_{\text{per}}=[a,b,c,d,e,f,g,h]^{\mathrm{T}}$包含所有透视参数，参数向量$\boldsymbol{b}_{\text{trans}}$包含透视变换后各角点坐标值，矩阵$\boldsymbol{A}$包含透视变换前后所有角点坐标值。解出透视参数代入式(5)，即可对原$ABCD$图像进行透视变换得到$A'B'C'D'$。若平面P与P'夹角大小、视点位置均不发生变化，则使用完全相同的透视变换向量$\boldsymbol{h}_{\text{per}}$，使$P$上像素坐标$(x_i,y_i)$一一投影到$P'$上对应坐标$(u_i,v_i)$，对应坐标的RGB像素值相同，即可完整生成透视变换后图像。

2.2 透视变换后的双屏拼接

将两块平面屏按一定角度拼接，形成折叠屏。P_1、P_2为屏幕，P'为像面，当像面为视点O的正视图时，观察者实际观察到的画面即为P'。为保证观察图像无畸变，则P'图像已知，反向求解P上图像。可将P_1、P_2作为像面，P'作为物面，物像关系转换，具体表现为式(6)中(x_i,y_i)与(x_i',y_i')互换数值。数值互换后，同一物面P'分别对P_1、P_2求透视变换参数向量$\boldsymbol{h}_{\text{per1}}$、$\boldsymbol{h}_{\text{per2}}$，再将$P'$图像透视变换投影至$P_1$、$P_2$，最终将$P_1$、$P_2$拼接为一张图片，具体操作如图4所示。

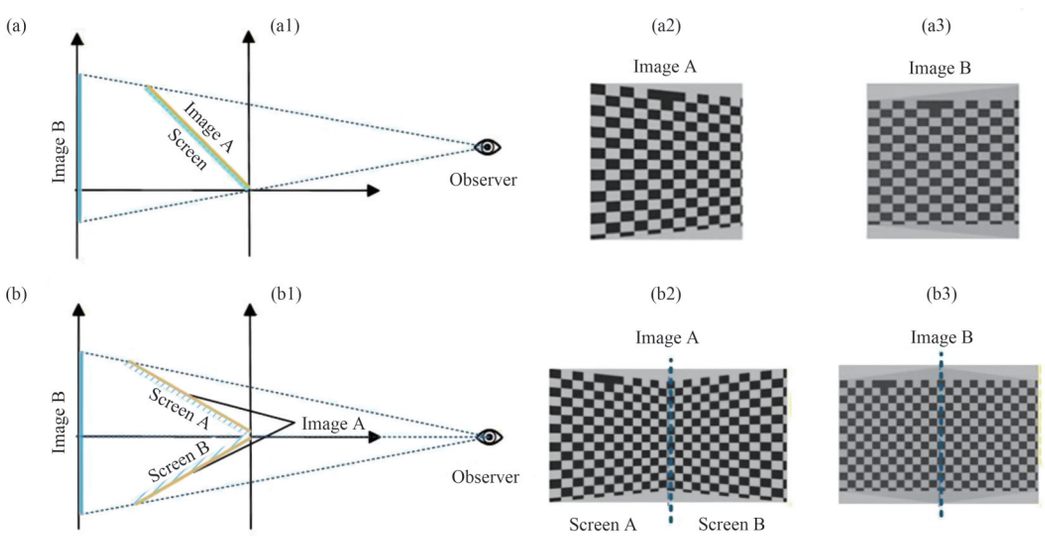


图4 物像关系反转后的透视变换显示效果示例。(a)单屏透视变换：(a1)单屏透视变换示意图；(a2)对应(a1)中Image A所生成的像面P；(a3)观察者视角下显示图像，应为已知物面P'，实际为P透视投影在P'上拼接的结果。(b)多屏透视变换：(b1)拼接双屏透视变换示意图；(b2)对应(b1)中Image A、B所生成的像面P_1、P_2拼接结果；(a3)观察者视角下显示图像，应为已知物面P'，实际为P_1、P_2透视投影在P'上拼接的结果。

Fig. 4 Example of display effect using perspective transformation with reversed object-image relationship. (a) Single-screen perspective transformation: (a1) Schematic diagram of single-screen perspective transformation; (a2) Image of target image plane P corresponding to Screen A in (a1); (a3) Image displayed from the observer's perspective, which should correspond to the known object plane P' and is actually the perspective projection of P onto P'. (b) Multi-screen perspective transformation: (b1) Schematic diagram of spliced dual-screen perspective transformation; (b2) Spliced result of target image planes P_1 and P_2 corresponding to Screen A and B in (b1); (b3) Image displayed from the observer's perspective, which should correspond to the known object plane P' and is actually the spliced perspective projection of P_1 and P_2 onto P'.

2.3 多屏拼接显示

多屏拼接显示的变换逻辑与双平面屏情况类似。设拼接多屏由j个平面屏P_1、…、P_j组成，反转物像关系后将正视图P'处图像向各平面屏P_i上进行透视变换投影，再将变换后图像进行无缝拼接。实际操作中，将拼接多屏在像面P'处所成的像划分为若干四边形区域，各区域的边界为对应平面屏P_i的矩形边框在像面P'上的投影。若求解P_i显

示图像,则对物像关系进行反转,物面P'上各四边形区域透视投影到对应各平面屏P_i上。由于各平面屏P_i边界均为矩形,所以投影后生成一系列矩形区域,将各区域沿高度方向拼接得到最终图像。

针对拼接过程中可能出现的接缝失真问题,本文引入边界平滑处理算法。在相邻拼接图片边界处设置重叠区域Δw,$I_i(x)$为第i张图片距离接缝x处像素值,$I_i'(x)$为平滑后结果,对所有y行采用线性插值方法实现平滑过渡:

$$I_i'(x)=\alpha(x)I_i(x)+[1-\alpha(x)]I_{i+1}(x),\tag{10}$$

其中,$\alpha(x)$为在重叠区域Δw内的线性权重函数。

理论上,拼接多屏可拆分为有限数量平面屏,每块平面屏与像面均存在清晰的透视变换关系,计算过程无误差,最终拼接图像与理想画面误差极小。曲面屏为连续弯曲结构,无法直接采用拼接屏划分方法,可寻找与其形状相近的拼接多屏代替曲面屏进行划分。曲面屏结构可视为底部曲线沿原屏幕高度方向"拉伸"形成的曲面,将曲线近似为折线,对折线进行拉高操作可生成多平面屏拼接屏结构。用该拼接屏结构拟合曲面屏,再沿用拼接屏处理方案,即可得到曲面屏的渲染图像。

3　仿真与渲染效果

Blender是一款免费开源三维图形图像软件,目前由非盈利公益团体Blender Foundation运营。它提供了包括建模、渲染、脚本控制等一系列3D创作工具,本文使用Blender 4.0版本软件进行建模与渲染。在Blender软件中搭建环境,对平面进行多次弯曲操作后得到曲面结构,其附加贴图功能后可模拟为曲面显示屏。在曲面屏前放置摄像机,曲面屏后放置物体,渲染场景布局如图5(a)所示。在摄像机视角中曲面屏将完全遮挡物体,摄像机画面如图5(b)所示。

使用多段折线拟合曲线,需要对研究对象选择合理的数学形式。由于曲线轨迹在平面中可以拐弯甚至局部"折返",不易写成坐标值的单一映射$y=f(x)$,因此可将坐标变量转化为一个"进度"变量t,使曲线上每一点都能写成t的函数。设曲线S总长为L,t参数范围为$[0,1]$,$S(t)$代表从曲线初始端点出发,"行驶"tL长度后到达的坐标点。

使用m个点确定多段折线。为便于初始化及后续运算,设定m个点均在曲线上,且折线两端点与曲线两端点重合,因此每个点在曲线S上均有对应参数t值。在t参数区间取单调递增的节点序列$0<t_1<t_2<\cdots<t_m=1$,折线顶点坐标为曲线S在该参数处的取值$P_k=S(t_k)=(x(t_k),y(t_k))^{\mathrm{T}}$,$k=1,\cdots,m$。此时折线由$(m-1)$条线段构成。

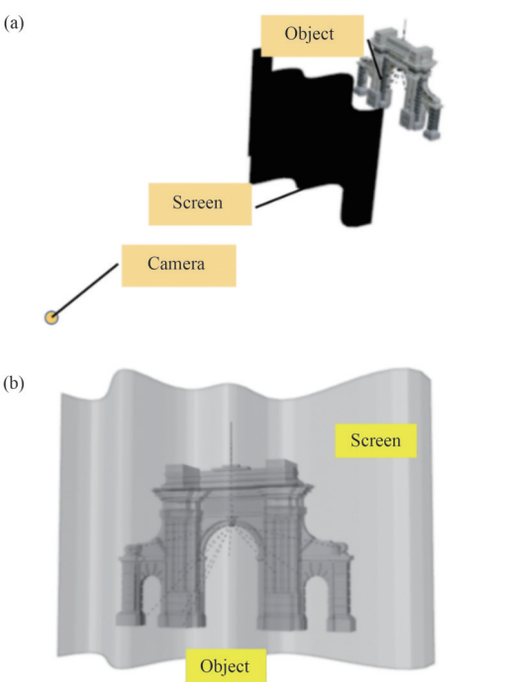


图5　Blender场景。(a)场景中物体、曲面屏与摄像机相对位置;(b)摄像机视角渲染画面(屏幕透明,显示物体)。

Fig. 5　Blender sence. (a) Relative positions of objects, curved screen, and camera in the scene; (b) Camera-view rendering (screen shown transparent, with objects visible).

在计算机图形领域,无显式解析函数的曲线通常以稠密离散点序列的形式给出,在参数t上密集且等距地采样,得到一组离散点。设稠密离散点个数为N,则第i个离散点对应t值为i/N,其坐标$S(t)=(x(i/N),y(i/N))$。由于后续操作需要,将拟合多段折线也离散为N个点。对折线中$(m-1)$条线段进行插值操作,使相邻离散点

对应的t值差值为$1/N$。此时，曲线S与多段折线共享同一组参数t序列，该序列正是前文所述密集且等距采样得到的参数值。

相同t值处曲线点$(x(t),y(t))^{\mathrm{T}}$与对应折线顶点$(x'(t),y'(t))^{\mathrm{T}}$的平方误差$e(t)=x(t)-x'(t)^2+\left[y(t)-y'(t)\right]^2$。对于均匀$N$等分的参数$t$序列，将曲线与拟合折线的二维均方误差作为损失函数(Loss)可表示为：

$$\mathrm{Loss}=\frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N}\left\{\left[x(t_n)-x'(t_n)\right]^2+\left[y(t_n)-y'(t_n)\right]^2\right\}. \tag{11}$$

以m个折线顶点对应的参数t为优化变量，最小化Loss，确定最优参数t即可确定折线顶点位置。本文使用一阶优化梯度下降自适应矩估计算法(Adam)对参数t进行优化。

使用峰值信噪比(PSNR)评估渲染结果的畸变程度。设标准图像为$\boldsymbol{I}_{\mathrm{ref}}$，待评价图像为$\boldsymbol{I}_{\mathrm{test}}$，图像尺寸均为$M\times N$，像素取值为[0, 255]。均方误差(MSE)可定义为：

$$\mathrm{MSE}=\frac{1}{MN}\sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{N}\left[I_{\mathrm{ref}}(i,j)-I_{\mathrm{test}}(i,j)\right]^2. \tag{12}$$

对于8位RGB图像，峰值信噪比(PSNR)定义为：

$$\mathrm{PSNR}=10\lg\left(\frac{255^2}{\mathrm{MSE}}\right)(\mathrm{dB}). \tag{13}$$

PSNR越高，表示待测图像越接近标准图像。对于任一形态的曲面屏，使画面近似无畸变需要PSNR达到可接受的高阈值，对PSNR阈值的设定需要根据具体画面与视觉效果评定。本文考虑m对算法计算量的影响，使用计算时间的比值$T(m)/T(0)$描述相对计算量大小，其中$T(0)$为$m=0$时算法计算时间，$T(m)$为取参数m时对应的算法计算时间，比值$T(m)/T(0)$可直接反映相对计算量大小。

对于图6(a)所示曲线形状，拟合折线过程中

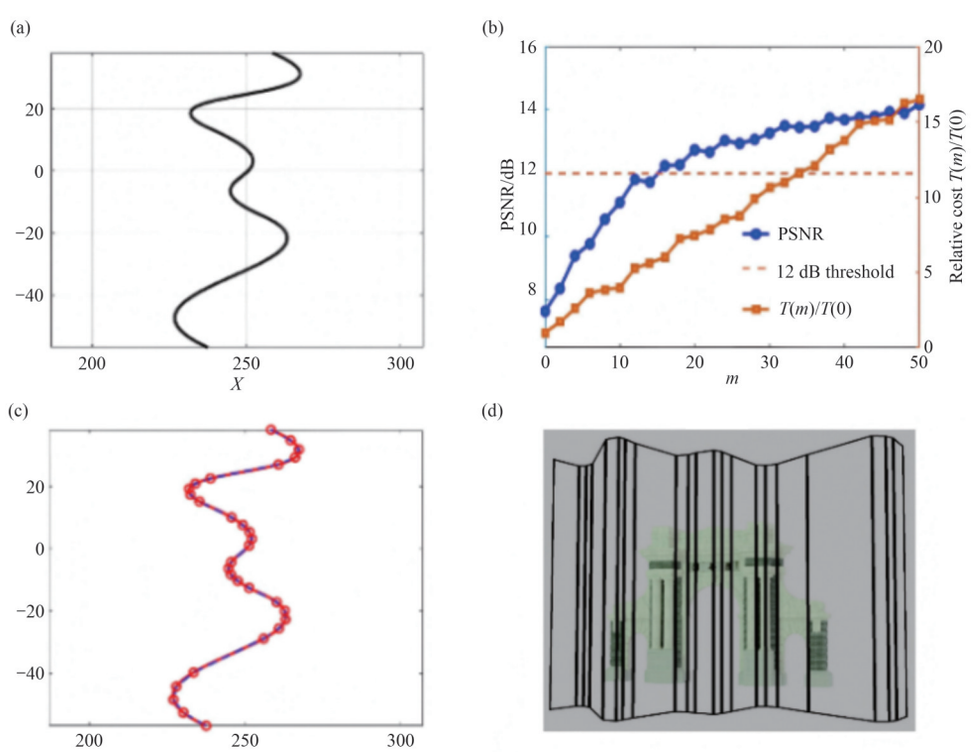


图6 曲线拟合折线后渲染。(a)曲面屏底部曲线；(b)对(a)近似折线过程中m与PSNR、计算量的关系；(c)拟合折线顶点(m=30)；(d)根据折线还原多屏拼接结构，黑色边框为拼接屏轮廓。

Fig. 6 Rendering after fitting the curve with a polyline. (a) Bottom curve of the curved screen; (b) Relationship between m and PSNR/computational cost during the polyline approximation of (a); (c) Vertices of the fitted polyline (m=30); (d) Multi-screen splicing structure reconstructed from the polyline, with black borders representing the outlines of the spliced screens.

m 与 PSNR、算法计算量的关系如图 6(b)所示，对于同一曲面，PSNR 值与 m 值呈正相关关系。m 增加使画面整体畸变程度下降，同时也会增大计算量。本文设定 PSNR 阈值为 12 dB，图 6(c)中设定 $m=30$ 是对高 PSNR 与低计算量的综合考虑结果。图 6(c)划分策略可视化为图 6(d)，曲面屏近似为图 6(d)多屏拼接结构后，再进行 2.3 节的多屏拼接显示操作，即可得出最终结果。

图 7 为整体流程示意图。图 7(a)展示了适用于本文算法的屏幕形状，该形状底部为曲线，左右两侧为垂直于水平面的直边。底边投影至水平面为曲线 S。对曲线 S 进行折线拟合操作，使用自适应矩估计算法(Adam)，优化过程记录为图 7(b)，该曲线图中显示 Loss 随算法迭代次数增加而逐渐降低，最终趋于稳定，此时记录拟合折线顶点位置。折线顶点可视化为图 7(c)，顺次连接端点即可得到拟合折线。该折线沿垂直水平面方向“拉伸”生成多屏拼接结构，该结构为对曲面屏的三维近似，如图 7(d)所示。多屏拼接结构在摄像机视角下的渲染图像如图 7(e)所示，黑色部分为背景，相邻平面屏使用不同颜色标注。此时记录各拼接屏角点在摄像机视角中的像素位置，得到透视变换后的四边形角点坐标。记录屏幕的高度与折线中各线段的长度，即可得到各拼接屏的实际尺寸。根据摄像机与屏幕相对方位可计算出透视变换前的矩形屏幕角点坐标。由以上信息可最终计算出透视变换参数向量 $\boldsymbol{h}_{\mathrm{per}}$，对图 7(e)中所有四边形区域进行逆透视变换即可渲染各拼接屏实际展示画面。对画面进行拼接得到图 7(f)。现有曲面屏的渲染逻辑与平面屏极为相似，在其局部区域内，像素仍遵循行列排布规律，图 7(f)按该排布方式渲染至曲面屏上，观察

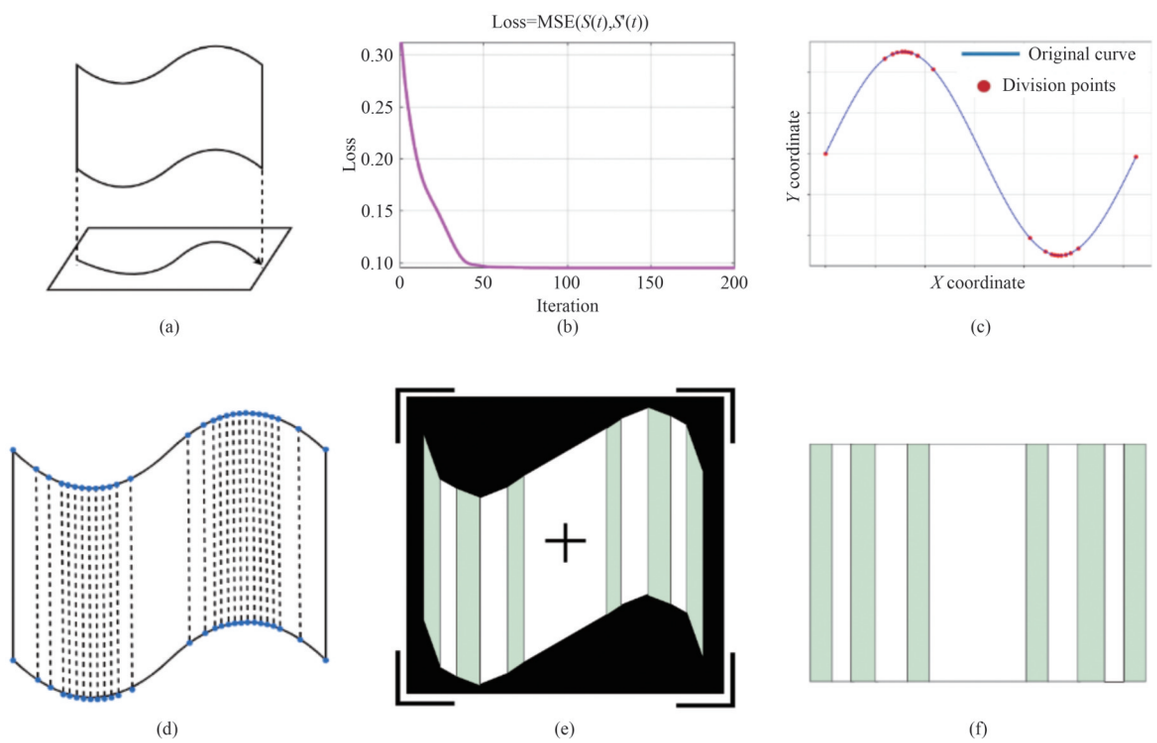


图 7　曲面屏无畸变渲染完整流程。(a)曲面屏与底部曲线；(b)使用 Adam 算法最小化 Loss 函数得到拟合曲线顶点位置；(c)折线顶点位置可视化；(d)折线结构沿高度方向延伸形成拼接多屏；(e)拼接多屏在摄像机中位置，收集各屏角点坐标；(f)对(e)中所有四边形区域进行透视变换，拼接后最终结果。

Fig. 7　Complete workflow for distortion-free rendering on curved screens. (a) Curved screen and bottom curve; (b) Fitted curve vertex positions obtained by minimizing the loss function using the Adam algorithm; (c) Visualization of polyline vertex positions; (d) Polyline structure extended along the height direction to form a spliced multi-screen; (e) Schematic of the spliced multi-screen position in the camera, with corner coordinates of each screen collected; (f) Perspective transformation applied to all quadrilateral regions in (e), yielding the final result after stitching.

者可获得畸变较小的视觉效果。算法全流程中要求曲面形状与摄像机位置、拍摄角度均保持不变,如果发生改变,则需要代入新参数重新运算。

图 5(b)中渲染物体被多屏拼接结构遮挡,移除多屏结构后,无屏幕遮挡状态下渲染场景为理想场景 I_{ideal}。比对以下两种渲染方式的视觉显示效果:(1)直接渲染。将 I_{ideal} 图片长边与曲面屏底部曲线完全贴合,图片高边与曲面屏高边贴合,摄像机渲染图片中屏幕显示部分记为 I_1;(2)透视变换处理后渲染。将曲面屏按 3.1 节策略分割,拟合多屏拼接结构,再对 I_{ideal} 进行透视变换与拼接操作得到图片 I_{seg}。将 I_{seg} 图片按与 I_{ideal} 相同方式与曲面屏贴合,摄像机渲染图片中屏幕显示部分记为 I_2。如图 8 所示,图 8(a,b)为 I_{ideal}、I_{seg},图 8(c,d)中屏幕显示部分为 I_1、I_2。在渲染效果上,I_1 相对于理想图像 I_{ideal} 的 PSNR 值为 7.65 dB,I_2 相对于理想图像 I_{ideal} 的 PSNR 值为 13.23 dB,图 8(d)畸变程度小于图 8(c)。对于特定形状曲面屏 S 与特定位置视点 E,处理后图片 I_{seg} 渲染效果优于原始图片 I_{ideal} 直接渲染效果。

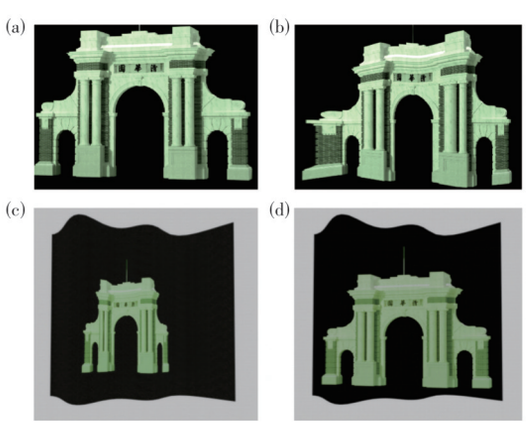


图 8 渲染效果对比。(a)理想场景渲染 I_{ideal};(b)处理后图像 I_{seg};(c)摄像机渲染图像 I_1;(d)摄像机渲染图像 I_2。

Fig. 8 Comparison of rendering effects. (a) Ideal scene rendering I_{ideal}; (b) Processed image I_{seg}; (c) Camera rendered image I_1; (d) Camera rendered image I_2.

需要指出的是,本文当前的仿真验证基于单目视觉模型展开。该模型在处理远距离、大尺寸显示场景(如户外巨型 L 型拼接屏)时具有合理性,因为在此类场景下双目视差对图像畸变感知的影响通常可以忽略。然而,若将本方法应用于小尺寸曲面屏(如折叠屏手机)或近距离观测场景,双目视差将显著影响用户对图像畸变的感知与校正效果。因此,本文方法的适用边界建议为:屏幕曲率半径与观测距离之比小于一定阈值(如<0.1),或屏幕宽度远大于人眼瞳距的场景。对于近眼或小屏应用,需进一步引入双目视觉建模与视差补偿机制。

4 结 论

本文提出一种基于透视变换的自适应分段曲面屏无畸变 3D 渲染与显示方法,为曲面屏区域划分提供了一种思路,并构建了自适应区域划分策略,最终可实现曲面屏无畸变显示。实验结果表明,本文方法处理后图像的峰值信噪比(PSNR)达到 13.23 dB,相比直接渲染的 7.65 dB 提升了 5.58 dB,显著降低了曲面屏显示的几何畸变。

本文的核心目标是实现曲面屏的无畸变映射,重点在于减少肉眼可感知的畸变,如透视变换带来的线条扭曲或拉伸等。实际情况下,畸变主要出现在图像的拼接接缝处,只需保证观察者肉眼无法识别接缝附近的畸变即可,据此可进一步简化算法以提升计算速度。目前,本研究尚未对人眼对直线与折线的分辨能力进行量化分析,且这种分辨能力还会受到背景环境的影响。针对曲面屏无畸变显示的实际应用场景,或可采用更贴合人眼视觉特性的图像质量评价方法。

参 考 文 献:

[1] WANG K, YAN W K. An introduction to immersive display technologies [J]. *IEEE Open Journal on Immersive Displays*, 2024, 1: 79-85.

[2] 张兴,郑成武,李宁,等. 液晶材料与3D显示[J]. 液晶与显示,2012,27(4):448-455.
ZHANG X, ZHENG C W, LI N, *et al*. Liquid crystal materials and 3D display [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2012, 27(4): 448-455. (in Chinese)

[3] LYU P, HUA H. Statically foveated freeform OST-HMD system with wide FOV and high perceived resolution [J].

Light: *Science & Applications*, 2026, 15(1): 233.

[4] SOLOMASHENKO A B, AFANASEVA O L, SHISHOVA M V, *et al*. Industrial applications of AR headsets: a review of the devices and experience [J]. *Light*: *Advanced Manufacturing*, 2025, 6(2): 358-387.

[5] KRAMIDA G. Resolving the vergence-accommodation conflict in head-mounted displays [J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2016, 22(7): 1912-1931.

[6] SAREDAKIS D, SZPAK A, BIRCKHEAD B, *et al*. Factors associated with virtual reality sickness in head-mounted displays: a systematic review and meta-analysis [J]. *Frontiers in Human Neuroscience*, 2020, 14: 96.

[7] KOULIERIS G A, BUI B, BANKS M S, *et al*. Accommodation and comfort in head-mounted displays [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2017, 36(4): 87.

[8] 马凤云,夏振平,程成,等. 近眼显示中光学畸变对视觉诱导晕动症的影响[J]. 液晶与显示,2023,38(9):1215-1223.
MA F Y, XIA Z P, CHENG C, *et al*. Effects of optical distortion on visually induced motion sickness in near-eye display [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2023, 38(9): 1215-1223. (in Chinese)

[9] ZHOU F B, QIAO W, CHEN L S. Fabrication technology for light field reconstruction in glasses-free 3D display [J]. *Journal of Information Display*, 2023, 24(1): 13-29.

[10] LIU Z S, LI D H, DENG H. Integral imaging-based light field display system with optimum voxel space [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2024, 16(1): 5200207.

[11] 隋晓萌,何泽浩,曹良才,等. 基于液晶空间光调制器的计算全息波前编码方法[J]. 液晶与显示,2022,37(5):613-624.
SUI X M, HE Z H, CAO L C, *et al*. Wave-front encoding method of computer-generated holography based on liquid-crystal spatial light modulator [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2022, 37(5): 613-624. (in Chinese)

[12] FAN Z B, CHENG Y F, CHEN Z M, *et al*. Integral imaging near-eye 3D display using a nanoimprint metalens array [J]. *eLight*, 2024, 4(1): 3.

[13] 李会,桑新柱,仲崇力,等. 基于数字微镜器件的高分辨率计算全息显示[J]. 液晶与显示,2022,37(5):625-631.
LI H, SANG X Z, ZHONG C L, *et al*. High-resolution computed holographic display using digital micromirror device [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2022, 37(5): 625-631. (in Chinese)

[14] 郑义微,王迪,李移隆,等. 基于液晶空间光调制器的大视角全息显示技术[J]. 液晶与显示,2021,36(6):789-796.
ZHENG Y W, WANG D, LI Y L, *et al*. Holographic display technology with large viewing angle based on liquid crystal spatial light modulator [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2021, 36(6): 789-796. (in Chinese)

[15] ZHAO Z Y, LIU K, LIU Y W, *et al*. Intrinsically flexible displays: key materials and devices [J]. *National Science Review*, 2022, 9(6): nwac090.

[16] ABBAS A, LUO Y J, AHMAD W, *et al*. Recent progress, challenges, and opportunities in 2D materials for flexible displays [J]. *Nanotoday*, 2024, 56: 102256.

[17] 夏仲文,华鉴瑜,陈林森,等. 基于微纳光子器件的光场裸眼3D显示技术[J]. 液晶与显示,2022,37(5):562-572.
XIA Z W, HUA J Y, CHEN L S, *et al*. Light field glasses-free three-dimensional display technology based on micro-nano photonic devices [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2022, 37(5): 562-572. (in Chinese)

[18] 梁光胜,秦菁,陈世宏,等. 旋转彩色LED显示屏设计与实现[J]. 液晶与显示,2014,29(5):850-855.
LIANG G S, QIN J, CHEN S H, *et al*. Design and implementation of colorful rotating LED display [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2014, 29(5): 850-855. (in Chinese)

[19] 陈瑞改,陶宇虹,谢佳,等. 基于头部追踪的宽视角裸眼3D显示系统[J]. 液晶与显示,2013,28(2):233-237.
CHEN R G, TAO Y H, XIE J, *et al*. Naked 3D display system with wide viewing angle based on head-tracking technology [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2013, 28(2): 233-237. (in Chinese)

[20] 李萌,张超键,刘子洋,等. 钻石排列OLED手机裸眼3D显示[J]. 液晶与显示,2025,40(7):994-1002.

LI M, ZHANG C J, LIU Z Y, *et al*. Glasses-free 3D mobile phone on a diamond-pentile OLED panel [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2025, 40(7): 994-1002. (in Chinese)

[21] LIAO J M, YAO J J, WANG D L, *et al*. Multi-view naked-eye stereoscopic image fusion method research[C]// 2012 International Conference on Wavelet Active Media Technology and Information Processing (ICWAMTIP). Chengdu: IEEE, 2012: 418-421.

[22] LV G J, WANG Q H, WANG J, *et al*. Multi-view 3D display with high brightness based on a parallax barrier [J]. *Chinese Optics Letters*, 2013, 11(12): 121101.

[23] FU L W, ZHOU J N, YUN T S. Research on the expression features of naked-eye 3D effect of LED screen based on optical illusion art [J]. *The International Journal of Internet, Broadcasting and Communication*, 2023, 15(1): 126-139.

[24] ADHAIWELL. World famous naked eye 3D LED advert creative design [EB/OL]. (2023). https://www.mlxled.com/5282-2/? v=7efdfc94655a.

[25] LI Y M, SONG J R, YIP D K. AI-assisted content creation of naked-eye 3D effects on curved LED screen: enhancing artistic expression and creativity [C]. 2024 IEEE International Conference on Multimedia and Expo Workshops (ICMEW). Niagara Falls: IEEE, 2024: 1-5.

[26] GUO J D, DIAO Z H, YAN S F, *et al*. Immersive autostereoscopic display based on curved screen and parallax barrier [J]. *Chinese Optics Letters*, 2021, 19(1): 013301.

[27] CORZO D, TOSTADO-BLÁZQUEZ G, BARAN D. Flexible electronics: status, challenges and opportunities [J]. *Frontiers in Electronics*, 2020, 1: 594003.

[28] 林星雨,邢妍,张汉乐,等. 基于Leap Motion手势识别的悬浮真3D显示实时交互系统[J]. 液晶与显示,2022, 37(5):654-659.
LIN X Y, XING Y, ZHANG H L, *et al*. Real-time floating 3D display interaction system based on gesture recognition by leap motion [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2022, 37(5): 654-659. (in Chinese)

[29] WANG H, NING H S, LIN Y J, *et al*. A survey on the metaverse: the state-of-the-art, technologies, applications, and challenges [J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2023, 10(16): 14671-14688.

[30] 何泽浩,曹良才. 面向沉浸式元宇宙的显示、交互和应用[J]. 科技导报,2023,41(5):6-14.
HE Z H, CAO L C. Display, interactions, and applications of immersive metaverse: progress and outlooks [J]. *Science & Technology Review*, 2023, 41(5): 6-14. (in Chinese)

[31] 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): 202109.
CAO L C, HE Z H, Liu K X, *et al*. Progress and challenges in dynamic holographic 3D display for the metaverse [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(1): 202109. (in Chinese)

作者简介:



曹良才,男,博士,教授,2005年于清华大学获得博士学位,主要从事光学成像与光学显示的研究。E-mail: clc@tsinghua.edu.cn