

文章编号:1007-2780(XXXX)XX-0001-12

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,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 (Loss),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:TP391.41 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, enabling viewers to see the rendered scene as equivalent 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 (Loss) 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 curved screens and applies to large outdoor curved LEDs and flexible consumer electronics, offering a feasible path for glasses-free 3D on curved displays.

收稿日期:XXXX-XX-XX;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

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]与使用空间光调制器(SLM)设备实现的全息显示技术^[13-14]之外,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着从平面向折叠屏、柔性曲率屏演进的形态变革^[15-16]。这些显示载体在现代社会中社会保有量高,为裸眼3D技术的落地提供了现成且廉价的硬件基础。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],梁光盛,陈瑞改等人使用光栅并设计专用算法实现裸眼3D效果^[18, 19],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项目验证了该技术的可行性。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放置在楼宇拐角位置,结构为在拐角处有一定曲率的折叠屏。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,其与巨型广告屏形态类似而尺寸大大缩小,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,渲染效果等价于去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可提供技术参考。

2 实现方法

本文所做工作为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)至(b)过程),先实现拼接多平面屏的无畸变渲染,再将方法扩展至连续曲面(图1(b)至(a)过程)。研究拼接多屏结构对特定视点渲染,需使用透视变换算法实现无畸变显示。

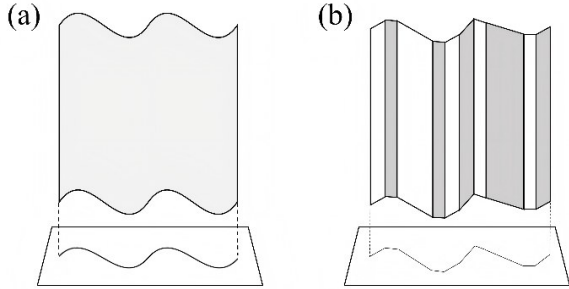


图1 曲面屏近似多面平面屏拼接。(a):曲面屏;(b):多面拼接屏。

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,当观察者站在虚构的“玻璃窗” P 前观察窗外的建筑物时,视线与玻璃窗相交,将所有交点连接起来即可形成透视图。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。

想象这样一个场景:观察者在“玻璃窗”上用不透明颜料作画,看到“玻璃窗”后某个位置是某种颜色,就用同种颜料涂在窗上对应位置。最后,原本的“玻璃窗”上画了一张不透明的图像。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,发现窗上的图像并非原先观察者所观察到的图像。两张图片都是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,导致结果完全不同。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。因此首先研究在不平行平面上图像之间的透视变换关系,下面将使用数学模型对透视变换投影进行分析。

将图2(a)中透视变换场景简化为图2(b)。

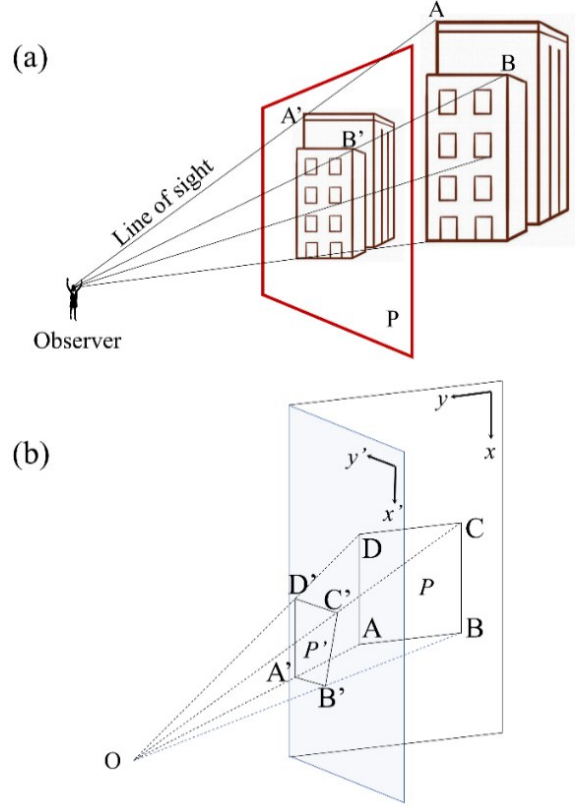


图2 透视投影。(a):透视投影实际场景;(b):图像透视变换操作。

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

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' 上对应点由视线连接,视线汇聚于视点 O 。

由 P 到 P' 面的透视变换实质上为 P 平面上某一点 $P(x, y)$ 以视点 O 为基准,投影至另一平面 P' 上点 $P'(u, v)$ 的过程。在实际场景中,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 $A'B'C'D'$,对于其中一对对应点 A 与 A' ,该过程可建模为图3所示。

如图3,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 设定在 z 轴上, z' 轴无使用场景可忽略。目标为将 P' 屏点 A' 坐标 $(u, v, 0)$ 写成其他已知

记为:

$$U = VH. \quad (7)$$

则矩阵 H 可通过

$$H = V^{-1}U. \quad (8)$$

求解得到。此时 $H = [a, b, c, d, e, f, g, h]^T$ 内含所有透视参数, U, V 均为内含已知坐标值的矩阵, 使用(8)式可求得透视参数。解出透视参数代入(5)式, 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参数 H , 使 P 上像素坐标 (x, y) 一一投影到 P' 上对应坐标 (u, v) , 对应坐标的 RGB 像素值相同, 即

可完整生成透视变换后图片。

2.2 透视变换后应用二屏拼接

将两块平面屏成一定角度拼接, 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' 。要求观察图像无畸变, 则 P' 图像已知, 反过来求 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(6)式中 (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, 再将 P' 图像透视变换投影至 P_1, P_2 , 最终将 P_1, P_2 拼接为一张图片即可。具体操作如图4所示:

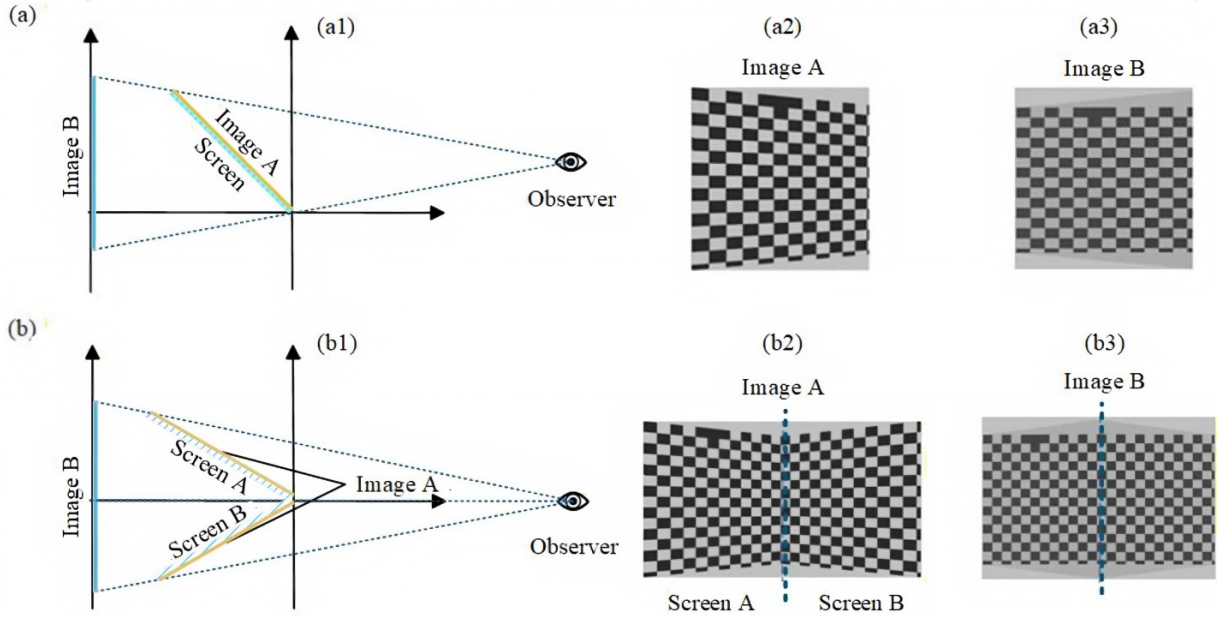


图4 物像关系反转后使用透视变换显示效果示例。(a):单屏透视变换。(a1):单屏透视变换示意图;(a2):(a1)中 Image A, 所求像面 P ; (a3):观察者视角下显示图像, 应为已知物面 P' , 实际为 P 透视投影在 P' 结果;(b):多屏透视变换。(b1):拼接双屏透视变换示意图;(b2):(b1)中 Image A, 所求像面 P_1, P_2 拼接结果;(a3):观察者视角下显示图像, 应为已知物面 P' , 实际为 P_1, P_2 透视投影拼接后在 P' 结果。

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 A in (a1) and the target image plane P ; (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) Image A in (b1) and the spliced result of target image planes P_1 and P_2 ; (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 $P_1, \dots, P_j$ 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,这些区域的边界是各平面屏 P_i 的矩形边界投影在像面 P' 上的结果。要求解 P_i 显示图像,则物像关系反转,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,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,本文引入了边界平滑处理算法。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:

$$I'_i(x) = \alpha(x)I_i(x) + [1 - \alpha(x)]I_{i+1}(x), \quad (9)$$

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,每块平面屏与像面都有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,无法直接使用拼接屏划分方法,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”出曲面,如果将曲线近似为折线,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,即可得到曲面屏上渲染图片。

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屏,在曲面屏前放置摄像机,曲面后放置渲染物体,渲染场景如图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,首先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里可以拐弯、甚至局部“回头”,很难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 ,让曲线上每一点都能写成 t 的

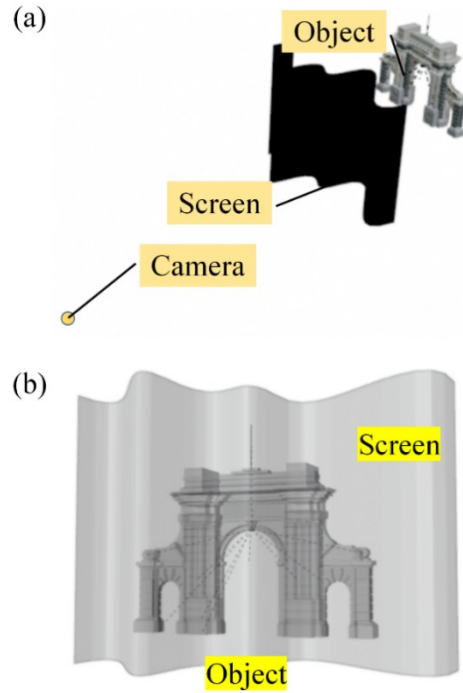


图5 Blender场景

Fig. 5 Blender scene

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。因此每个点均在曲线 S 上有对应 t 值。在 t 参数区间取单调递增的节点序列 $0 < t_1 < t_2 < \dots < t_m = 1$,折线顶点坐标为曲线 S 在该参数处取值 $P_k = S(t_k) = (x(t_k), y(t_k))^T$, $k = 1, \dots, m$ 。此时折线由 $(m-1)$ 条线段构成。

在计算机中,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,使用一组密集且等距的参数 t 采样点代表这些离散点。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,需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 t 值也为 i/N 。此时曲线 S 与多段折线的参数 t 序列完全一致。

相同 t 值处曲线点 $(x(t), y(t))^T$ 与对应折线顶点 $(x'(t), y'(t))^T$ 平方误差 $e(t) = [x(t) - x'(t)]^2 + [y(t) - y'(t)]^2$,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:

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

以 m 个折线顶点对应参数 t 为优化变量,最小化 $Loss$ 损失,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,具体方法参考本文提供代码与说明。

顺次连接折线顶点作出拟合折线结果,如图6所示。图6(c)中划分策略可视化为图6(d),根据此划分策略可渲染图8(d)效果,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 I_{ref} , 待评价图像为 I_{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:

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

对于8位RGB图像,峰值信噪比(PSNR)定义为

$$PSNR = 10 \log_{10} \left(\frac{255^2}{MSE} \right) (dB). \quad (13)$$

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。本文还考虑 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 $m=0$ 时计算时间, $T(m)$ 为 m 参数时算

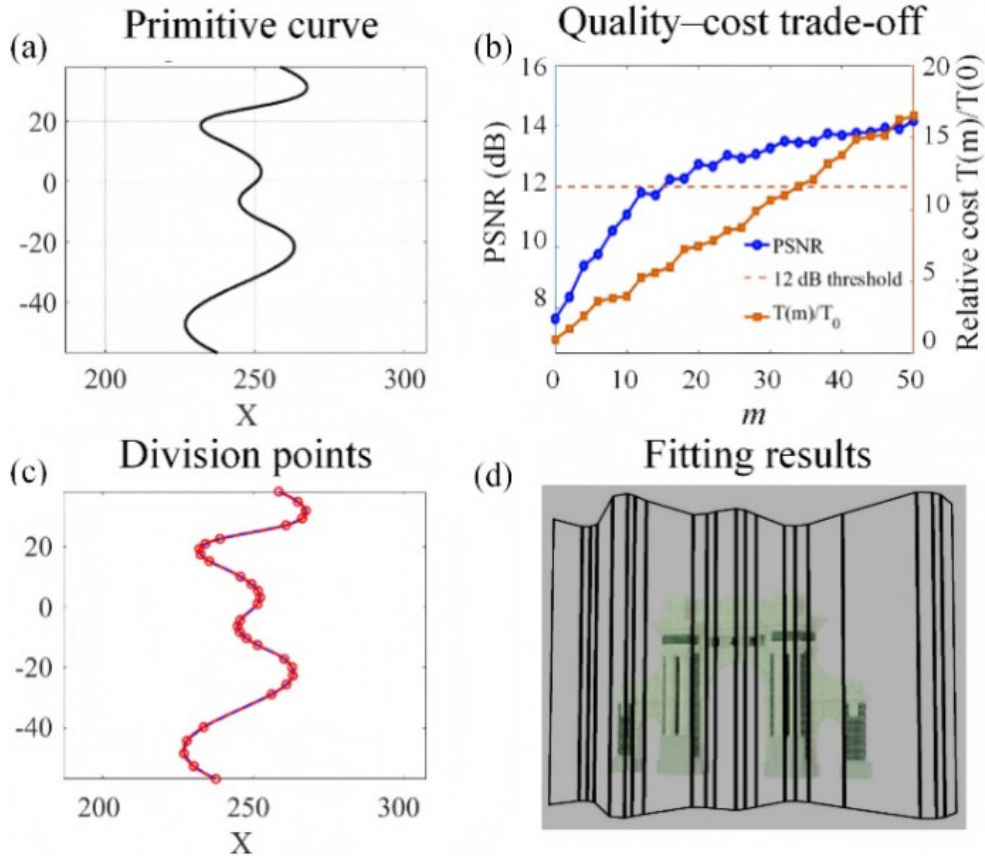


图6 曲线拟合折线后渲染。(a):曲面屏底部曲线;(b):对(a)近似折线过程中 m 与 PSNR、计算量关系;(c):拟合折线顶点($m=30$);(d):根据折线还原多屏拼接结构,黑色边框为拼接屏轮廓。

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.

法计算时间,比值 $T(m)/T(0)$ 大小可直接反映相对计算量大小。

仿真结果如图 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 12dB,图 6(c) 中设定 $m=30$ 是对高 PSNR 与低计算量的综合考虑结果。曲面屏近似为图 6(d) 多屏拼接结构后,再进行 2.3 节多屏拼接显示操作,即可得出最终结果。

图 7 为整体流程示意图。图 7(a) 展示适用于本文算法屏幕形状,该形状为一对垂直于水平面的高与曲线形底边。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)的优化过程记录为图 7(b),图中显示本文定义的 Loss 随算法迭代次数增加逐渐降低,最终趋于稳定,此时记录折线顶点位置。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,该多屏拼接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渲染画面中如图 7(e) 所示,此时记录各拼接屏角点在摄像机视角中的坐标,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四边形角点坐标。由以上信息可最终计算出透视变换参数 H ,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,局部区域像素遵循行列排布,使用图 7(f) 直接渲染,即可得到畸变程度较小的视觉效果。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。

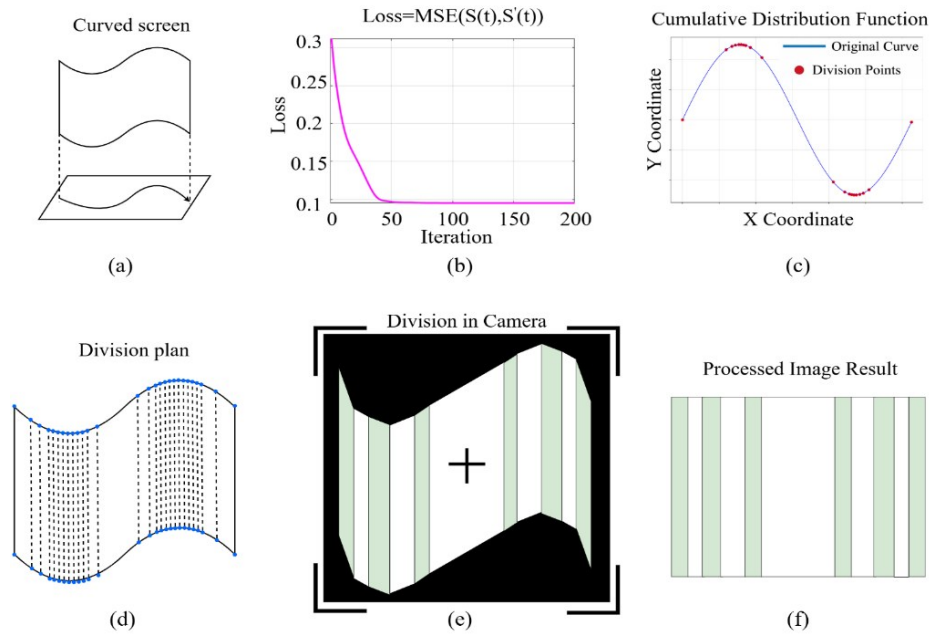


图 7 曲面屏无畸变渲染完整流程。(a): 曲面屏与底部曲线; (b): 使用 Adam 算法最小化 Loss 函数得到拟合曲线顶点位置; (c): 折线顶点位置可视化; (d): 折线结构沿高度方向延伸形成拼接多屏。(e) 拼接多屏在摄像机中位置(示意图), 收集各屏角点坐标; (f): 对(e)中所有四边形区域进行透视变换, 拼接后最终结果。

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.

图5(b)中渲染物体被多屏拼接结构遮挡,将多屏结构去掉,无屏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:方式一为直接渲染,将 I_{ideal} 图片长边与曲面屏底部曲线完全贴合,摄像机渲染图片中屏幕显示部分记为 I_1 ;方式二为透视变换处理后渲染,即将曲面屏按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}

图片长边与曲面屏底部曲线完全贴合,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 对于理想图像 I_{ideal} 的PSNR值为7.65dB, I_2 对于理想图像 I_{ideal} 的PSNR值为13.23dB,(d)畸变程度小于(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。

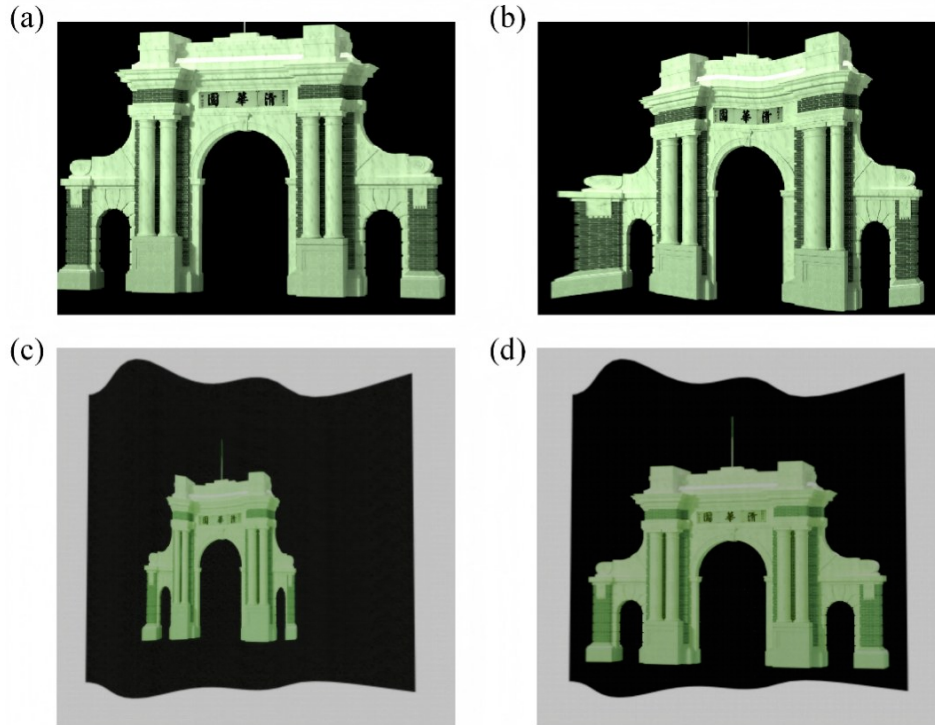


图8 渲染效果对比。(a):理想场景渲染 I_{ideal} ; (b):处理后图片 I_{seg} ; (c):摄像机渲染图像 I_1 ; (d):摄像机渲染图像 I_2 。
Fig.8 Comparison of rendering effects. (a): Ideal scene rendering I_{ideal} ; (b): Processed image I_{seg} ; (c): Camera rendered image I_1 ; (d): Camera rendered image I_2 .

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

本文提出了一种在自发光曲面屏上进行3D渲染的方案,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] Kai Wang and Yan Weikang. 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, (4): 448-455
Xing Zhang, ZhengCheng-wu, Ning Li. *et al.* Liquid Crystal Materials and 3D Display [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2012, (27): 448-455. (in Chinese)
- [3] Lyu and Hua HP. . Statically foveated freeform OST-HMD system with wide FOV and high perceived resolution [J]. *Light—Science & Applications*, 2026, (15)
- [4] SolomashenkoA. B. , Afanaseva O. L. , Shishova M. , *et al.* Industrial applications of AR headsets: a review of the devices and experience[J]. *Light—Advanced Manufacturing*, 2025, (6): 358-387
- [5] KramidaG. . Resolving the Vergence-Accommodation Conflict in Head-Mounted Displays[J]. *Ieee Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2016, (22): 1912-1931
- [6] SaredakisD. , Szpak A. , Birkhead 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)
- [7] KoulirisG. A. , Bui B. , Banks M. S. , *et al.* Accommodation and Comfort in Head-Mounted Displays[J]. *Acm Transactions on Graphics*, 2017, (36)
- [8] 马风云, 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 Feng-yun, XIA Zhen-ping, CHENG Cheng, PENG zi-xiong, Effects of optical distortion on visually induced motion sickness in near-eye display [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2023 (38) 1215
- [9] ZhouF. B. , Qiao W. and Chen L. S. Fabrication technology for light field reconstruction in glasses-free 3D display [J]. *Journal of Information Display*, 2023, (24): 13-29
- [10] LiuZ. S. , Li D. H. and Deng H. Integral Imaging-Based Light Field Display System With Optimum Voxel Space [J]. *Ieee Photonics Journal*, 2024, (16)
- [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.
SuiXiao-meng, HeZe-hao, Liang-cai Cao *et al.* Holographic display technology with large viewing angle based on liquid crystal spatial light modulator[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2022, (37): 613-624. (in Chinese)
- [12] FanZ. B. , Cheng Y. F. , Chen Z. M. , *et al.* Integral imaging near-eye 3D display using a nanoimprint metalens array[J]. *Elight*, 2024, (4)
- [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.
Hui Li, SangXin-zhu, Chong-li Zhong *et al.* High-resolution computed holographic display using digital micromirror device[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2022, (37): 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.
ZhengYi-wei, Di Wang, LiYi-long, *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): 789-796. (in

Chinese)

- [15] ZhaoZ. Y., Liu K., Liu Y. W., *et al.* Intrinsically flexible displays: key materials and devices[J]. *National Science Review*, 2022, (9)
- [16] AbbasAumber, Luo Yingjie, WaqasAhmad, *et al.* Recent progress, challenges, and opportunities in 2D materials for flexible displays[J]. *Nano Today*, 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.
XiaZhong-wen, HuaJian-yu, Lin-sen Chen *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): 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
LiangGuang-sheng, QinQing, Shi-hong Chen *et al.* Design and implementation of colorful rotating LED display[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2014, (29): 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
ChenRui-gai, TaoYu-hong, Jia Xie *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): 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.
Meng LI, ZhangChao-jian, Zi-yang Liu *et al.* Glasses-free 3D mobile phone on a diamond-pentile OLED panel[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2025, (40): 994-1002. (in Chinese)
- [21] LiaoJian-Ming, Yao Jian-Jun, Wang Da-Li, *et al.* (2012). Multi-view naked-eye stereoscopic image fusion method research[C]. 2012 International Conference on Wavelet Active Media Technology and Information Processing (ICWAMTIP), IEEE
- [22] LvG. 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)
- [23] Fu Linwei, Jiani Zhou and Yun Tae Soo. Research on the expression features of naked-eye 3d effect of led screen based on optical illusion art[J]. *International Journal of Internet, Broadcasting and Communication*, 2023, (15): 126-139
- [24] Adhaiwell (2023). "World famous naked eye 3d led advert creative design." [OL]. *from* <https://www.mlxled.com/5282-2/?v=7efdfc94655a>
- [25] LiY. M., Song J. R. and Yip D. K. AI-Assisted Content Creation of Naked-eye 3D Effects on Curved LED Screen: Enhancing Artistic Expression and Creativity[J]. 2024 *Ieee International Conference on Multimedia and Expo Workshops, Icmew 2024*, 2024
- [26] GuoJ. 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)
- [27] CorzoDaniel, Tostado-BlázquezGuillermo, BaranDerya, electronicsFlexible: 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.
LinXing-yu, Yan Xing, Han-le Zhan *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): 654-659. (in Chinese)
- [29] Hang Wang, NingHuan-sheng, LinYu-jia, *et al.* A Survey on the Metaverse: The State-of-the-Art, Technologies, Applications, and Challenges[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2023, (10): 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.
Ze-hao He and Liang-cai Cao. Display, Interaction, and Applications for Immersive Metaverse [J]. *Science &*

Technology Review, 2023, (41): 6-14.

- [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(特邀)[J]. 红外与激光工程,2022,51(1):259-273

HeZe-hao, CaoLiang-cai, LiuKe-xuan, *et al.* Progress and challenges in dynamic holographic 3D display for the metaverse (Invited)[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, (51): 20210935-20210935.

作者简介:



丁 健,男,清华大学2023届本科生,学习三维显示技术的实现原理与原型验证。E-mail: j-ding23@mails. tsinghua. edu. cn



曹良才,男,博士,教授,博士生导师,主要从事光学成像与光学显示的研究。E-mail: clc@tsinghua. edu. cn