

研究论文

扩展现实研究关键技术及发展趋势

范丽亚^{1,2}, 王梅¹, 马介渊³

摘要 综述了扩展现实(XR)研究关键技术的进展。硬件层面,微显示技术取得关键性突破,XR设备视觉体验指标显著提升,多模态智能交互极大拓展了用户与XR环境交互的维度与精准度。软件方面,XR操作系统开源化竞争加剧,行业生态向开放、多元方向加速演进。内容领域,多元化的文旅大空间项目为XR内容创作生态注入强大活力。但是,也发现核心软件与内容创作,以及行业应用的深度融合过程中,存在着技术标准不统一、兼容性欠佳等瓶颈问题。基于此,提出应加大对芯片、显示技术等关键领域的研发投入,丰富内容创作生态,深化和拓展行业应用场景,强化产业链上下游协作,并完善相关标准体系的建议。XR研究正朝着全产业链协同发展的方向迈进,有望构建技术先进、产品丰富、服务优质、应用广泛的高质量产业发展格局。

关键词 扩展现实;虚拟现实;人工智能;交互方式

2024年,扩展现实(extended reality, XR)研究呈现全方位发展态势。硬件侧,显示技术取得显著性突破^[1],设备推陈出新,人工智能(artificial intelligence, AI)+增强现实(augmented reality, AR)眼镜带来多模态智能交互体验与交互方式的革新^[2]。软件侧,XR操作系统开源化竞争推动行业生态朝着更开放、多元的方向发展^[3]。内容侧,多元化大空间文旅项目的兴起为XR内容创作生态发展注入新动力^[4-6]。本文选取2024年XR产业相关代表性研究进展,对部分关键技术和未来发展趋势进行分析和展望。

1 硬件侧

2024年,XR硬件领域发展迅猛,在显示技术、AI融合及交互方式等方面取得突破性进展,有力推动行业迈向成熟实用阶段。

1.1 单色 Micro LED 技术升级 AR 眼镜体验

自2012年索尼公司推出微发光二极管显示(Micro LED)芯片,众多机构纷纷投入该技术的研发及应用探索。Micro LED技术有效规避了液晶自身不发光、有机发光二极管(OLED)寿命短等传统显示缺陷,同时具备高发光效率、高稳定性、低功耗等显著优势,被视作最具潜力的下一代新型显示与发光器件之一^[7]。近年来,单色 Micro LED已成为AR眼镜主流的微显示方案,2023年就有珠海星纪魅族信息技术有限公司的魅族MYVU标准版AR眼镜、深圳影目科技有限公司的INMO Go AR眼镜、杭州李未可科技有限公司的李未可Meta Lens S3 AR眼镜等产品

1. 西安交通大学城市学院计算机学院, 西安 710018

2. 物联网智能感知交互平台陕西省高校工程研究中心, 西安 710018

3. 西安高新技术产业开发区创业园发展中心, 西安 710077

收稿日期: 2024-12-30; 修回日期: 2025-03-07

基金项目: 陕西省科技计划项目(2023-YBGY-148); 陕西省社会科学基金项目(2022M007); 西安交通大学城市学院校级潜力培育项目(2024PY04); 陕西高校青年创新团队项目; 西安交通大学城市学院创新团队项目

作者简介: 范丽亚, 教授, 研究方向为VR/AR技术及产业, 电子邮箱: 453830959@qq.com

引用格式: 范丽亚, 王梅, 马介渊. 扩展现实研究关键技术及发展趋势[J]. 科技导报, 2025, 43(17): 107-121; doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2025.01.00007

应用。其中, MYVU 搭载了一颗 0.3 m^3 的单绿色 Micro LED, 其峰值亮度可达 2000 nits, 配备的 1.9 mm 单层光波导树脂镜片, 透光率超过 90%, 且整机重量仅为 43 g。

2024 年, 单色 Micro LED 技术在体积、重量、功耗及亮度等关键性能指标上取得了新的突破。上海显耀显示科技有限公司(JBD)推出 Micro LED 单色光引擎“蜂鸟 Mini II”(图 1)。其体积缩至 0.15 m^3 , 重量仅 0.3 g, 与“蜂鸟 Mini I”相比, 体积和重量均减半, 可轻松集成至镜腿部位, 充分满足智能眼镜在重量控制与外观设计方面的严苛标准, 助力 AR 眼镜将重量降低至 35 g, 极大提升了佩戴舒适度。显示性能方面, “蜂鸟 Mini II”可输出高达 8 lm 的高光通量, 信息提示类场景下典型功耗仅 60 mW, 有力保障了设备全天候使用的长续航需求。搭配光波导后, 入眼亮度接近 8000 nits, 无论在室内常规环境, 还是户外强光甚至极端环境中, 均可呈现出高亮、清晰的显示效果。此外, “蜂鸟 Mini II”具备 8 bit 色深, 支持 256 级灰阶, 能够提供极为细腻的纯色显示效果。这些显著优势打破了传统光引擎对 AR 眼镜设计的束缚, 为产品的个性化设计、轻量化发展以及人机交互体验的优化开辟了广阔空间^[8]。从整体进展来看, 单色 Micro LED 技术正朝着极致轻薄、高亮度、低功耗方向不断演进, 持续提升 AR 眼镜的使用体验。



图 1 2024 年 JBD 推出的 Micro LED 单色光引擎蜂鸟 Mini II
(图片来源: JBD 官网)

1.2 单片全彩 Micro LED 技术新突破

Micro LED 芯片从单色向单片全彩升级, 是行业发展的必然趋势, 但技术成熟度、工艺复杂性及量产难度成为横亘在前的挑战, 也吸引各大芯片厂商集中力量攻坚。当前, 除已实现量产出货的棱镜合色方案外, 单片全彩 Micro LED 技术方案还涵盖量子点、三

色堆叠、单片外延等不同技术路径。2024 年, 多个科研团队及企业不同技术路径探索上取得显著效果。

棱镜合色方案是将红、绿、蓝单色微显示面板分别附着于 3 个不同面, 通过光学合色实现全彩显示效果^[9]。2024 年 9 月, JBD 基于 RGB 3 色面板合光方案, 推出“蜂鸟 I”彩色光学模组, 并发布业内首个光波导画质矫正方案 ARTCs。该方案运用 One-shot 系统级均匀性补偿计算、近眼光波导显示画质算法等技术, 有效提升亮度均匀性与色彩准确性, 入眼亮度超 6000 nits, 显著减轻彩虹效应, 突破 AR 光波导方案普遍 1500 nits 的亮度水平, 大幅降低环境光对 AR 眼镜显示效果的干扰, 实现室内外全场景应用(图 2)。同时, “蜂鸟 I”典型功耗降至 150 mW, 尺寸缩小至 0.4 m^3 , 增强了 AR 眼镜作为日常穿戴设备的适用性。



(a) 上一代彩色光学模组



(b) “蜂鸟 I”彩色光学模组

图 2 JBD 上一代与 2024 年全新彩色光学模组对比效果
(图片来源: 网易号)

量子点全彩 Micro LED 技术方面, 镭昱光电、鸿石智能、思坦科技等企业取得突破。镭昱光电科技(苏州)有限公司通过氮化镓(GaN)与量子点材料及工艺优化, 发布量产级 PowerMatch 1 系列单片全彩 Micro LED 微显示屏(图 3), 在低功耗下实现亮度大幅提升, 峰值全彩亮度达 25 万 nits, 像素密度 6350 ppi, 支持四线串行外设接口(QSPI)和移动行业处理器接

口(MIPI),为全彩 Micro LED 领域重要进展^[10]。思坦科技也推出 0.2 英寸单片全彩 Micro LED 微显示屏,亮度突破 10 万 nits。



图3 2024年镭昱光电采用量子点工艺研发的PowerMatch 1系列单片全彩 Micro LED 微显示屏
(图片来源: Raysolve 官网)

诺视科技基于晶圆级垂直堆叠平台(WLVSP),研发出量产级单片全彩 XGA Micro LED 芯片,峰值亮度超 50 万 nits^[11]。Lumileds 公司在氮化镓(InGaN)基 Micro LED 技术路线上,成功在单一 InGaN 外延堆栈中实现红、绿、蓝 3 色光发射,有望推动 AR 眼镜应用的紧凑型全彩显示器发展^[12]。名古屋大学通过倾斜 InGaN 层并将晶圆切割成不同方向,减少效率衰减,改变晶体特性,提升了 LED 高功率下的效率,为制造更高效、高亮度 Micro LED 显示屏开辟创新路径^[13-14]。整体而言, Micro LED 显示屏正加速朝着超高亮度、高环境对比度、高分辨率及小体积方向发展,以更好适配阵列、衍射光波导需求,小型化、轻量化、智能化、立体化、高画质及低功耗已成为其核心迭代方向。

1.3 搭载 4K Micro OLED 显示屏成为 XR 头显新趋势

微型有机发光二极管(Micro OLED)显示凭借高分辨率、快速响应速度以及低功耗等特性,在 XR 领域备受青睐。2024 年,搭载 4K Micro OLED 显示屏成为 XR 头显领域的全新发展趋势。

国内,创维数字股份有限公司与深圳纳德光学有限公司积极布局。创维数字发布的 MR Pancake 2 一体机(图 4(a)),选用京东方 1.35 英寸 Micro OLED 屏,具备单眼 4K、双眼 8K(3552×3840×2)的高分辨率,并支持双目彩色透视功能^[15]。其采用外部电源分

体式设计,优化了整体重量分布与散热性能,整机重量约 230 g,确保佩戴舒适。纳德光学 GOOVIS 推出的 XR 头显(图 4(b)),运用京东方与视延科技联合研发的 0.9 英寸 Micro OLED 屏幕,实现 3840×3840×2 超高分辨率,像素密度高达 6020 ppi,光学畸变小于 1%,显示效果极为清晰、细腻^[16]。



(a) 创维MR Pancake 2一体机



(b) 纳德光学GOOVIS XR头显

图4 2024年国内企业发布的 4K Micro OLED XR 头显
(图片来源:今日头条、和讯科技)

国外,索尼公司于 2024 年 12 月推出具备空间内容创作功能的混合现实(MR)头显,搭载高通骁龙 XR2+Gen2 芯片,配备 2 块 1.3 英寸 Micro OLED 显示屏,实现单眼 4K、双眼 8K 分辨率,还配备左右手异形设计的指点控制器以及造型独特的戒指控制器(图 5(a))。用户佩戴头显时,可同步使用控制器、键盘等输入设备对 3D 模型进行编辑与塑造(图 5(b)),为用户带来沉浸式视觉创作体验与高效创作效率。设备还具备“视频透视”功能,允许用户在虚拟与现实场景间自由切换^[17]。

综合来看,这些搭载 4K Micro OLED 的 XR 头显,以高分辨率和高像素密度为用户提供清晰视觉体验,不同产品在显示精细度、功能体验、佩戴舒适度等方面各有优势,共同推动 XR 头显向高端化发展。

1.4 AI+AR 眼镜成新风向

在 AR 眼镜发展历程中,关键技术突破驱动着产



图5 2024年索尼公司推出的MR头显
(图片来源:今日头条)

品体验革新。2024年,众多品牌厂商敏锐捕捉到AI+AR的发展机遇,积极布局该领域,在追求轻量化、舒适性的同时,深度融合AI技术,为用户打造个性化、

智能化的多模态交互体验。

国内方面,珠海莫界科技有限公司率先推出极致轻量型全彩AI+AR眼镜(图6(a)),运用Micro LED技术与首创的树脂衍射光波导技术全新超薄架构,实现全彩光学显示,整机重量约50g,入眼亮度1500 nits,画面清晰纯净^[18]。该产品作为首款创新性搭载AI交互系统的AR眼镜,大幅提高了用户获取信息的效率,引领行业发展方向。随后,雷鸟创新技术(深圳)有限公司发布消费级AI+AR眼镜X3 Pro,集成手势交互、眼动追踪功能以及AI大模型能力,整机重量60g,续航较前代提升近半,入眼显示亮度翻倍,兼具高清晰度与高亮度,适配现实场景使用。Rokid与暴龙科技有限公司联名推出新一代AI+AR眼镜Rokid Glasses(图6(b))^[19]。谷东科技有限公司发布Star1和Star1S 2款AI+AR眼镜,分别适用于办公和娱乐场景^[20]。深圳影目科技有限公司推出采用全彩Micro OLED+阵列光波导方案的INMO AIR3(图6(c)),分辨率、视场角、刷新率等关键性能较上代产品大幅提升^[21]。



图6 2024年国内企业发布的AI+AR眼镜
(图片来源:VR陀螺网站)

国外,美国社交媒体公司Snap发布集成OpenAI多模态大模型的第5代Spectacles AR眼镜(图7(a))。该眼镜采用Micro LED+光波导方案,通过搭载的

Snap OS系统,用户能以语音、手势切换主菜单、控制AR特效(图7(b)),还可以基于AI实现精准的语音指令响应与多人交互体验(图7(c))^[22]。



图7 2024年国外Snap公司发布的AI+AR眼镜
(图片来源: The Verge; Snap官网)

Meta 公司推出 AI+AR 眼镜 Meta Orion。它采用 Micro LED+光波导分体式无线设计,由 98 g 的 Orion 眼镜、独立计算单元 Compute Puck(需在 15 英尺内)和肌电图(EMG)腕带构成(图 8(a))。Compute Puck 提供算力并传输画面,EMG 腕带通过感知手腕

肌肉活动追踪手指动作,结合眼动交互实现精准操作。Orion 视场角 70°,支持眼动、头动、语音及手势交互,内置情境 AI 能感知环境、预测需求。用户可打开多任务窗口(图 8(b))、借助 Meta AI 识别物体(图 8(c)),还能与其他用户共享 AR 空间互动(图 8(d))^[23]。



图 8 2024 年国外 Meta 公司发布的 AI+AR 眼镜
(图片来源: The Verge 网站; Meta 产品发布会)

国内外以上 AI+AR 眼镜产品,在重量、显示性能、AI 及交互功能、续航等方面各具优势,参数对比如表 1 所示。在重量方面,珠海莫界科技的产品以及 Meta Orion 的眼镜部分重量较轻,佩戴舒适度较高。显示性能上,影目科技 INMO AIR 3 分辨率高,在视场角与分辨率的平衡上表现出色,且价格亲民。AI 及交互功能层面,各产品亮点各异,雷鸟创新 X3 Pro 具备手势交互与眼动追踪功能;Snap 第 5 代 Spectacles

集成 OpenAI 大模型,在多人交互和手部追踪体验上表现卓越;Meta Orion 视场角达 70°,支持多种交互方式,且拥有情境人工智能。续航能力方面,雷鸟创新 X3 Pro、谷东科技 Star1S 和 Meta Orion 表现较好,而 Snap 第五代 Spectacles 续航较短。这些产品展现出 AR 智能眼镜正朝着高分辨率、全彩显示、自然交互等方向发展,功能持续拓展,应用场景日益丰富。

表 1 2024 年国内外 AI+AR 眼镜性能参数对比

产品名称	分辨率/像素	视场角/(°)	入眼亮度/nits	重量/g	续航时间/min	售价/元
莫界AI+AR眼镜	—	—	1500	50	—	—
雷鸟创新X3 Pro	—	—	2500	60	较前代提升近一半	—
谷东科技Star1S	640×400	30	>700	90	支持一整天佩戴	—
影目INMO AIR3	1920×1080	36	—	—	—	4999
Spectales AR 眼镜	—	46	—	226	45	不销售,订阅价每月约719
Meta Orion	—	70	—	眼镜部分98	120	不销售,成本价约7万

注:数据根据各大官网数据整理。

1.5 XR 设备交互方式革新

2024 年,XR 设备交互方式迎来新一轮变革,多

款设备引入可穿戴智能指环或腕带交互。

1 月,北京凌宇智控科技有限公司(NOLO)发布

MR 头显 NOLO SONIC 2 Pro, 搭配业内首款量产 XR 交互指环 NOLO Air Ring(图 9(a))。该指环轻巧便携、操控精准, 操作精度达 0.5°, 触摸板识别准确率 99%, 重 5 g, 支持多种手势识别与行车 XR 交互, 正式版还将通过姿态算法识别更多手势^[24]。10 月, 莲偶科技推出适配虚拟现实(virtual reality, VR)和 AR 眼镜的 L-Ring 2(图 9(b)), 搭载先进算法与 AI 芯片, 无需摄像头与高算力图形支撑, 能精准识别超 80 种复杂手势, 具备多项商务功能。11 月, 影目科技公司 INMO AIR 3 配备新空间交互戒指, 用户可用自

然手势操控应用, 提升便捷性与私密性。12 月, 索尼公司推出具备空间内容创作功能的 MR 头显, 配备独特造型的戒指控制器。同月, Meta 公司的 AR 眼镜 Orion 创新性配备编织材质的肌电图(EMG)腕带(图 9(c))。其内侧传感器检测肌电信息转化为电信号, 实现如食指与中指捏合等多种手势交互。腕带内置惯性测量单元(IMU), 可通过手部移动操控虚拟物体、滑屏, 与眼镜摄像头的计算机视觉手势捕捉协同, 保障交互稳定性^[23]。Orion 腕带彰显 AR 智能设备小型化潜力, 开创更自然的 AR 交互方式。



图 9 2024 年国内外企业发布的 XR 交互设备
(图片来源: 搜狐网; The Verge 网站)

从行业整体来看, 未来 XR 设备交互将朝着智能、自然、直观方向发展。基于 AI 的语音、手势、眼动、触摸等多模态智能融合交互, 配合智能手表、手环、神经腕带、交互戒指等可穿戴设备, 将大幅减少用户学习成本, 让交互过程更加贴合人类自然行为习惯, 实现自然、流畅、直观的交互体验, 进一步提升 XR 设备的使用感受与应用价值。

2 软件侧

2.1 XR 操作系统进入开源化竞争

2024 年, Meta 宣布开放 Horizon OS, 谷歌推出专为 XR 设备打造的 Android XR 操作系统, 双方携手头显制造商, 拉开 XR 操作系统开源化竞争序幕。

4 月 23 日, Meta 开放 Quest 操作系统 Meta Horizon OS, 并与华硕、联想等公司达成合作, 后续将推出基于该系统的 MR 头显产品。12 月, Meta Horizon OS 更新, 优化键盘追踪、即时放置面板等功能, 助力开发者高效构建、营销应用, 提升用户体验。更新后的

Tracked Keyboard 应用程序编程接口(API), 借助通用键盘检测模型, 可识别用户周边几乎所有键盘(图 10(a)), 并检测手靠近键盘的动作(图 10(b)), 为开发者拓展创意空间, 如在 VR 中围绕键盘绘制 Passthrough 窗口, 或在 MR 中优化键盘 UI 设计^[25]。

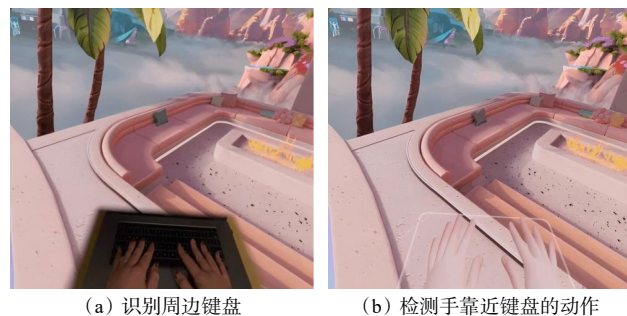


图 10 2024 年 Meta Horizon OS 更新功能
(图片来源: Meta 网站)

即时放置(instant placement, 即 raycasting)功能, 作为无需场景模型的基础场景理解机制, 借助先进空间分析算法, 使开发者能绕过系统常规“空间设置”流程, 在混合现实场景高效精准放置面板(图 11(a))等

对象。该功能已集成至 MR 实用工具包(MRUK), 为用户提供便捷操作体验。MRUK 创新引入可破坏网格功能, 开发者借此能构建复杂网格结构(图 11(b)), 灵活隐藏或移除应用内对象与内容(图 11(c)), 极大拓展 MR 游戏玩法设计空间, 可实现探寻隐藏宝藏、开启神秘门等趣味玩法。

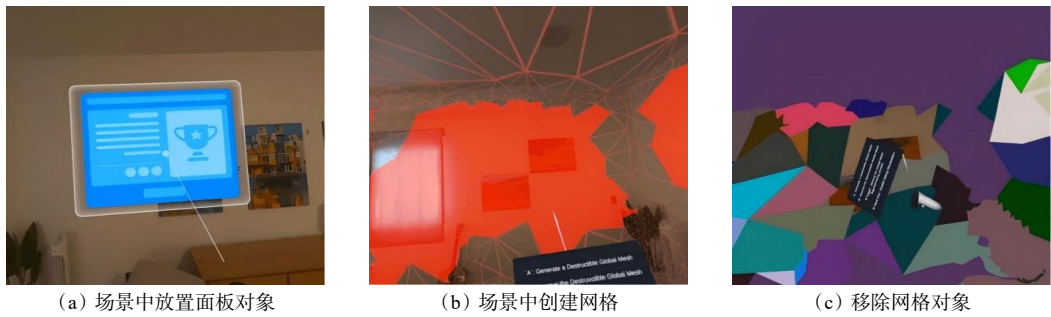


图 11 Meta Horizon OS 的即时放置和可破坏网格功能
(图片来源: VR 陀螺网站)

场景装饰器(scene decorator)是 MRUK 中又一高效工具, 支持开发者用丰富资产精细装饰 MR 场景。开发者能依场景需求, 以随机或统一方式在物理空间智能选择(图 12(a)), 精准放置预制件(图 12(b))、3D 模型等资产适配场景布局, 提升 MR 场景视觉丰富度与沉浸感。

12 月 13 日, 谷歌重返 XR 生态, 推出专为 XR 头显及智能眼镜设计的 Android XR 操作系统。该系统可兼容 Google Play Store 上多数手机、平板应用, 支持用户在虚拟与现实间灵活切换。谷歌 AI 助手 Gemini 入驻 Android XR, 提供智能规划、实时导航

(图 13(a))、实时翻译(图 13(b))、研究辅助、任务指

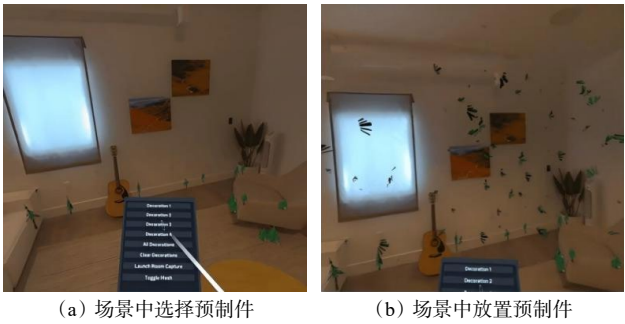


图 12 MR 实用工具包 MRUK 中的场景装饰器工具
(图片来源: VR 陀螺网站)

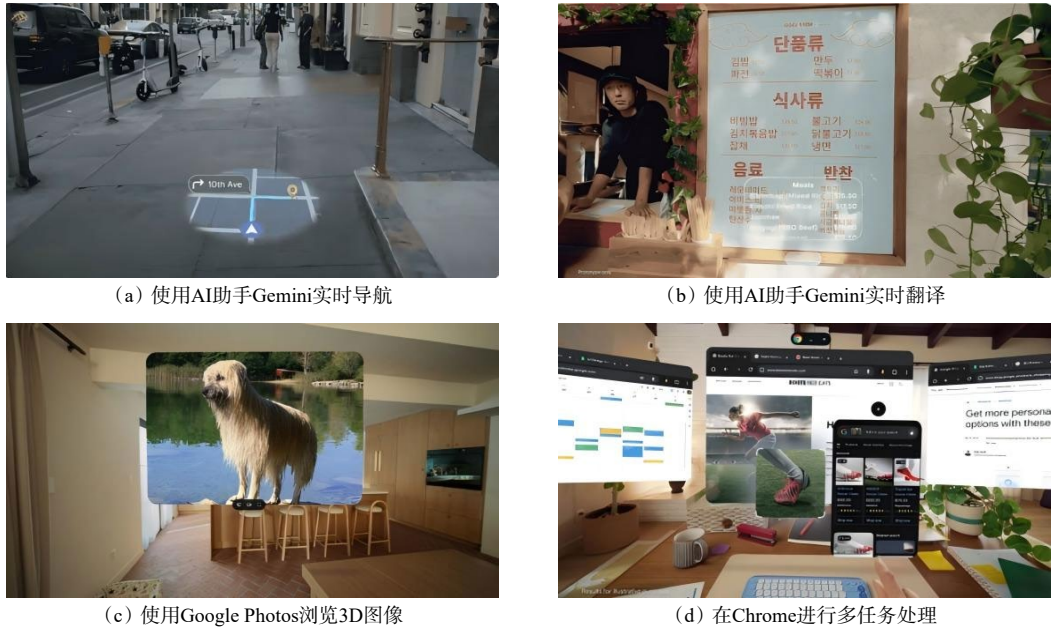


图 13 2024 年谷歌发布的 Android XR 操作系统功能
(图片来源: The Keyword)

导等多元服务。基于 Android XR, 用户能在虚拟大屏幕观看 YouTube 视频, 通过 Google Photos 浏览 3D 图像(图 13(c)), 在 Google Maps 体验沉浸式导航, 在 Chrome 实现多任务处理(图 13(d)), 畅享丰富娱乐与办公体验。预览版已支持 ARCore、Android Studio 和 Unity 等工具。Google 为开发者提供 API 与硬件开发套件, 并在 Android Studio 集成 Android XR 模拟器用于可视化, 方便开发 XR 应用及产品。三星将率先推出搭载 Android XR 的头显, 索尼、Lynx 和 XREAL 也计划跟进^[3]。

至此, XR 操作系统形成以 Android XR、Meta Horizon OS 和苹果 Vision OS 为主导的竞争格局, 各方将在技术、生态、应用等维度展开激烈角逐, 推动 XR 行业加速发展。XR 操作系统开源化有望重塑现有行业生态, 促使厂商强化合作与竞争, 构建更开放、多元的生态系统。

2.2 3D 扫描及文件传输取得轻量化突破

3D 图像数据文件格式是构建沉浸式交互体验的核心基础, 也是实现跨平台及设备兼容性的重要支撑。当下, 基于 XR 的 3D 图像数据文件格式存在众多相关标准。例如, 基于国际标准化组织(ISO)的 STL、STEP、AMF 等; 基于行业协会与联盟的 3MF、X3D、Collada(DAE)等; 基于企业与软件开发商的 FBX、OBJ、U3D、GLTF/GLB 等。丰富多样的 3D 图像数据文件格式为 XR 内容创作者提供了充足选择, 有力推动了 XR 内容创作生态的繁荣发展。

2024 年, Niantic 公司发布全新开源 3D 图像数据文件格式“.SPZ”。该格式借助“3D Gaussian Splatting”(3D 高斯泼溅)扫描技术, 可将获取的数据压缩至传统数据的 1/10, 极大地便利了智能手机上 3D 扫描数据与应用程序间的共享。以往用于输出的 PLY 文件格式, 生成的室外场景详细扫描数据容量可达 250 MB 甚至更大, 数据传输、接收及存储耗时较长; 而 SPZ 格式填补了 3D 点云领域缺少专用高效压缩格式的空白, 能大幅节省存储空间, 让移动设备处理和展示 3D 点云数据更高效、便捷。目前, “.SPZ”已应用于 Niantic 的免费 3D 扫描应用 Scaniverse 中, 用户可通过该应用即时处理并共享智能手机捕获的 3D 扫描数据(图 14)。此外, 该公司的免费 XR 内容创建工具 Niantic Studio 也支持“.SPZ”文件导入, 方

便用户在不同平台和应用间轻松共享、编辑 3D 扫描数据^[26]。



图 14 2024 年 Niantic 公司发布全新开源 3D 图像数据
(图片来源: 今日头条)

在图像数据文件传输场景下, 标准化对于保障数据高效、稳定流转起着核心作用。2024 年 6 月 15 日, 广东省数字化学会联合 30 多家单位、90 多位专家制定的《三维 CAD 模型轻量化格式》团体标准(T/DISA 1011—2023)正式施行。此标准填补了国内该领域标准的空白, 构建了统一且可扩展的三维 CAD 模型轻量化格式体系。它通过优化数据组织结构、压缩数据内容, 大幅减小模型文件体积, 生成高压缩比的轻量化文件。在不同终端间传输三维 CAD 轻量化模型数据时, 该标准作为具体的数据格式规范, 有力保障数据传输效率。以往因格式差异导致的传输卡顿、兼容性难题迎刃而解, 数据得以在各类终端间高速、稳定传输。同时, 该标准为数据在不同终端上实现高性能可视化奠定基础, 让复杂三维模型能清晰、流畅呈现, 为工业设计、制造等依赖三维 CAD 模型的领域, 在数字化转型进程中提供关键的标准化支撑, 推动产业升级发展。

3 内容侧

自 2023 年大空间文旅项目《消失的法则》推出以来, 基于 LBE(区域性娱乐场所)的 XR 大空间文旅项目迅速崛起, 截至目前数量已近百个, 成为 2024 年 XR 内容领域的新热点。这些项目广泛取材于中外知名文旅 IP, 构建出多样化的沉浸式探索场景, 极大地丰富了用户体验。在硬件设备与体验模式上, 它们不仅涵盖了以 PICO、Quest 等主流 XR 设备搭配高性能背包电脑的室内游走模式, 还创新衍生出基于 Apple Vision Pro 的室外混合现实体验、基于智能手机的云

化大空间文旅体验,以及基于VR一体机的LBE互动电影体验等全新形态,展现出XR大空间文旅项目蓬勃发展与多元创新的态势,为后续深入探讨其技术应用、市场影响及发展趋势提供了丰富的研究样本与实践基础。

3.1 基于背包设备的VR大空间文旅体验

基于背包设备的VR大空间文旅体验,多采用PICO、HTC、Quest等主流VR设备,连接高性能背包电脑,用户可在室内自由游走,畅享大空间虚拟场景。《敦煌:沙海谜窟》便是该模式下的典型代表项目。

敦煌素有“飞天故乡”与“丝绸之路黄金旅游胜地”之称,承载着深厚的历史文化底蕴。以往,人们主要通过实地游览或影视作品领略其壮美;如今,用户可以借助大型多人沉浸式互动项目《敦煌:沙海谜窟》,“走进”敦煌,全方位领略敦煌文化所蕴含的艺术价值与独特魅力。该项目由PICO、沙核科技、维魔科技等多个公司联合打造。基于PICO VR头显和高性能背包电脑(图15(a))的高精图形处理能力,项目采用影视级互动叙事超级空间技术,成功地将逼真的场景与宏大的视觉艺术无缝融合。项目中的场景与人物细节(图15(b))都极力还原历史风貌,增强用户体验时的代入感。体验者能以第一人称视角沉浸式漫游月牙泉(图15(c))、深入探秘莫高窟(图15(d)),

亦能于虚拟夜游市集中感受烟火气息,还可以化身为故事主人公,与剧中角色并肩作战,体验一场跨越千年的时空之旅^[27]。

莫高窟第156窟属晚唐代表性石窟,在敦煌遗址每日限量开放,并非所有游客都能参观。即便入窟,部分壁画因侵蚀、破坏,原貌难辨。《敦煌:沙海谜窟》凭借全沉浸体验,生动还原壁画原貌与细节(图16),既能为用户带来丰富的视觉享受,又能助力无缘细观真迹的游客增进认知,以数字化形式推动文物的保护与文化传播。

3.2 基于XR头显的大空间文旅体验

基于背包装置的大空间文旅体验项目,面临设备重量、散热及续航等技术难题,这些问题会削弱体验的持久性、舒适性,降低沉浸感与自由度。与之不同,基于XR头显的大空间文旅体验无需背包电脑,用户仅佩戴XR头显,就能在室内畅享大空间虚拟场景。如《秦潮觉醒》与《一梦入大唐》等代表性项目,为用户带来便捷且沉浸的文旅新体验。

《秦潮觉醒》是上海元拓境科技发展有限公司自主研发的一款大空间沉浸式体验项目,以“华夏文化”为灵魂,深度融合历史、科幻、探险与解密等多重元素,通过超级工厂、末世废墟、神秘地宫、山洞壁画和新世界5大主题空间场景,让体验者感受秦朝文化的



(a) PICO VR头显和背包电脑



(b) 人物服饰



(c) 月牙泉场景



(d) 莫高窟场景

图15 大空间项目《敦煌:沙海谜窟》

(图片来源:网易)

魅力。项目可以单人体验,也可以多人组队。体验者佩戴上 Pico 4 Ultra Enterprise 头显(图 17(a)),就可瞬间穿越到 2000 多年前的秦朝地宫,逐一参观面前的文化瑰宝(图 17(b));通过非玩家角色(NPC)的解说与指引,可近距离感受大自然的鬼斧神工,体验 360°的视觉盛宴(图 17(c)),也能“亲身”感受峭壁熔浆扑面而来的一股股热浪。巨大的壁画、象形符号和图腾等元素穿插其中,在里面可以触摸古老的文物,

与各种奇珍异兽互动(图 17(d)),逐步解开谜题、激活壁画和推开沉重石门,与古人进行一场跨越千年的对话^[28]。

沃达全宇宙与凌宇智控科技有限公司(NOLO)联合打造的数字文旅项目《一梦入大唐》,基于历史文献记载和考古挖掘实证,构建出立体、动感的盛世大唐,并通过新颖奇特、实时互动的叙事方式,向体验者再现了唐朝的历史文化、风土人情及山河之美,是现代

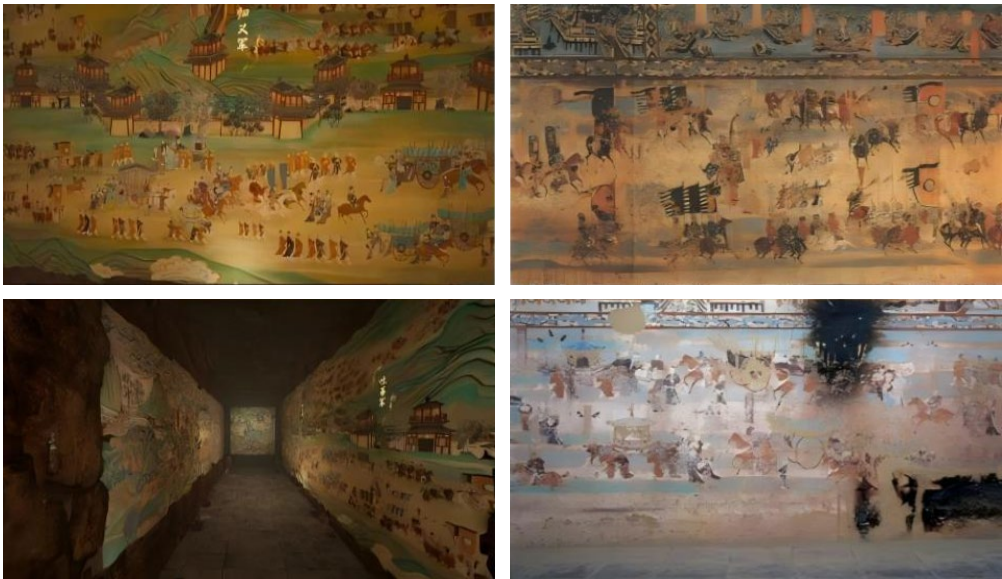


图 16 《敦煌: 沙海谜窟》中的壁画细节与莫高窟第 156 窟壁画原貌
(图片来源: 网易)



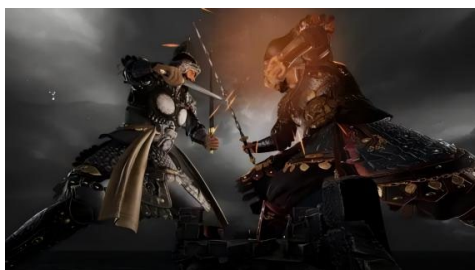
图 17 大空间项目《秦潮觉醒》
(图片来源: 新浪微博)

科技与活化历史的一次全新尝试。体验者佩戴 NOLO 自研空间计算设备 SONIC2 高清头显,在引导者的解说下,可观赏《凌烟阁二十四功臣》《昭陵六骏浮雕》等传世名作(图 18(a));还能与家人、伙伴一同搭乘铜鑾

金马车,穿梭湍急的水银河,邂逅大唐名将激烈争斗的场景(如图 18(b));亦能乘坐鹦鹉车飞越秦岭,环游长安古城领略美景(图 18(c));甚至可能机缘巧合闯入神秘昭陵(图 18(d)),实现与古人的跨时空对话^[29-30]。



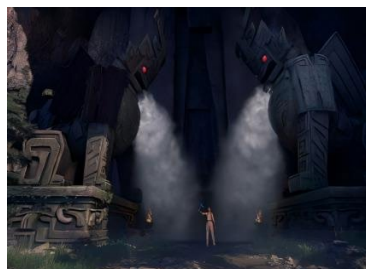
(a) 传世名作场景



(b) 名将争斗场景



(c) 长安古城美景



(d) 神秘的昭陵

图 18 大空间项目《一梦入大唐》

(图片来源: 腾讯网)

3.3 基于 MR 设备的新型大空间文化体验

基于 MR 设备的大空间文化体验,无需额外搭建大空间场景。设备内置的高精度传感器与摄像头,能够将极为逼真的视觉效果无缝融入现实环境,大幅提升体验的真实感、互动性及趣味性,为用户打造虚实融合的独特文化体验。

2024 年,北京意景技术有限责任公司与重庆幻景数研科技有限公司创新性地打造了全球首个线下 MR 大空间体验项目《ASTATION 山海空间》。该项目基于中国古代典籍《山海经》与《淮南子》传说,融合传统神话与现代科技,打破虚拟、现实及艺术、生活的界限,带来鲜活新颖的混合现实室外大空间感官体验。用户佩戴 2024 年苹果公司发售的 Vision Pro MR 设备,能在 2000 m² 户外大空间自由漫步,在时光机领航员引导下,游览 10 余处 1:1 还原的 VR 巨型奇观,感受上古神话场景,如天柱不周山、女娲、旋飞的精卫及《山海经》中的各类奇珍异兽(图 19)^[31]。

该项目运用 AI 算法,基于用户行为数据和偏好模型,实时调适虚拟环境,为用户定制个性化的体

验。这种创新型的混合现实体验模式,在现实世界与虚拟世界间搭建起文化传播与传承的数字化桥梁。用户通过主动探索场景、参与互动体验,能够深入洞悉传统文化内涵,激发强烈的情感共鸣,有力推动传统文化在数字化时代的广泛传播与深度传承。



图 19 ASTATION 山海空间体验场景

(图片来源: 百度)

3.4 基于智能手机的云化大空间文旅体验

在过往的大空间文旅体验构建中,无论是依托背包电脑与 XR 头显,还是 MR 设备,均需用户佩戴专门的 XR 装备。而在 2024 年,厦门市人民政府携手中国移动咪咕公司打造的“鼓浪屿元宇宙”(简称“鼓

元”),开拓性地以手机作为切入点,深入探索“云化”大空间文旅体验模式,极大地丰富了大空间文旅生态体验的多样性,为该领域的发展注入全新思路。

用户无需下载额外软件,亦不必购置或携带任何专业设备,仅凭借智能手机,通过微信小程序即可便捷体验“鼓元”;也可借助 PAD、PC、VR 设备等多种终端方式接入“鼓元”平台。在“鼓元”的线上数智空间内,用户能够创建专属的数智形象,随时自由穿梭至鼓浪屿的各个景点(图 20(a)),聆听金牌数智导游“小蘑菇”(图 20(b))的精准解说,深度探寻鼓浪屿的文化底蕴。在线下场景中,用户可跟随 AR 导游开启鼓浪屿深度游览(图 20(c));还能在首个鼓浪屿主题 XR 大空间《琴岛奇遇》中,解锁沉浸式文旅体验新玩法^[32]。

“鼓元”线上空间依托线下实景高精度扫描技术,运用先进的 3D 建模手段,对面积达 1.88 km² 的鼓浪屿全岛地貌进行了高精度还原,以 1:1 比例复刻了 77 处核心景点建筑(图 21(a)所示)。这一数字化构建成果,为游客提供了灵活的游览体验——若游客在实地旅行中未能遍览所有景点,可在线上空间轻松弥补遗憾(图 21(b))。在部分特色景区,“鼓元”精心设置了 AR 互动关卡。关卡设计以实地景区的文化知识为核心背景,关联相应的虚拟宝藏图,引导用户在

真实场景中沉浸式体验虚拟游戏。用户通过探索收集虚拟宝藏,最终可合成专属艺术卡片(图 21(c)),提升了旅行的趣味性与氛围感,丰富游客的文旅体验。

3.5 基于 VR 一体机的 LBE 互动电影体验

西安 XR 电影产业基地推出的 LBE XR 互动电影体验项目《汉阳孤军》(图 22(a)),基于 VR 一体机打造。该项目融合了 MR 空间定位、可穿戴力反馈、动作捕捉、多人联机以及地形自适应系统等前沿技术,借助 VR 技术构建出 360°立体虚拟世界场景,为观众展现出一个既真实又极具想象力的战争世界。观众不再局限于坐在座椅上观看正前方屏幕,而是能够身临其境般“行走”于电影情节中,凭借身体全方位感知影片的每一处细节^[33]。

项目选用 Meta Quest 3 一体机头显方案,搭配卓越的引擎优化技术与全景视频渲染技术,用户无需背负电脑背包或依赖 PC 串流,避免了沉重负担与操作不便,在畅享 PC 级画质的同时,获得全无线的轻量化便捷体验(图 22(b))。影片依托 Meta Quest 3 提供的 API 功能,实现了精准的全身动作捕捉。这不仅使观众在观影时能自由移动并与影片内容互动(图 22(c)),还增添了线下娱乐的社交属性,大幅丰富观影体验,让其更具趣味性。此外,项目配备独创的可穿戴 VR 体感服,用户借此可 360°感知虚拟世界中的

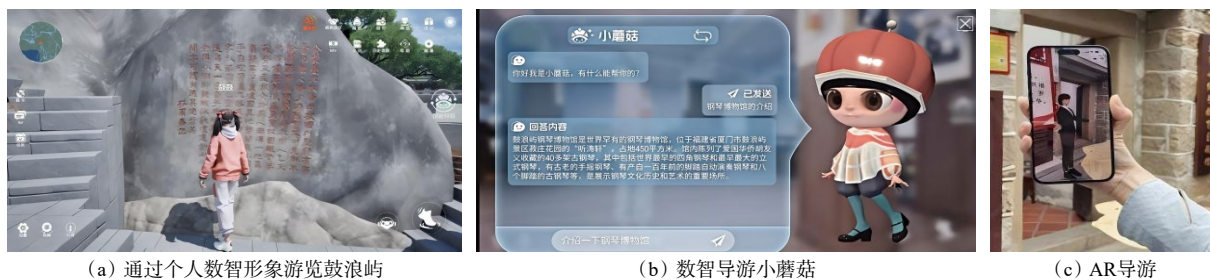


图 20 鼓浪屿元宇宙体验场景
(图片来源:新浪网;VR 陀螺)



图 21 《鼓浪屿元宇宙》体验场景
(图片来源:VR 陀螺网站;元力社)



图 22 《汉阳孤军》电影体验项目
(图片来源:西部网;百度)

各类模拟反馈,诸如中弹、碰撞、触电、地震以及雨滴洒落等沉浸式体感。该项目从视觉与触觉多维度,为观众带来超越传统 IMAX 影院的震撼交互式体验。

4 建议

4.1 聚焦关键技术攻坚,锚定性能跃升方向

2024 年, XR 产业关键技术取得进展,但仍需大力投入高性能芯片、先进光学显示器件等关键硬件研发,持续优化 XR 设备性能与体验。未来研究应重点推动硬件向小型化、轻量化、低功耗化迈进,以匹配消费者对便携性与续航的需求。深入探索高精度手势识别、眼动追踪、语音交互等自然交互技术及其多模态融合应用,助力用户实现更直观、舒适的 XR 交互。在基础软件层面,全力研发操作系统、开发引擎,构建自主可控的统一标准规范,提升软件稳定性、兼容性 & 开发效率。

4.2 深挖内容创作潜力,引领多元内容创新走向

2024 年, LBE 大空间文旅项目已呈现多元化发展态势。后续应激励研究人员创作更多横跨教育、医疗、文化、艺术、工业等多领域,兼具创新性与教育价值的 XR 内容,满足不同用户群体的多样需求。充分利用人工智能生成内容(AIGC)、动作捕捉等先进制作技术提升内容质量与真实感,注重内容的故事性、趣味性与情感共鸣,打造具有广泛影响力的优质内容品牌。同时,构建完善的 XR 内容分发平台与渠道,加强版权保护与管理,保障创作者合法权益,积极探索云存储与云渲染服务,优化用户获取和分享高质量 XR 内容的体验流程。

4.3 拓展行业应用版图,驱动跨界融合创新发展

目前, XR 技术已在工业、教育、医疗、文旅等领域广泛应用,构建起行业应用版图。未来研究应深化其在这些重点行业的应用,解决行业痛点,提升生产效率、教学质量、医疗水平与旅游体验,如工业的远程协作、教育的沉浸式学习等。同时,关注消费级市场需求,开发社交娱乐、智能家居控制、虚拟购物等应用,增强公众对 XR 技术的认知与接受度。此外,探索其在智慧城市、智能交通、数字孪生等新兴领域的潜力,为城市管理、交通规划、建筑设计等提供创新方案与决策依据,拓宽 XR 行业发展边界。

4.4 筑牢产业链协作基石,打造协同创新生态体系

当前, XR 产业链已逐步成型,涵盖硬件制造、内容创作、应用服务等多个环节,但产业链各环节间的协同仍有提升空间。在此现状下,研究人员需积极推动 XR 产业链上下游企业紧密合作,构建产业联盟与合作共同体,以此实现资源共享与优势互补,有力驱动产业发展^[34]。同时,大力鼓励 XR 领域的创新创业活动,培育具有核心竞争力的创新型企业,为行业发展注入全新动能^[35]。人才是产业发展的关键,需构建完备的 XR 专业人才培养与引进机制,并建立有效的激励体系,满足行业对高素质人才的迫切需求。此外,积极参与国际 XR 标准的制定与推广,提升中国在该领域的国际话语权。通过加强与国际先进企业、研究机构的合作与交流,引进国外先进技术与经验,加速中国 XR 产业的国际化进程。

4.5 提速标准体系建设,护航产业规范稳健前行

当下, XR 产业标准体系建设尚处于逐步完善阶段,部分关键领域标准存在缺失或不统一的情况。在

此背景下,后续应加快制定 XR 产业基础通用标准,涵盖硬件设备性能指标、接口规范、安全要求,以及软件开发规范、数据格式、兼容性标准等,为产业稳健前行筑牢根基。在内容端,需完善 XR 内容制作、分发、呈现等环节的标准规范,如建立内容质量评估体系、强化版权保护机制、规范分发渠道管理,以此促进内容产业规范化发展。同时,针对不同行业应用需求,定制 XR 应用标准与指南,助力 XR 技术在各行业实现标准化应用,提升应用效果与可靠性,确保产业在规范、有序的轨道上持续迈进。

5 结论

2024 年, XR 产业展现出全方位蓬勃发展的强劲势头。硬件领域,微显示技术成果斐然, Micro LED 朝着单片全彩方向稳步推进, Micro OLED 推动 4K 成为 XR 头显新潮流。设备创新层出不穷,众多品牌发布的 AI+AR 眼镜,在实现轻量舒适佩戴的同时,带来多模态智能交互新体验;多款 XR 设备引入指环或腕带交互方式,引领交互技术革新。软件层面,形成以三大操作系统为主导的竞争局面,开源化趋势促使各方在多维度激烈角逐,有力推动行业生态向开放多元加速迈进。内容方面,多元化的 LBE 大空间文旅项目为 XR 内容创作生态注入全新活力。中国 XR 产业在光学、显示等硬件核心技术上取得关键突破,但在核心软件、内容创作及行业应用融合发展中,仍面临诸多核心难题。后续需持续加大关键技术研发投入,丰富内容创作生态,深化并拓展行业应用范围,强化产业链协作以完善产业链生态,加快相关标准的制定、规范与推广工作。通过实现多方位、多层次生态协同发展,构建技术、产品、服务与应用协同繁荣的高质量产业发展新格局。

参考文献 (References)

- [1] 魏婕, 宋宇航, 任羽佳. 中国数字经济核心产业创新测度: 以电子信息产业百强企业文本挖掘为例[J]. 中国科技论坛, 2024(11): 50–60.
- [2] 晏昱凌. AI眼镜增量空间大, 渗透率有望进一步提升: 独家对话博士眼镜COO夏冰[J]. 中国眼镜科技杂志, 2024(9): 24–25.
- [3] Shahram I. Android XR: The Gemini era comes to headsets

- and glasses[EB/OL]. (2024–12–12)[2024–12–22]. <https://blog.google/products/android/android-xr>.
- [4] 周雯, 孟可. 迈向“未来影院”的虚拟现实大空间[J]. 当代电影, 2024(11): 75–84.
- [5] 杨阳, 乔晓鹏, 张志强. 基于元宇宙的大运河虚拟文化空间场景感知与构建研究[J]. 出版广角, 2024(17): 53–59.
- [6] 葛颀. 从热潮走向赛道!大空间沉浸式LBE产业的战略与思考[J]. 通信世界, 2024(17): 22–24.
- [7] 王付雄. Micro-LED转移模块的设计制备及应用研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2022.
- [8] 蜂鸟Mini II单色光引擎[EB/OL]. [2024–12–22]. https://www.jb-display.com.cn/product_des/5.html.
- [9] 季渊, 许怡晴, 陈宝良, 等. 硅基微显示器发展现状与研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(20): 2011007.
- [10] Raysolve unveiled new production – ready micro – display series: PowerMatch® 1[EB/OL]. (2025–02–14)[2025–02–15]. <https://www.raysolve.com>.
- [11] 诺视科技与威科赛乐开发超高亮度MicroLED微显示芯片. (2024–12–01)[2024–12–03]. <https://www.ledinside.cn/news/20241203-58523.html>.
- [12] Lumileds addresses microLED efficiency through EQE and directionality. Compound Semiconductor[EB/OL]. (2024–08–29)[2024–10–18]. https://compoundsemiconductor.net/article/120034/Lumileds_addresses_microLED_efficiency_through_EQE_and_directionality.
- [13] Markus P, Nan H. How to make semi-polar InGaN light emitting diodes with high internal quantum efficiency: The importance of the internal field[EB/OL]. (2024–05–29)[2024–12–10]. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/lpor.2024.00529>.
- [14] 名古屋大学实现更高效、更明亮的Micro LED显示屏[EB/OL]. (2024–11–29)[2024–12–10]. <https://news.qq.com/rain/a/20241129A083SU00>.
- [15] 创维推出混合现实产品MR PANCAKE 2: 号称对标苹果 Vision Pro[EB/OL]. (2024–01–10)[2024–11–10]. https://www.toutiao.com/article/7322472870389776905/?upstream_biz=doubao&source=m_redirect.
- [16] 全球首款!纳德光学与京东方携重磅新品亮相光博会[EB/OL]. (2024–09–19)[2024–10–10]. <https://tech.hexun.com/2024-09-19/214620335.html>.
- [17] 索尼展示全新XR头显和手柄: 主要用于空间内容创作, 骁龙 XR2+Gen 2+戒指手柄[EB/OL]. (2024–01–09)[2024–05–18]. <https://post.smzdm.com/p/aeqxepx3>.
- [18] 约50g全彩AR+AI眼镜设计, 中国厂商斩获CES 2025 创新奖[EB/OL]. (2024–11–19)[2024–11–21]. <https://vrtuoluo.cn/541415.html>.
- [19] 创业十年, Rokid提前做出了“Ray-Ban Meta下一代”[EB/OL]. (2024–11–19)[2024–11–22]. <https://vrtuoluo.cn/541418.html>.
- [20] 谷东科技星彩系列: AI眼镜领域的新势力, 百镜大战的新选手[EB/OL]. (2024–11–27)[2024–11–29]. <https://vrtuoluo.cn/541496.html>.

- [21] 售价3299元起, 影目发布两款AI+AR眼镜[EB/OL]. (2024-11-29) [2024-11-30]. <https://vrtuoluo.cn/541525.html>.
- [22] Snap's new spectacles inch closer to compelling AR[EB/OL]. (2024-09-18) [2024-09-28]. <https://www.theverge.com/2024/9/17/24245572/snap-spectacles-ar-developers-evan-spiegel>.
- [23] Meta's big tease[EB/OL]. (2024-09-26) [2024-09-30]. <https://www.theverge.com/24253908/meta-orion-ar-glasses-demo-mark-zuckerberg-interview>.
- [24] NOLO MR新品NOLO SONIC2 Pro首发亮相[EB/OL]. (2024-01-10) [2024-03-23]. https://www.sohu.com/a/750998092_213766.
- [25] Meta wants to be the Microsoft of headsets[EB/OL]. (2024-04-23) [2024-04-27]. <https://www.theverge.com/2024/4/22/24137284/meta-license-horizon-os-quest-headset-lenovo-asus>.
- [26] Niantic旗下Scaniverse发布全新开源3D图像数据文件格式全面科普[EB/OL]. (2024-11-13) [2024-11-20]. https://www.toutiao.com/article/7436589593203393074/?upstream_biz=doubao&source=m_redirect.
- [27] 敦煌历史还能怎么看?《敦煌: 沙海谜窟》VR大空间重塑文旅新体验[EB/OL]. (2024-10-12) [2024-11-15]. <https://www.163.com/dy/article/JEABPNUT0526LS4I.html>.
- [28] “秦潮觉醒沉浸式探索体验”震撼登陆天津![EB/OL]. (2024-08-19) [2024-09-15]. <https://weibo.com/ttarticle/p/show?id=2309405069125616533625>.
- [29] 《一梦入大唐》盛大开幕: NOLO提供大空间技术解决方案[EB/OL]. (2024-07-09) [2024-07-15]. <https://news.qq.com/rain/a/20240709A02AS200>.
- [30] 一梦入大唐! 石景山科幻企业凌宇科技落地沉浸体验新空间[EB/OL]. (2024-07-14) [2024-07-15]. <https://news.qq.com/rain/a/20240714A06FD900>.
- [31] 高尔东:《ALAB山海空间》重塑时空叙事新维度[EB/OL]. (2024-08-01) [2024-08-15]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1806169104744267762&wfr=spider&for=pc>.
- [32] 继VR大空间爆发后, 文旅的下一个爆点在哪?[EB/OL]. (2024-12-12) [2024-12-20]. <https://vrtuoluo.cn/541472.html>.
- [33] 《汉阳孤军》: 沉浸式战争体验, 重燃英雄热血[EB/OL]. (2024-10-14) [2024-10-24]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1812879810120300559&wfr=spider&for=pc>.
- [34] 罗志佳, 李兴. “元宇宙+红色资源”赋能高校思政课创新探析[J]. 喀什大学学报, 2023, 44(4): 86-92.
- [35] 张文利. “互联网+”智慧林业发展中存在的问题及对策[J]. 造纸装备及材料, 2023, 52(3): 184-186.

Review on the hot spots of extended reality (XR)

FAN Liya^{1,2}, WANG Mei¹, MA Jieyuan³

1. School of Computer Science, Xi'an Jiaotong University City College, Xi'an 710018, China

2. Engineering Research Center of IoT Intelligent Sensing Interactive Platform, Universities of Shaanxi Province, Xi'an 710018, China

3. Xi'an Pioneering Park Development Center, Xi'an 710077, China

Abstract Recently, the XR industry has demonstrated a thriving development trend in all aspects and at multiple levels, achieving remarkable progress in the fields of hardware, software, and content. At the hardware level, pivotal breakthroughs have been made in micro-display technology, significantly enhancing the visual experience indicators of XR devices. Meanwhile, multi-modal intelligent interaction has greatly expanded the dimensions and precision of the interaction between users and the XR environment. In the software aspect, the competition in the open-sourcing of XR operating systems has intensified, accelerating the evolution of the industry ecosystem towards a more open and diversified direction. In the field of content, diversified cultural and tourism large-scale space projects have instilled substantial vitality into the XR content creation ecosystem. The research reveals that during the deep integration of core software, content creation, and industry applications, bottleneck issues such as inconsistent technical standards and poor compatibility exist. Based on these findings, this paper proposes that it is necessary to increase investment in research and development in key areas such as chip and display technologies, enrich the content creation ecosystem, deepen and expand industry application scenarios, strengthen the collaboration between the upstream and downstream of the industrial chain, and improve the relevant standard system. Finally, it is concluded that the XR industry is moving towards the coordinated development of the entire industrial chain and is expected to establish a high-quality industrial development pattern featuring advanced technologies, diverse products, excellent services, and extensive applications.

Keywords extended reality; virtual reality; artificial intelligence; interaction style ●



(责任编辑 徐丽娇)