



JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS

主办: 中国科学院空天信息创新研究院
中国图象图形学学会
北京应用物理与计算数学研究所

中国图象图形学报

2022
06
VOL.27

ISSN1006-8961
CN11-3758/TB

2021

图像图形学 发展 年度报告



第27卷第6期（总第314期）
2022年6月16日

中国精品科技期刊
中国国际影响力优秀学术期刊
中国科技核心期刊
中文核心期刊

版权声明

凡向《中国图象图形学报》投稿，均视为同意在本刊网站及CNKI等全文数据库出版，所刊载论文已获得著作权人的授权。本刊所有图片均为非商业目的使用，所有内容，未经许可，不得转载或以其他方式使用。

Copyright

All rights reserved by Journal of Image and Graphics, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS. The content (including but not limited text, photo, etc) published in this journal is for non-commercial use.

主管单位 中国科学院
主办单位 中国科学院空天信息创新研究院
中国图象图形学学会
北京应用物理与计算数学研究所

主 编 吴一戎
编辑出版 《中国图象图形学报》编辑出版委员会
通信地址 北京市海淀区北四环西路19号
邮 编 100190
电子信箱 jig@aircas.ac.cn
电 话 010-58887035
网 址 www.cjig.cn

广告发布登记号 京朝工商广登字20170218号
总 发 行 北京报刊发行局
订 购 全国各地邮局
海外发行 中国国际图书贸易集团有限公司
(邮政信箱: 北京399信箱 邮编: 100048)
印刷装订 北京科信印刷有限公司

Journal of Image and Graphics

Title inscription: Song Jian | Monthly, Started in 1996

Superintended by Chinese Academy of Sciences
Sponsored by Aerospace Information Research Institute, CAS
China Society of Image and Graphics
Institute of Applied Physics and Computational Mathematics

Editor-in-Chief Wu Yirong
Editor, Publisher Editorial and Publishing Board of Journal of Image and Graphics
Address No. 19, North 4th Ring Road West, Haidian District, Beijing, P. R. China
Zip code 100190
E-mail jig@aircas.ac.cn
Telephone 010-58887035
Website www.cjig.cn

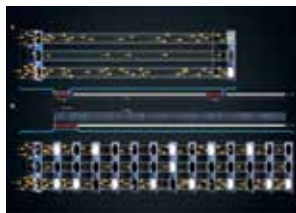
Distributed by Beijing Bureau for Distribution of Newspapers and Journals
Domestic All Local Post Offices in China
Overseas China International Book Trading Corporation
(P.O.Box 399, Beijing 100048, P.R.China)
Printed by Beijing Kexin Printing Co., Ltd.

CN 11-3758/TB
ISSN 1006-8961
CODEN ZTTXFZ

国外发行代号 M1406
国内邮发代号 82-831
国内定价 60.00元



面向智慧交通的图像处理与
边缘计算(第1743页)



脉冲视觉研究进展(第1823
页)



移动在线实时绘制技术研究
综述(第1877页)

序言 王耀南 I

视觉理解与计算成像

基于深度学习的视觉目标检测技术综述

曹家乐, 李亚利, 孙汉卿, 谢今, 黄凯奇, 庞彦伟 1697

面向复杂场景的人物视觉理解技术

马利庄, 吴飞, 毛启容, 王鹏杰, 陈玉珑 1723

面向智慧交通的图像处理与边缘计算

曹行健, 张志涛, 孙彦赞, 王平, 徐树公, 刘富强, 王超, 彭飞, 穆世义, 刘文予, 杨铀 ... 1743

视觉弱监督学习研究进展

任冬伟, 王旗龙, 魏云超, 孟德宇, 左旺孟 1768

智能遥感: AI赋能遥感技术

孙显, 孟瑜, 刁文辉, 黄丽佳, 张新, 骆剑承, 高连如, 王佩瑾, 闫志远, 郜丽静, 董文, 冯瑛
超, 李霁豪, 付琨 1799

脉冲视觉研究进展

黄铁军, 余肇飞, 李源, 施柏鑫, 熊瑞勤, 马雷, 王威 1823

计算成像前沿进展

顿雄, 付强, 李浩天, 孙天成, 王建, 孙启霖 1840

移动在线实时绘制技术研究综述

刘畅, 霍宇驰, 张严辞, 张乾, 郑家祥, 唐睿, 余耿, 王锐, 贾金原 1877

数据挖掘和信息交互

表格识别技术研究进展

高良才, 李一博, 都林, 张新鹏, 朱子仪, 卢宁, 金连文, 黄永帅, 汤帆 1898

多媒体隐写研究进展

张卫明, 王宏霞, 李斌, 任延珍, 杨忠良, 陈可江, 李伟祥, 张新鹏, 俞能海 1918

大脑多模态成像技术定量研究进展

叶慧慧, 何宏建, 方静苑, 童琪琦, 周子涵, 刘华锋 1944

多模态人机交互综述

陶建华, 巫英才, 喻纯, 翁冬冬, 李冠君, 韩腾, 王运涛, 刘斌 1956

文化遗产活化关键技术研究进展

耿国华, 何雪磊, 王美丽, 李康, 贺小伟 1988

情感计算与理解研究发展概述

姚鸿勋, 邓伟洪, 刘洪海, 洪晓鹏, 王甦菁, 杨巨峰, 赵思成 2008

跨模态脑图谱数据融合研究进展

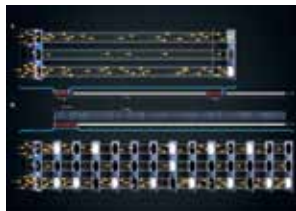
罗娜, 宋明, 杨正宜, 蒋田仔 2036

CONTENTS

JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS



The review of image processing and edge computing for intelligent transportation system(P1743)



Advances in spike vision(P1823)



A review of real-time rendering technology based on mobile internet platforms(P1877)

Visual Understanding & Computational Imaging

A survey on deep learning based visual object detection

Cao Jiale, Li Yali, Sun Hanqing, Xie Jin, Huang Kaiqi, Pang Yanwei 1697

Visual recognition technologies for complex scenarios analysis

Ma Lizhuang, Wu Fei, Mao Qirong, Wang Pengjie, Chen Yulong 1723

The review of image processing and edge computing for intelligent transportation system

Cao Xingjian, Zhang Zhitao, Sun Yanzan, Wang Ping, Xu Shugong, Liu Fuqiang, Wang Chao, Peng Fei, Mu Shiyi, Liu Wenyu, Yang You 1743

Progress in weakly supervised learning for visual understanding

Ren Dongwei, Wang Qilong, Wei Yunchao, Meng Deyu, Zuo Wangmeng 1768

The review of AI-based intelligent remote sensing capabilities

Sun Xian, Meng Yu, Diao Wenhui, Huang Lijia, Zhang Xin, Luo Jiancheng, Gao Lianru, Wang Peijin, Yan Zhiyuan, Gao Lijing, Dong Wen, Feng Yingchao, Li Jihao, Fu Kun 1799

Advances in spike vision

Huang Tiejun, Yu Zhaofei, Li Yuan, Shi Boxin, Xiong Ruiqin, Ma Lei, Wang Wei 1823

Recent progress in computational imaging

Dun Xiong, Fu Qiang, Li Haotian, Sun Tiancheng, Wang Jian, Sun Qilin 1840

A review of real-time rendering technology based on mobile internet platforms

Liu Chang, Huo Yuchi, Zhang Yanchi, Zhang Qian, Zheng Jiaxiang, Tang Rui, Yu Geng, Wang Rui, Jia Jinyuan 1877

Data Mining and Information Interaction

A survey on table recognition technology

Gao Liangcai, Li Yibo, Du Lin, Zhang Xinpeng, Zhu Ziyi, Lu Ning, Jin Lianwen, Huang Yongshuai, Tang Zhi 1898

Overview of steganography on multimedia

Zhang Weiming, Wang Hongxia, Li Bin, Ren Yanzhen, Yang Zhongliang, Chen Kejiang, Li Weixiang, Zhang Xinpeng, Yu Nenghai 1918

Research progress of quantitative multimodal brain imaging technology

Ye Huihui, He Hongjian, Fang Jingwan, Tong Qiqi, Zhou Zihan, Liu Huafeng 1944

A survey on multi-modal human-computer interaction

Tao Jianhua, Wu Yingcai, Yu Chun, Weng Dongdong, Li Guanjuan, Han Teng, Wang Yuntao, Liu Bin 1956

Research progress on key technologies of cultural heritage activation

Geng Guohua, He Xuelei, Wang Meili, Li Kang, He Xiaowei 1988

An overview of research development of affective computing and understanding

Yao Hongxun, Deng Weihong, Liu Honghai, Hong Xiaopeng, Wang Sujing, Yang Jufeng, Zhao Sicheng 2008

Survey on cross-modal fusion based on brain atlas data

Luo Na, Song Ming, Yang Zhengyi, Jiang Tianzi 2036

中图法分类号: TP391 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2022)06-1877-21

论文引用格式: Liu C, Huo Y C, Zhang Y C, Zhang Q, Zheng J X, Tang R, Yu G, Wang R and Jia J Y. 2022. A review of real-time rendering technology based on mobile internet platforms. Journal of Image and Graphics, 27(06): 1877-1897 (刘畅, 霍宇驰, 张严辞, 张乾, 郑家祥, 唐睿, 余耿, 王锐, 贾金原. 2022. 移动在线实时绘制技术研究综述. 中国图象图形学报, 27(06): 1877-1897) [DOI:10.11834/jig.220177]

移动在线实时绘制技术研究综述

刘畅^{1,2}, 霍宇驰³, 张严辞⁴, 张乾^{2,5}, 郑家祥⁶, 唐睿⁶, 余耿¹, 王锐^{3*}, 贾金原^{2*}

1. 南昌航空大学信息工程学院, 南昌 330063; 2. 同济大学软件学院, 上海 200082;
3. 浙江大学计算机科学与技术学院, 杭州 310058; 4. 四川大学计算机学院, 成都 610065;
5. 上海渲图科技有限公司, 上海 201806; 6. 杭州群核信息技术有限公司, 杭州 310012

摘要: 移动在线实时绘制技术受移动互联网发展的驱动, 为3D可视化、计算机视觉、虚拟现实、增强现实、扩展现实和元宇宙等新兴研究领域提供了核心技术的支撑。本文以在线实时绘制技术为切入点, 探讨了该技术在移动端、Web端、云端和多端协同这4类平台下的发展重心和研究现状, 并深度阐述了工业级在线云平台的实施方案。首先, 针对移动端的在线实时绘制, 分析了近年来移动端绘制硬件构架设计的优化方向; 探讨了在功耗和带宽受到制约的情况下移动端如何对渲染算法进行加速, 如何对高功耗的光线跟踪算法进行优化; 列举了包括图形应用程序编程接口(application programming interface, API)和游戏引擎在内的移动端渲染工具。然后, 针对Web端在线实时绘制, 分析了Web端的3D渲染机制, 梳理了以3D场景的轻量化预处理、大规模3D场景的细粒度化网络传输、3D场景的对等传输以及Web3D在线特效渲染为代表的Web端在线绘制的关键技术(尤其面向大规模3D场景), 列举了国内外知名Web3D引擎并探讨了主流游戏引擎对Web3D应用的支持。再后, 针对云端在线实时绘制, 从应用托管、资源调度和串流这三大云平台的核心功能入手, 调研了以串流应用优化技术为核心的在线云绘制现状。此后, 从多端绘制任务分摊机制入手, 分析了以“端云”协同和“端边云”协同为目标的在线多端协同绘制的发展。最后, 以当前工业级在线云绘制平台为研究对象, 分析了包括微软、英伟达、Unity、酷家乐等一线云绘制企业的在线实时云绘制平台方案, 验证了移动在线绘制技术在工业界的实用性。

关键词: 在线实时绘制; 云渲染; Web3D; 端云协同; 远程绘制

A review of real-time rendering technology based on mobile internet platforms

Liu Chang^{1,2}, Huo Yuchi³, Zhang Yanci⁴, Zhang Qian^{2,5}, Zheng Jiaxiang⁶,
Tang Rui⁶, Yu Geng¹, Wang Rui^{3*}, Jia Jinyuan^{2*}

1. School of Information Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China;
2. School of Software Engineering, Tongji University, Shanghai 200082, China; 3. College of Computer Science and Technology, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 4. College of Computer Science, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 5. Shanghai Xuantu Information Technology Co., Ltd., Shanghai 201806, China;
6. Hangzhou Qunhe Information Technology Co., Ltd., Hangzhou 310012, China

收稿日期: 2022-03-04; 修回日期: 2022-03-15; 预印本日期: 2022-03-22

*通信作者: 王锐 ruiwang@zju.edu.cn; 贾金原 jia-tongji@qq.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(6207071897); 国家自然科学基金区域联合基金重点项目(U19A2063); 江西省教育厅科技项目(GJJ200907)

Supported by: National Natural Science Foundation of China(61960206007)

Abstract: Mobile internet real-time rendering technology facilitates key technical capabilities on the aspects of three dimensions (3D) visualization, computer vision, virtual reality, augmented reality, extended reality, and meta-universe. 3D visualization applications based on online real-time rendering technology have been widely scattered on multiple mobile Internet platforms. 3D based Internet applications have been transformed into new online visualization applications with 3D virtual scenes as the main interactive object and intensive immersion to deal with service locations and time constrained issues of the mobile Internet. Our review is focused on four platforms, including mobile terminals, web terminals, cloud terminals and multi-terminals collaboration. First, we investigate the “graphics processing unit” on mobile devices, which is the critical factor of mobile online real-time graphics rendering, and analyze its recent computing ability, designing, and optimization issues. We examined the possibility of hosting desktop-level rendering algorithms on mobile rendering devices, taking the ray-tracing approach as an example. We analyzed the rendering algorithms issues can be accelerated on the power and bandwidth constrained mobile orientation. We reviewed mobile rendering tools like mobile graphics application programming interface (API) and game engines, and conduct comparative category analysis for their performance. Second, we discussed the current Web3D online rendering mechanisms represented by the combination of WebGL2.0 and HTML5 in terms of web-oriented online real-time graphics rendering; we compared the technical features and rendering performance of well-known Web3D engines, and review the support of mainstream game engines for Web3D applications; we examined the challenged technologies of Web3D lightweighting solutions in related to the online real-time rendering of large-scale Web3D scenes like Web3D scene lightweighting and peer-to-peer networking (P2P) progressive transmission. In respect of online real-time graphics cloud rendering, we analyzed the remote rendering architecture of cloud rendering system; We revealed the core service layer of cloud rendering system in terms of cloud services——“platform as a service (PaaS)”, and sorted its three major functions out like application hosting, resource scheduling, and streaming; we analyzed two types of cloud-rendering optimization strategies derived from video stream compression and rendering latency mitigation; we described the core application of online cloud rendering system——the “cloud game”, and compared the system framework, technical features, and user experience of some of the latest “cloud game” applications. To enable multi-end collaborative online graphics rendering, we analyzed the rendering-task sharing and collaboration of the end-cloud system; we examined the collaboration pattern and technical features of the end-edge-cloud rendering system based on the introduction of edge computing; we make use of rendering resources to analyze the load balancing optimization issues originated from computing power deployment and resource scheduling of the multi-end rendering system. Finally, we listed the current industry based online real-time cloud rendering systems, including NVIDIA-derived CloudXR, unity-based render streaming, Microsoft Azure remote rendering, and Kujiale cloud-based home decoration and design platform. We compared these systems through their framework, technical features and rendering effects.

Key words: online real-time rendering; cloud rendering; Web3D; end-cloud collaboration; remote rendering

0 引言

5G时代,通过移动互联网进行可视化呈现的在线虚拟城市、在线虚拟家居、在线虚拟旅游以及在线虚拟教学等移动互联网应用已转化为以3维虚拟场景为主要交互对象并具有高度沉浸感的新型在线可视化应用,并在移动设备的辅助下消除了应用服务的距离和时间的限制。随着移动互联网技术和3维可视化技术的不断发展,以移动在线实时绘制技术为核心的3维可视化应用借助移动互联网在各类平台上得到广泛的传播。

移动在线实时绘制技术直接面向移动端设备,

对移动端设备的渲染研究十分重要。近年来,工业界对移动端绘制硬件构架的设计不断优化,这使得移动端硬件设备对渲染算法的加速水平不断提升,进而导致了渲染效果的突飞猛进,之前遥不可及的光线跟踪算法也逐步从电脑(personal computer, PC)端转向了移动端。因此,本文第1节对移动端的硬件发展和渲染算法进行了重点阐述。

对于移动互联网来说,移动设备并不是承载信息内容的唯一载体。在元宇宙产业蓬勃发展的今天,各类虚拟现实、增强现实、混合现实和扩展现实等领域的可穿戴设备也借助移动互联网不断出现在用户面前。因此,跨平台、轻量化的兼容性运行平台才是当前移动在线实时渲染技术发展的基础。作为

一个用户较广的轻量级的跨平台浏览环境,Web 端伴随着 Web3D 技术的发展逐步成为了这样一个平台。所以,本文第 2 节对 Web 端的核心渲染机制、关键渲染技术以及主流渲染工具进行了一定的说明。

虽然移动端和 Web 端渲染水平逐年提升,但是相对于桌面级终端的渲染能力来说,同属于瘦客户端。因此,如何借助像云服务器这样具有强大渲染能力的硬件设备辅助各类瘦客户端的高质量绘制成为移动在线实时绘制技术的未来。云渲染就是这样一种辅助式绘制技术,它将渲染任务分配至云服务器,然后通过视频串流回本地客户端,使得弱客户端能够获得高质量的渲染效果,当前主要运用于云游戏、在线扩展现实(extended reality, XR)应用等领域。因而,本文在第 3 节对云端在线绘制的基础构架、服务核心以及优化重点进行了详细的描述。

多端协同在线绘制技术是一种新型的移动在线实时绘制系统,它避免了云渲染系统中客户端渲染能力的浪费,也弥补了纯端渲染系统中客户端渲染能力的不足。作为一款倍受研究者青睐的全新实时

渲染技术,本文在第 4 节对端/云协同和端/边/云协同机制进行了深入的探讨。

综上,本文从移动端渲染、Web 端在线渲染、云端在线渲染和多端协同渲染 4 方面入手对移动在线实时绘制技术进行深入剖析,力求为移动互联网下的新型 3 维可视化应用提供技术支撑。

1 移动端渲染

1.1 移动端渲染硬件技术

移动端主流图形处理器(graphics processing unit, GPU)近年得到了较快的发展(如表 1 所示)。2020 年 5 月,ARM(Acorn RISC Machine)公司发布的基于第 2 代 Valhall 架构的 Mali-G78 的 GPU 已有 24 个计算核心,支持异步时钟域、自适应可扩展纹理压缩(adaptive scalable texture compression,ASTC)和 ARM 帧缓存压缩(ARM frame buffer compression, AFBC)等新型技术,降低功耗的同时,还进一步提升了芯片性能。

表 1 近期移动端 GPU 芯片表
Table 1 Table of recent mobile GPU chips

公司	产品	贡献
ARM	Mali-G78	首次支持 24 个计算核心的移动 GPU 芯片
	Mali-G710	相比 Mali-G78,性能提升 20%,能效提升 20%,机器学习提升 35%
Apple	A15	全新的移动 GPU 架构设计
Qualcomm	Adreno 660	比上一代 GPU 能效提升 20%,渲染速度提升 35%
Imagination	PowerVR GR6500	图像质量更逼真,能源效率高,性能高
AMD	Exynos 2200	能够支持桌面和笔记本电脑的 GPU 支持的光线跟踪

苹果公司于 2021 年发布的搭载在 iPhone 13 系列上的 A15 仿生芯片(如图 1 所示),其 GPU 采用了全新的架构设计,从硬件层面提供了有损压缩、稀疏深度和模板、随机和填充等新特性。高通公司的骁龙 888 芯片搭载的 Adreno 660 GPU,在能效提高 20% 的基础上,渲染图形的速度比上一代提高了 35%(如图 2 所示)。

与桌面端 GPU 相比,移动端 GPU 在电源功率、芯片面积、布线以及封装有一定的限制,因此该 GPU 的硬件架构较前者区别巨大。通常桌面端的中央处理器(central processing unit, CPU)和 GPU 各自独立存在,而移动端则将 CPU 和 GPU 集成在一

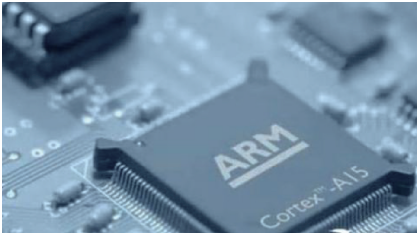


图 1 ARM 架构 GPU
Fig.1 GPU with ARM architecture

块 SOC(system-on-a-chip)芯片上,CPU 和 GPU 共享内存以及带宽等。因此,桌面端和移动端的 GPU 在构架设计上有很大的不同。

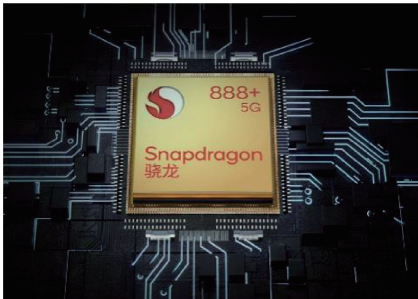


图2 高通骁龙 888 芯片
Fig. 2 Snapdragon 888 chip

相对于桌面端 GPU 采用围绕大量专用带宽而设计的即时模式渲染器(immediate mode renderers, IMR)架构而言,移动端 GPU 采用的是基于块的渲染(tile-based rendering, TBR)架构。与 IMR 相比,大量颜色和深度缓冲的来回读写,被隔离在片内的高速缓存中,每一块的帧缓冲在最终渲染完成后才会被写回主存,在最小化带宽消耗的同时,还控制了芯片的功耗和发热。

为了进一步提高渲染效率,移动端 GPU 采用了诸多新颖的设计。例如,为了不将计算资源浪费在对最终渲染画面没有贡献的片元上,移动端 GPU 会进一步延迟片元着色,以便在像素级别上实现 Over-Draw 的消除。每一块的图元光栅化成片元后,会等待所有片元全部经过深度测试后才进行片元着色,以确保只有离视点最近的片元才会被着色。

同时,近年来许多研究者对移动端 GPU 发展进行了研究(Surana 等,2020; Ain 等 2018; Singh 和 Jain,2014),并尝试对原有的移动端渲染硬件进行改进,探索更优的架构设计(Lee 等,2012; Gubran 和 Aamodt,2019)。

1.2 移动端渲染算法研究

由于设备功耗级别不同,移动端 GPU 的渲染能力通常不如桌面端 GPU,进而导致移动端渲染效果较后者略低。许多研究者从渲染算法和渲染优化出发来提升移动端 GPU 的渲染效果,以弥补其硬件渲染能力的先天不足(如表 2 所示)。

表 2 移动端渲染算法表
Table 2 Table of rendering algorithms on mobile

移动端算法	技术名称/贡献者	贡献
光线跟踪算法	RTX	硬件级实时光线跟踪
	MergeTree (Viitanen 等,2017)	面向 HLBVH Tree 的硬件加速
	自适应的多速率射线采样算法 (Lee 等,2016)	针对不同场景进行优化
	混合 fix 和 float 格式的优化方法 (Hwang 等,2015)	适应移动端低带宽的特性
	混合光线跟踪和光栅化架构 (Lee 等,2015)	高效利用移动端的高速缓存
	光线调度算法和非块缓存架构 (Shin 等,2015)	隐藏主内存访问延迟
移动端渲染优化	凤凰引擎	构筑了高效、无偏光线跟踪算法底座
	移动 GPU DVFS 策略 (Sun 等,2014)	通过估计纹理采样数来估计功耗
	基于能耗的实时渲染 (Wang 等,2016)	低能耗驱动的高质量绘制方法
	移动端“TBR”架构 (Olsson 等,2015)	利用移动端特有的架构(TBR)来进行大量光源渲染
	Z2 顺序遍历 (Nah 等,2016)	在 VR 应用中提高 GPU 缓存效率
	快速立体渲染 (Lee 等,2017)	加速在移动端 VR 中的桶形失真校正计算

1.2.1 移动端的光线跟踪算法

从 2018 年 NVIDIA 推出 GPU 的实时光线跟踪(ray tracing texel extreme, RTX)技术后,桌面端的实时渲染画质得到了极大提高。相应地,移动端也在积极尝试引入实时光线跟踪技术。

在算法方面,Viitanen 等人(2017)提出了一种

轻量化的 MergeTree 结构以加速 HLBVH(hierarchical linear bounding volume hierarchy)树,可用于在移动端上实时计算光线跟踪。为面向多场景进行优化, Lee 等人(2016)提出了一种自适应的多速率射线采样算法。为了适应移动端低带宽的特性, Hwang 等人(2015)提出了一种混合 fix 和 float 格式

的优化方法,用于减少移动端光追的带宽。Lee 等人(2015)提出了一种带宽和能源效率高的混合光线跟踪和光栅化架构。为了高效利用移动端的高速缓存,Shin 等人(2015)提出了一种有效的光线调度算法和非块缓存架构来隐藏主内存访问延迟,以实现移动设备上的实时光线跟踪。

在硬件以及软件开发工具包(software development kit, SDK)方面,移动设备芯片厂商 Imagination 公司(IMG)将光线跟踪分为6个级别,并早在2015年就展示了实时光线跟踪的 PowerVR GR6500 GPU。华为在其2021年的开发者大会上,推出了其光线跟踪模块“凤凰引擎”,通过多层 BVH 加速结构以及多叉树遍历算法,构筑了高效、无偏光线跟踪算法底座,并基于华为硬件平台的自研混合渲染管线,实现了实时光线跟踪技术在线移动应用。2021年10月,三星发布了基于 AMD(advanced micro devices)的 RNDA2 架构的 Exynos 2200 GPU,目前能够支持桌面和移动电脑的光线跟踪。这项技术预计将会引入三星的新一代智能手机,创造出更真实的光照效果。

1.2.2 移动端渲染优化

相比于桌面端,移动端的渲染硬件存在特殊的性能瓶颈。Martin 等人(2013)对其瓶颈的主要来源进行了分析,并给出了移动端渲染硬件需要解决的核心问题:散热。为了移动设备的轻薄性,往往需要将大量硬件集成到轻薄移动设备专用的主板上,高密度的硬件导致散热成为了难题。其次,控制设备产生的热量,以及提高移动设备的续航,这使得渲染硬件的功率也受到了极大的限制。

为了解决这些问题,开发者往往需要去估计一个渲染管线的功耗,或者在给定的电量预算下去寻找一个合适的渲染管线配置。针对功耗估计的问题,Sun 等人(2014)和 Yun 等人(2018)给出了通过估计纹理采样数、浮点运算吞吐量等方式来估计功耗。而 Wang 等人(2016)提出了一种在给定的渲染预算下和最低能量消耗的前提下,获取最优图形质量的方法。

为了缓解移动平台带宽瓶颈带来的影响,许多研究者提出了一系列如何高效利用带宽的方法。Martin 等人(2015)提出了在移动端优化高性能的物理渲染(physically based rendering, PBR)方案,该方案使用 ARM 架构特性进行高效的帧缓存读取,并

通过每个像素独立的局部存储单元高效利用带宽。Olsson 等人(2015)针对高度占用带宽的光源渲染算法进行研究,提出了利用移动端特有的架构“TBR”来做大量光源渲染的针对性的解决方案。

由于移动端的便携性,可以很轻松地与虚拟现实(virtual reality, VR)眼镜结合,为用户提供沉浸式的 VR 体验。近年来,如何给出更优质的移动 VR 体验受到广大研究者的关注。Lee 等人(2017)提出了一种全新函数用于加速在移动端 VR 中的桶形失真校正计算。Nah 等人(2016)提出了一种基于 tile 的移动架构的遍历顺序“Z2 遍历顺序”,可以最大化空间局部性的 tile 遍历以便在 VR 应用中提高 GPU 缓存效率。

1.3 移动端渲染工具

1.3.1 移动端图形 API

在图形应用程序编程接口(application programming interface, API)方面,OpenGL ES 作为目前应用最广的跨平台图形 API,支持 Android、iOS 等多个平台,但 OpenGL ES 在2015年8月更新至版本3.2后至今没有发布新的版本。作为 OpenGL 的替代者 Vulkan 将其目标聚集于“高效”和“跨平台”,旨在提供更高的性能和更均衡的 CPU/GPU 负载。得益于其多线程渲染管线和多线程指令流的实现,Vulkan 在移动端有着优秀的性能表现。目前,Vulkan 在 Windows、Linux、Android 等各大平台都有相关应用实现;以 Unity 和 Unreal 为代表的主流商业游戏引擎也逐步加强对它的支持。Metal 是苹果公司发布的兼顾图形和通用计算的 API,它是苹果公司专门为苹果产品定制,因此在苹果产品上有优异的表现。

1.3.2 游戏引擎中的移动端渲染

虚幻引擎4(UE4)的移动端渲染器独立于桌面端,拥有专门针对移动端优化的功能。然而,UE4 目前没有为移动端提供特定优化的渲染管线,对于较为复杂的图形功能没有提供较好的支持。在材质方面,UE4 移动端还停留在传统低复杂度的材质参数设置和材质着色计算上,不支持曲面细分、次表面散射等图形技术,也不能较好地模拟毛发、布料和眼睛等高复杂度物体的光照着色。阴影、雾等高质量渲染效果,也只提供如级联阴影映射(cascaded shadow maps, CSM)(Dimitrov, 2007)和大气雾等工业界传统的解决方案。在2021年5月份,Epic 官方发布了 UE5 预览版,在预览版中官方也未添加移动

端模块。

相对于 UE4 对移动端支持不足,Unity 对移动端则更加友好。Unity 在 2018.1 beta 版本中就开始引入了可编程渲染管线(scriptable render pipeline, SRP)的概念。通过编写脚本,用户可以在渲染管线层面控制场景的剔除、渲染方式和后期处理。在 2021 年初,Unity 为 SRP 添加了 Enlighten 实时全局光照系统,增加了间接光照计算部分,大大提升了画面表现力。之后,Unity 又在 2019.1 版本中引入通用渲染管线(universal render pipeline, URP)的概念。通过调整光照计算和阴影计算的方式,将所有的光照都放到一次渲染管线流程中,降低光照计算和阴影计算的能耗负担,为移动端提供更好的性能优化。近年来,Unity 更是与 ARM 深度合作,让其用户内容在各类移动设备上的能耗和带宽需求降至更低。

2 Web 端在线绘制

在移动互联网时代,Web 端是一个用户较广的轻量级的跨平台浏览环境。借助 Web 端进行 3 维呈现的在线虚拟城市、在线虚拟家居、在线虚拟旅游以及在线虚拟教学等 Web3D 应用打破了传统 Web 应用以文字、声音、图像、视频以及 2 维动画为主要传播媒体的惯例,进而转为以 3 维虚拟场景为主要交互对象并具有高度沉浸感的新型 Web 应用。随着各类 Web3D 应用的兴起并在多方面逐步影响人们的生活,用户对这些应用的体验需求也水涨船高。本节从 Web3D 渲染机制、Web 端渲染的关键技术和 Web 端渲染工具 3 个方面出发,深度阐述了 Web 端在线实时绘制的相关研究。

2.1 Web3D 渲染机制

随着软硬件平台的更新换代,一套免插件、高性能 Web3D 渲染机制不但是 Web 浏览器厂商的期许,更是广大 Web3D 应用开发者的期盼。21 世纪初,JavaScript 作为 Web 浏览器中默认的脚本语言,以其良好的兼容性和强大的可扩展性深受广大 Web3D 编程者的青睐。随着 JavaScript 虚拟机的巨大性能提升使得在同一个画框内 3D 空间中数以千计的顶点得以快速且准确的控制(Evans 等,2014),研发者对于在 Web 端实现免插件的高性能 3D 渲染技术充满希望,而通过 Web 浏览器借助 JavaScript 直接访问 GPU 的方法标准化需求已非常清晰。

在上述背景下,Khronos 组与主要的浏览器供应商 Apple(Safari)、Google(Chrome)、Microsoft(Edge)和 Mozilla(Firefox)合作,联合推出了一款 Web 端专属图形 API 的首个版本“WebGL 1.0”。WebGL 1.0 的内核来自于著名的移动端图形 API“OpenGL ES 2.0”,并以 JavaScript 作为开发语言,可以用于在大部分主流的 Web 浏览器中展示 2 维(two-dimensional, 2D)或 3D 图形。该图形 API 不仅可以使 GPU 加速图形处理,而且允许其内部函数借助 JavaScript 嵌入 Web 端的超文本标记语言(HTML)中,实现 3D 应用与 Web 端免插件无缝对接。2017 年,Khronos 组推出了 WebGL 升级版本“WebGL 2.0”,开始支持包括二次幂纹理、双精度浮点和 3 维纹理等在内的高级图形渲染功能(Frigo 等,2018),并受到 Firefox, Chrome 和 Opera 等主流浏览器的广泛支持。一直沿用至今的 WebGL 已被广大的 Web3D 应用开发者所接受,它的运行机制被认为是目前 Web3D 应用的主流渲染机制,并为时下种类繁多的 Web 端渲染工具提供了有力的技术支撑。

2.2 Web3D 绘制工具

2.2.1 Web3D 引擎

随着 Web3D 技术的发展,国内外出现了多款优秀的 Web3D 引擎(如表 3 所示),其中国外以 Three.js、Babylon.js 和 PlayCanvas 较为突出。

Three.js 由 Ricardo Cabello 在 2010 年首次发布,是基于 JavaScript 和 WebGL 搭建的 3D 图形渲染库,可以进行高效、免插件的网页端 3D 应用的研究。不少 WebVR 渲染系统采用了 Three.js 引擎,如 Marion 和 Jomier(2012)提出的网页可视化系统;Jacinto 等人(2012)的实时医疗图像的可视化分割系统,以及上述 Web3D 协同式光照渲染系统 Cloud Baking(Liu 等,2017,2018a)。

Babylon.js 是 Microsoft 公司于 2013 年发布的 Web3D 游戏引擎,底层完全基于 WebGL 图形 API。整套引擎通过 JavaScript 语言进行编写,同时还支持 TypeScript 语言,并把工作重心放在 Web3D 游戏开发上。

PlayCanvas 是 Will Eastcott 等人开发的一个开源 Web3D 引擎,包括 3D 游戏引擎、交互式 3D 应用程序引擎以及专有的云托管创建平台,允许通过基于浏览器的界面从多台计算机同时编辑,2017 年被 Snap Inc 公司收购。与 Three.js 引擎相比,PlayCanvas 开

表 3 Web3D 引擎
Table 3 Web3D engine

引擎	引擎公司	首发年份	底层 API	支持的语言	引擎定位
Three.js	Ricardo Cabello	2010	WebGL	JavaScript	开源,非商业引擎
Babylon.js	Microsoft	2013	WebGL	JavaScript/TypeScript	商业游戏引擎
PlayCanvas	Snap Inc.	2011	WebGL	JavaScript	开源商业游戏引擎,3D 应用制作引擎
Oasis	蚂蚁集团	2016	WebGL	TypeScript	开源商业游戏引擎/Web3D 应用制作引擎
Egret	白鹭科技	2014	WebGL	TypeScript	商业游戏引擎
LayaAir	Layabox	2016	WebGL	ActionScript3/ JavaScript/TypeScript	商业游戏引擎
Cocos3D	雅基软件	2016	OpenGL	C++/Lua/JavaScript	商业游戏引擎

发资源更为丰富、开发效率更为突出且具有专业的云托管平台(如图 3 所示)。



图 3 可编辑 PBR 材质(PlayCanvas)
Fig. 3 Editable PBR material(PlayCanvas)

国内的 Web3D 引擎以 Oasis、Egret、LayaAir 和 Cocos3D 最具代表性。这些引擎以 WebGL 或 WebGPU 为底层图形 API,结合各类脚本语言进行 3D 图形渲染库的搭建,形成具有各自特点的 Web3D 开发工具。

Oasis Engine 是由蚂蚁集团开发的 Web3D 互动图形引擎。以 WebGL 为底层图形 API,结合 TypeScript 语言进行开发。主要针对移动端,并且支持前端开发。

白鹭科技在 2014 年 2 月创立了白鹭引擎(Egret Engine),引擎使用 TypeScript 进行编写,其底层 API 仍是 WebGL。在渲染方面,Egret 使用了 Canvas 渲染技术,保证了其作品在浏览器上的兼容性。并且额外提供了 CPU 渲染模式和 WebGL 渲染模式,支持 WebAssembly 技术,其效果图如图 4 所示。

LayaAir 是 Layabox 于 2016 年发布的一款基于 WebGL 的开源引擎,支持 ActionScript3、JavaScript、



图 4 体积光照(Egret Engine)
Fig. 4 Volumetric lighting(Egret Engine)

TypeScript 这 3 种开发语言。该引擎同时支持 WebGL 与 Canvas 渲染,且优先使用 WebGL 渲染,在优秀浏览器环境下运行性能媲美 Unity3D 等桌面级游戏引擎。

Cocos3D 由雅基软件公司于 2016 年开发,以 OpenGL 为底层 API,其核心采用 C++ 编写,支持使用 C++、Lua 或 JavaScript 进行开发。基于 OpenGL ES 2.0 和 Metal 进行图形渲染。Cocos Creator 3D 将数据驱动和组件化作为其游戏开发的核心方式。

2.2.2 游戏引擎的 Web3D 渲染

Unity3D 是一个跨平台的游戏引擎,具有先进的 3D 图形功能。与上述 3D 渲染引擎相比,Unity3D 体现出渲染能力强、可扩展性高、程序开发复杂度低及跨平台性灵活等特点,它非常适合于打造多平台下高质量的实时视频游戏。在 Unity3D 中创建出的所有 3D 应用,可以导出相应的 Web 格式,并通过 Unity Web Player 插件在主流的浏览器中进行演示。因此本节仍然把其列为 Web3D 引擎的一员,尽管这只是它的小部分功能。Unity3D 支持的主要

开发语言有 JavaScript 和 C#, 其场景编辑器支持 3D 场景编辑的同时还可以将相应的脚本语言代码直接嵌入编辑对象中(Xie, 2012)。

UE5 是 Epic 于 2020 年公布的第 5 代游戏引擎, 具备照片级逼真的渲染功能、动态物理与效果、栩栩如生的动画、健壮的数据转换接口等。在第 4 代引擎 UE4 的基础上新增了高级别几何信息的虚拟微多边形几何系统“Nanite”, 并很好地优化了场景中全局动态的光照变化的实时性。从 UE4 开始, 该引擎对 Web 端采用容器的技术, 此技术是一种支持大规模云应用部署的技术, 具有轻量、可移植的特点, 为 Web3D 应用提供了一致的运行环境。

2.2.3 Web3D 绘制工具的渲染表现

Web3D 在线渲染效果取决于承载 Web3D 应用的硬件性能和支撑 Web3D 图形 API。如 2.1 节所述, 当前的主流 Web3D 应用的图形 API 是 WebGL 2.0, 该 API 派生自移动端图形 API——OpenGL ES 3.0 并承载其大部分的渲染表现。

虽然 Web3D 在线渲染无法实现光线跟踪这类高耗能的实时全局光照渲染算法, 但其渲染能力和绘制质量仍不可小觑。其中, 高性能的物理渲染 (physically based rendering, PBR) 是提升渲染质量 (Robart 等, 1999) 的有效手段, 尤其在制作全局光照渲染效果时, 表现显著。

国外的 Web3D 引擎 Babylon.js 和 PlayCanvas 就把 PBR 材质的可视化编辑作为其重要渲染任务之一。国内的 Web3D 引擎 Oasis 在其 PBR 工作流程中设置环境光的漫反射和镜面反射来达到基于图像的照明效果 (image based lighting, IBL) (Debevec, 2006)。

另外, 以软阴影效果为主的高质量光照遮挡技术也是体现 Web3D 渲染质量的一大看点, Babylon.js 就在其最新的 4.2 版本中支持基于环境光照遮挡的透明物体软阴影渲染 (如图 5 所示), 而 PlayCanvas 则支持多种软阴影算法, 并能在引擎运行时生成面向数十个静态灯光的光照贴图。

除材质和光影特效之外, GPU 动画加速、GPU 粒子系统加速、伽玛矫正、纹理混合和线性图形管道渲染等技术都在基于 WebGL2.0 的新一代 Web3D 应用或 Web3D 引擎中得以体现。

2.3 Web3D 渲染的轻量化关键技术

目前, 随着 Web3D 应用逐步被人们接受,



图 5 透明物体软阴影 (Babylon.js)

Fig. 5 Soft shadows of transparent objects (Babylon.js)

Web3D 数据内容 (尤其是 Web3D 场景内容) 复杂度和规模与日俱增, 典型的应用包括: 在线虚拟校园、在线虚拟博物馆和在线虚拟城市等。虽然网络带宽与网速也在不断提升, 但远远跟不上 Web3D 数据的扩张速度。因此, 在线大规模 Web3D 场景即时加载成为 Web3D 应用的瓶颈问题, 受到广大研究者的关注。当前解决这一问题的关键技术分为两类: 1) Web3D 场景的轻量化技术; 2) 渐进式对等传输技术。

2.3.1 Web3D 场景的轻量化技术

虽然计算机图形学方法中早对 3D 场景的轻量化处理有所涉及, 如: 细节层次技术 (level of detail, LOD) (李公立和黄毓瑜, 2004)、渐进式网格技术 (progressive meshes, PM) (Hoppe, 1996; Ma 等, 2016) 等。但这些技术并不完全适用于在线 Web3D 应用中的虚拟场景。离散型 LOD 模型只能使得网络负载更加沉重; 渐进式网格会引起网页端在线解析时间过长且不适用于所有模型。因此, 如何同时使得场景的数据量更小、网络传输速度更快以及到达网页端的后处理 (在线解析和渲染) 时间更少才是 Web3D 场景轻量化的最终目标 (涉及技术如表 4 所示)。

近来研究者为靠近上述目标提出了新的轻量化方法: 基于单元重用的模型轻量化方法 (Shikhare 等, 2001; Cai 等, 2009)、基于几何最小化的 3D 数据压缩算法及基于并行快速匹配搜索的解压缩算法 (Siddeq 和 Rodrigues, 2016)、基于贝叶斯学习算法及傅里叶变换的压缩/重建方案 (Lalos 等, 2017) 就是其中的代表。这些方法使得 Web3D 场景在几乎无损轻量化的同时未增加网络负载, 且对模型的通用性更佳。

表 4 3 维模型轻量化处理技术表
Table 4 Table of 3D model lightweight technology

技术	贡献
PM(Hoppe,1996)	PM 将物体模型分为表示最低分辨率模型的“网格增量”
LOD(李公立和黄毓瑜,2004)	为 3 维模型在网络上的传输提供了稳定可靠的实现方式
LPM & LPT(Englert 等,2015)	形成了轻量级 Web3D 建模的新框架
SPM(Ma 等,2016)	避免复杂的二叉树构建,使得压缩时效大大提高
LPM(Wen 等,2016)	改进了几何查重的轻量化建模算法并将其与 PM 有机整合
LightweightIFC(Liu 等,2016)	成功地将 GB 级别的大型建筑场景在网页上实时在线可视化

另外,更有学者将新型方法与传统方法结合,提出了轻量化渐进式纹理(Englert 等,2015)、轻量化渐进式网格(Wen 等,2016)和建筑模型轻量化语义表达(Liu 等,2016)等混合改进型轻量化方法,为 Web3D 场景的轻量化处理再添新的思路(如图 6 所示)。

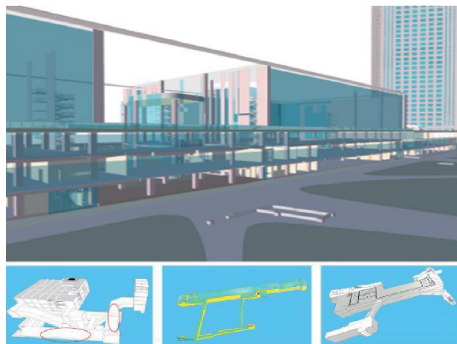


图 6 在线大型 BIM 场景 Web3D 绘制(Liu 等,2016)
Fig. 6 Online Web3D rendering of large-scale BIM scenes
(Liu et al., 2016)

2.3.2 渐进式对等网络传输

针对大规模 Web3D 场景的网络传输,传统的解决方法仍然集中在渐进式传输机制上。该机制源于计算机图形学的渐进式加载技术,通过分步增量式的加载大规模 Web3D 场景模型来解决模型数据传输的网络负载过重问题。为了提升增量式加载的准确性,双层扇形兴趣域(double-layer sector of interests, DAOI)(Wen 等,2016)、扩展多层兴趣区(scalable multi-layer sector AOI, SMLAOI)(贾金原 等,2014;Jia 等,2016)和路径兴趣域(path of interests, POI)(Wang 等,2015a)等加载增量预测算法相继被提出。

研究者们把渐进式传输机制常与对等传输网络(peer-to-peer networking, P2P)环境有机结合,提出

了兼具增量式传输和对等传输双重优势的渐进式对等网络传输机制(Yahyavi 和 Kemme, 2013; Buyuk-kaya 等,2015)。在此基础上,王伟等人(2010)提出了面向对等网络的新型渐进式场景更新策略;Hu 等人(2008, 2010)自主研发了仿真对等传输平台“FLoD”;Jia 等人(2014)在 FLoD 基础上进一步提出了可扩展多层兴趣区域的数据加载框架,并把 FLoD 升级为更智能的仿真对等传输平台“iFLoD”;Jia 等人(2014)提出了基于路径兴趣域数据加载框架,将 iFLoD 升级为兴趣域相关的仿真对等传输平台“interest-iFLoD”。

上述研究大多是针对 P2P 网络架构场景流式传输方法研究(如表 5 所示),很少关注用户本身和场景数据,随着场景规模扩大和用户访问量增大,多用户协同访问及资源搜索、节点定位等处理变得复杂,这使得基于 P2P 的 Web3D 应用中的场景数据传输和交互实时性面临严峻考验。因此,为 Web3D 场景的对等传输提供构建合理、布署方便以及访问高效的技术框架是研究者们亟待解决的下一个研究热点。

3 云端在线绘制

云端在线渲染的本质是远程渲染,其出发点是希望把繁重的渲染任务迁移至远程服务器而使得瘦客户端也能进行高质量渲染效果展示(MacIntyre 和 Smith, 2018)。在云计算的协助下,远程渲染系统中的渲染任务被迁移至云服务器中,并逐步形成云端在线绘制技术(Hou 等,2017)。近年来,随着 5G 通信和互联网技术的发展,以追求高质量渲染和快交互响应为目标的移动云游戏(Hou 等,2021)成为云渲染技术的主要应用领域(Liu 等,2018a)。从云端

表 5 渐进式传输与对等传输相关技术
Table 5 Technologies of progressive transmission and peer-to-peer transmission

	技术和文献	贡献
渐进式传输	DAOI(Wen 等,2016)	双层扇形可扩展兴趣域
	SMLAOI(贾金原 等,2014)	加载的场景增量进行细粒度化处理
	Advanced SMLAOI(Jia 等,2016)	在 SMLAOI 方法的基础上加大细粒度化程度
	POI(Wang 等,2015a)	基于用户足迹的兴趣域动态预测
渐进式对等传输	DVE-P2P(Hu 等,2010)	提出仿真对等传输平台 FLoD 提出了 DVE-P2P 传输方法
	interest-iFLoD(Jia 等,2014)	提出了基于路径兴趣域 POI

在线绘制的目标入手,重点讨论云端在线绘制系统的构架与服务、优化以及核心应用“云游戏”。

3.1 云绘制系统的构架与服务

在实际应用中,把所有绘制任务完全放在客户端,会受到客户端的能耗、算力和兼容性等诸多因素的影响。因此,工业界通常借助远程云服务器进行高质量的图形绘制,再将绘制结果传输到客户端设备上图形显示,使得轻量级的客户端也能支持高质量的绘制应用。而这个过程就是云绘制过程,完成此过程的系统称为“云绘制系统”,其框架如图 7 所示。

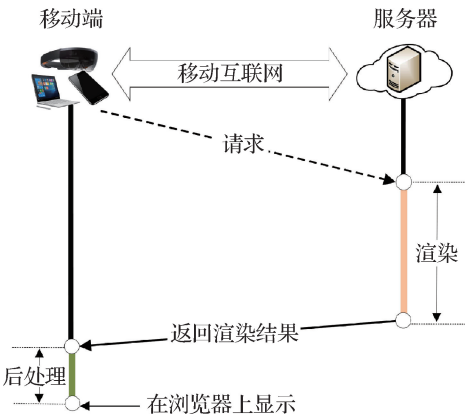


图 7 云绘制架构
Fig. 7 Cloud rendering architecture

该框架以端云分离绘制技术为基础,云侧的绘制和端侧的绘制是分开进行的。它的端侧只负责渲染任务的申请和渲染结果的显示,完全不承担渲染任务;而服务器端负责所有渲染任务,其渲染结果会通过移动互联网流式化传往移动前端。

作为一种云计算服务,云绘制可以分为 3 层:基

础架构即服务(infrastructure as a service, Laas)层、平台即服务(platform as a service, PaaS)层、软件即服务(software as a service, SaaS)层,分别用于满足云绘制应用在底层硬件、中间平台和高层软件的不同层次需求。其中,PaaS 层作为云绘制服务的核心层,主要提供 3 大功能:1)完成 3D 可视化应用(包含 VR 应用)的自动化托管;2)优化用户的计算资源和网络资源的调度;3)实现多媒体数据的多终端稳定流式化传输。在这 3 大功能中,流式化传输功能是 PaaS 层的关键功能,可细分为多终端的操作信息获取和传送、绘制画面抓取编码和超低延迟传输以及端侧的解码和显示,是云绘制服务的优化重点。

3.2 云绘制优化

如 3.1 节所述,云绘制的优化重点集中在串流技术的优化上。串流技术就是对影音等多媒体数据(尤其是视频数据)进行流式化传输的技术总称。虽然串流技术在视频应用中优势明显,但依托此类技术的视频传输依然存在数毫秒到上百毫秒的延迟(Choy 等,2012; Tolia 等,2006)。由于缓存技术的支持,此类延迟在视频点播应用中可被忽略,然而对强调互动性的视频游戏或增强现实(augmented reality, AR)/VR/XR 等应用的用户体验质量却影响巨大(Chen 和 El-Zarki,2019; Slivar 等,2014)。然而,视频的压缩率与带宽次线性相关的同时,吞吐量需求却依然不断地随着分辨率和帧率的提高而提高,并且图像质量也会因为无损的压缩方式而无法最优化(Sullivan 等,2012)。

另外,在云绘制过程中,移动端从提出渲染请求到接收渲染结果并显示,需要至少一次往返时间,而这些时间是云绘制过程中无法避免的交互延迟时

间。交互延迟会导致用户自然以为云绘制应用的交互响应过长,实时性不够,从而在体验(尤其是视觉体验)过程中产生顿挫感。减少交互延迟的影响,提升视觉体验是云绘制优化的另一个重点。McMillan(1997)提出的3D warping是一种将参考图像上的像素映射到任意视点的技术。它广泛用于3D视频处理(Smolie等,2008)和基于图像的实时渲染中(Fehn,2004;Mori等,2009)。Shi等人(2012)以及Zhu等人(2011)应用3D warping在他们的远程渲染系统中把接收到的渲染图像中的像素全部扭曲到交互延迟后的视点下,从而在视觉上减少了“交互延时”带来的影响。然而,当输入图像中的信息不足以生成新视点时,3D warping会产生孔伪影失真。面对这一问题,很多解决方案相继提出,包括分层深度图像(layered depth images, LDI)(Shade等,1998),splat warp(Mark等,1997),super-visual distortions(Bao和Gourlay,2004)等。

3.3 云游戏

作为云端在线绘制系统的核心应用,云游戏已经成为一种新的计算机游戏范例,它通过在云服务器上运行视频游戏并将渲染的帧流式传输给用户,不受时间、空间和设备性能的限制(Laghari等,

2019)。为了达到用户的体验质量要求,云游戏提供商必须面对3个主要挑战:减少交互延迟、降低云基础架构成本以及降低网络带宽需求。

为此,研究者们提出多种优秀的边缘/云渲染构架或系统(如表6所示);Bhojan等人(2020)提出了CloudyGame构架,该构架要求在不同的游戏实例之间更有效地共享和管理资源,并促使游戏资源流式化任务传往前端以降低初始化成本。Zhang等人(2019b)提出了EdgeGame框架,该构架除将计算密集型渲染工作卸载到了网络边缘外,还在边缘引入了深度强化学习,使其自动地调整视频比特率以适应网络动态变化。Chen等人(2019)提出的T-Gaming游戏框架采用了优先视频编码和自适应实时流媒体技术,可以有效提高用户的体验质量。Cai等人(2018)基于组件的认知能力设计出UBCGaming系统,能够有效平衡系统性能和交互延迟,可以提供更好的游戏体验。Pitkänen等人(2019)设计了一个面向移动设备的VR云游戏系统,在这种端到端的方案中,VR游戏的执行从低功耗的移动设备端被卸载到边缘/云服务器,在边缘/云服务器上根据控制器的方向和通过网络传输的动作来呈现已执行的游戏。

表6 云游戏构架表

Table 6 Table of cloud game architecture

技术	贡献
UBCGaming(Cai等,2018)	有效平衡系统性能和交互延迟
T-gaming(Chen等,2019)	采用优先视频编码和自适应实时流媒体技术
EdgeGame(Zhang等,2019b)	引入深度强化学习
VR云游戏系统(Pitkänen等,2019)	根据控制器的方向和通过网络传输的动作来呈现已执行的游戏
CloudyGame(Bhojan等,2020)	促使游戏资源流式化任务传往前端

4 多端协同在线绘制

多端渲染系统不同于远程渲染系统仅将渲染任务放于远程服务器,而是将渲染任务分摊放于“端服”协同执行(Chen和El-Zarki,2019)。随着云计算和边缘计算的先后提出,该系统也从“端云”协同逐步转向“端边云”协同。

4.1 端/云协同

“端云”渲染系统的协同机制体现在渲染任务

的分摊上。该机制充分发挥前端的渲染能力,同时降低后端的渲染负载,使系统达到一定程度的负载均衡。此类渲染系统通常借助渲染方程的拆解,目前已有不少出色的研究成果,通过云端输出图像的视点相关性,可分为:1)视点相关端云渲染系统协同。该机制要求前后端渲染结果的视点一致。此类系统如:Crassin等人(2015)提出的协同式光照渲染系统“Cloud Light”,该系统首次涉及光照渲染任务的“端云”分摊问题;Liu等人(2018a)提出的面向Web3D的协同式光影渲染系统“Cloud Baking”,把

简单的直接光照渲染任务放于 Web 前端,而把复杂的全局光照渲染任务放于云后端,最终的渲染结果将在 Web 前端合成并输出,为了优化该系统,该团队构建了基于光图树的预渲染机制(刘畅等,2019),并提出了基于设备性能的 Web3D 动态实时光影云渲染系统(刘畅等,2021),进一步细分了“端/云”两侧各自的渲染任务。视点相关多端协同渲染系统对交互延迟十分敏感,一旦延迟发生必然使得前后端视点不一致,进而导致依靠两端结果融合的输出结果失真。对于延迟造成的输出结果失真,此类系统通常依靠视点矫正技术(Jiang 和 Gu,2015)予以解决。2) 视点无关端云渲染系统协同,该机制不再要求前后端渲染结果的视点一致。此类系统如:Bugeja 等人(2019)和邵威等人(2020)提出的协同式光照渲染系统,普遍延续了光照渲染分摊模式,只是云端对全局光照的处理方法有所不同,前者采用基于场景体素化的环境光遮挡算法,而后

者采用的是基于稀疏体素化的 Lightmap 算法。当然,这两种算法都是视点无关的。此类系统对交互延迟有一定容忍度,但云端必不可少地会存储更多的光照信息图像。因此,对于这两种系统的选择应该充分平衡系统的交互性和存储消耗。除此之外,近年来研究者们还探索了实时渲染过程中着色计算与光栅化计算的“端云”协同分摊机制,Mueller 等人(2018)提出的着色图集流式传输(shading atlas streaming, SAS)协同渲染系统把绝大部分着色任务分摊到云端,并将可见区域渲染图像汇聚成一个着色图集,而前端只需对可见模型进行光栅化处理并对云端图集进行纹理采样即可;Hladky 等人(2019)在此基础上引入了细分曲面着色器,使得云端着色任务可以进行多线程硬件加速,提升了系统效率。总体而言,此类分摊机制的空间占用率高,对云端算力的需求较大,但对弱前端的支持力度明显。如表 7 所示。

表 7 多端协同的渲染系统
Table 7 Table of multi-terminals collaborative rendering system

视点相关性	技术	贡献
视点相关	Cloud Light(Crassin 等,2015)	光照渲染任务的“端云”分摊
	Cloud Baking(Liu 等,2018a)	在 Cloud Light 系统基础上引入 3D Warping 方法
	基于光图树的预渲染机制(刘畅等,2019)	构建“光图树”结构以梳理预渲染图像
	基于设备性能的 Web3D 动态实时光影云渲染系统(刘畅等,2021)	前端设备性能引导“端/云”两侧渲染任务
视点无关	协同式光照渲染系统 (Bugeja 等,2019)	分摊直接/间接光照
	基于光照贴图的 Web3D 协同云渲染系统(邵威等,2020)	引入 Lightmap 算法量化后端云渲染
	SAS(Mueller 等,2018)	把着色任务分摊到云端

4.2 端/边/云协同

随着边缘计算融入“端云”协同渲染系统中,该系统的渲染方式将发生极大的改变。由于边缘服务器距离前端比云服务器距离前端更近,因此将计算密集型的渲染任务从前端卸载到边缘端,可以减少网络延迟和带宽的消耗(Zhang 等,2019a)。对于边缘承载的任务,Chatzopoulos 等人(2017)根据边缘端的设备特点给出了两套方案:1) 负责计算和渲染任务;2) 只负责计算任务,渲染任务留在本地。在此基础上,Zhang 等人(2019a)通过测试编码和渲染任务在不同边缘设备上分离的表现来判定边缘设备提高渲染服务质量的标准。Trinelli 等人(2019)提

出 NEAR 框架以支持网络功能虚拟化对混合现实(mixed reality, MR)设备的边缘计算加速。另外,Chen 等人(2017)使用 Gabriel 平台实现了 7 种不同可穿戴设备的认知辅助,并测试了 AR 应用程序在不同设置和使用不同硬件中的延迟。Bachhuber 等人(2019)提出了一个将 AR 渲染任务卸载到边缘的研究。他们特别关注通过优化编码和解码步骤来降低端到端的延迟,最终实现了 83.5 ms 的端对端延迟。总体看来,“端边云”渲染系统的任务协同机制目前没有较为统一的标准,视目标的不同“端边云”协同的机制也不同。

综上,“端边云”渲染系统的协同机制比“端云”

渲染机制更为灵活,但不可控因素更大,容易对边/云算力造成极大的影响。

4.3 多端协同渲染的调度

多端协同渲染调度问题需要优化服务的操作成本和用户的端到端性能,涉及多个互相冲突的系统目标(如:并发用户数、用户交互延迟、渲染帧率、运行速度以及用户浏览系统的平均响应等因素),这些目标形成离散的、非凸的高次多项式函数,具有一定的耦合性。

Wang 等人(2019b)对多端渲染系统的核心业务流程,尤其是多任务渲染流程进行了理论分析,并提出了独特的参数调整策略,即通过优化系统中服务器和渲染机的相关配置参数以提高系统的性能。在此基础上,该团队还提出一套支持服务器集群负载均衡、渲染机静态扩展和并行任务调度的多端协同云渲染系统(Wang 等,2020)。整套系统的多任务渲染器和云渲染系统遵循一套通讯机制,可以很好地满足并发用户的渲染需求。Lai 等人(2017)提出一种针对“移动端/云”混合渲染的服务质量感知资源调度策略,该策略将“端/云”两侧的图形处理单元相结合。当网络带宽不稳定时,该技术能够评估当前的网络带宽,并在“端/云”动态配置渲染任务。即使客户端无法访问网络,也仍然可以通过本地计算机上的图像处理单元执行绘制任务。

动态服务调度在云环境中得到了广泛的研究,包括虚拟机合并(Guo 等,2018b)、负载均衡(Le 等,2014)以及网络功能链接(Guo 等,2018a)等。然而,这些研究通常并不针对外部环境的可变性所带来的影响,因此与本项目相比是不够的。最近的研究已开始侧重于通过在线服务放置和迁移来解决微型企业环境中用户动态的关键挑战(Wang 等,2015b)。此类工作并不一定需要预测用户动态行为,但是针对用户移动性则可以用马尔可夫链来近似的假设,Taleb 等人(2019)制定了一个用户的马尔可夫决策过程以跟踪用户的最佳用户感知延迟;Wang 等人(2019a)根据用户在 MEC(mobile edge cloud)网络周围的移动来分配用户的工作负载,以优化随时间推移的操作和迁移成本;Chen 等人(2018)在选定的 MECs 上放置服务实例,并随着时间的推移改进放置决策。

针对多端动态协同渲染系统,其资源的调度通常基于优化算法获取当前某时刻应用情境的最优化

配置。然而,渲染系统的实际外部情境下却是复杂多变的,某时刻的最优化配置无法满足系统的动态调度需求。因此,如何设定智能且高效的资源调度配置方案,以适应复杂应用情景的动态变化,成为多端协同渲染调度未来研究中的又一个关键问题。

5 工业界中的在线实时云绘制

在实际应用中,纯端绘制会受到能耗、算力和兼容性等因素的影响。因此,在工业界的生产环境中的一类重要技术发展趋势就是通过远程服务器进行高质量的图形绘制,再将绘制结果传输到端设备上,进行图形显示,使得轻量级的客户端也能支持高质量的绘制应用,这就是工业界引入远程渲染的开端。

基于远程服务器算力的实时云绘制技术在实现上没有统一标准,通常由厂商根据具体的落地应用场景进行深度定制。这些定制重点关注:硬件集群的资源调度与管理、串流能力和网络自适应算法的优化、多终端的操作信息获取和传送、渲染画面抓取编码和超低延迟传输以及端侧的解码和显示等多维度外围技术。

因此,本文立足工业界,列举了包括微软、英伟达、Unity、华为和酷家乐在内的国内外一线云绘制服务企业的经典云绘制系统,分析并对比了这些系统的设计框架和技术特点,为实时云绘制技术的最终落地提供参考。

5.1 CloudXR

CloudXR 是美国英伟达公司提出的一套云渲染系统,旨在解决包括头戴式显示器、手机和平板等瘦客户端设备在内的前端渲染能力不足问题。CloudXR 本质上就是一套远程渲染系统,其系统框架如图8所示。它的主要绘制任务完全放置于边缘/云服务器中,整个绘制过程通过借助英伟达的虚拟化软件调用服务器端 GPU 得以完成(Gül 等,2020)。绘制结果借助 5G 或 Wi-Fi 网络以视频格式串流至前端,解决了包括无线 VR/AR 应用以及移动端在线 3 维可视化应用、移动 3 维视频游戏在内的瘦客户端应用渲染质量低下的问题。

在数据传输过程中,CloudXR 充分利用 5G 网络优先将视频流推送到近端边缘服务器中,之后以更低的网络延迟将视频流迅速推送至各类客户端设备(Liubogoshchev 等,2021)。另外,NVIDIA 还为 Cloud-

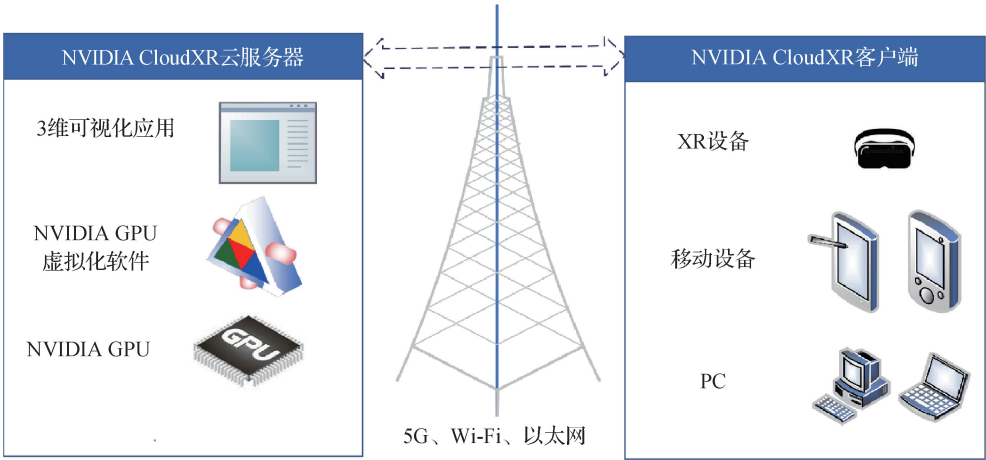


图8 CloudXR 系统架构

Fig. 8 CloudXR system architecture

XR 提供了 5G 移动边缘计算开发包,给高质量三维可视化应用在“瘦”客户端设备(移动设备、XR 设备、弱 PC 设备)的落地提供了稳定的开发环境。

5.2 Unity render streaming

Unity render streaming 是架构在 Unity3D 游戏引擎上的一套云渲染解决方案。框架如图 9 所示,它基于 WebRTC 标准建立长连接,实现了高质量 Unity3D 可视化应用在 Web 端的实时展示与交互控制(Tandianus 等,2018)。

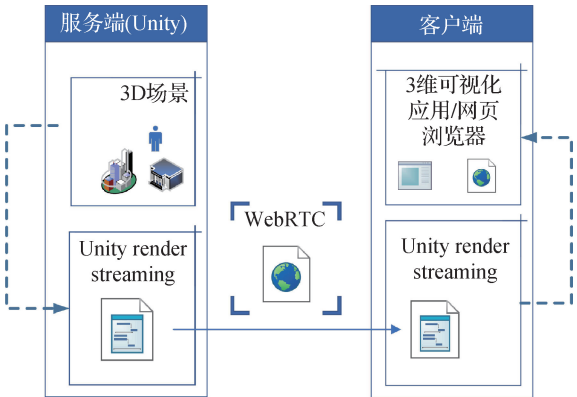


图9 Unity render streaming 系统架构

Fig. 9 Unity render streaming system architecture

该方案的网络构架较为简单,遵循服务器就近分配原则,一般选取本地云服务器进行点对点的端云直接链接,排除任何中间服务器中转,如图 10 所示。

由于架构在成熟的游戏引擎中,并以 WebRTC 为基础,Unity render steaming 有其独特的优势:1)该

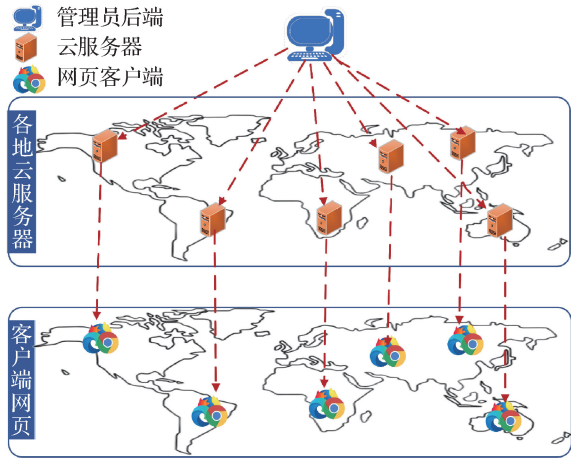


图10 Unity render streaming 网络架构

Fig. 10 Unity render streaming network architecture

方案通过引擎内核来支持图像截取,绕开了桌面合成引擎,降低了延迟(Tan 等,2021);2)支持 Unity 所有的渲染特性,支持 URP、支持 HDRP(high definition render pipeline),也可以支持 Builtin 管线;3)支持自适应码率,串流带宽占用较低;4)支持包括 Edge、Firefox、Safari 和 Chrome 在内的主流网页浏览器,体现一定的兼容性。对于广大游戏开发者而言,尤其是 Unity3D 引擎的使用者,Unity render steaming 是一套行之有效的工业级云渲染方案。

5.3 Azure remote rendering

Azure remote rendering (ARR) 是美国微软公司开发的远程渲染系统,系统框架如图 11 所示,该系统通过移动互联网将渲染任务卸载至云服务器中,并通过委托在云服务器上的图形渲染引擎获得高质

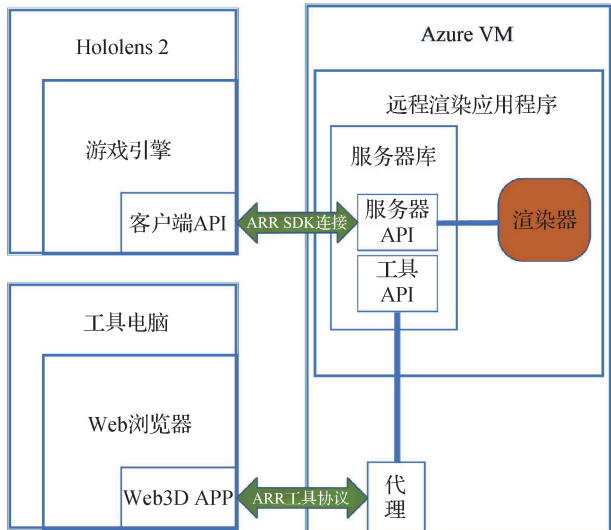


图 11 ARR 系统架构

Fig. 11 ARR system architecture

量渲染帧,最后将这些渲染帧流式化传输至各类微软支持的移动终端或 XR 终端中(Chilberto 等,2020)。

ARR 针对渲染任务的不同,制定了混合渲染和多 GPU 渲染两种方案:1)混合渲染是一种端云协同式渲染方案,前端负责用户交互式(user interface, UI)的设计与渲染,后端负责应用的核心渲染任务,两端的渲染结果最终都在前端混合并输出。2)多 GPU 渲染是一套并行渲染方案,该方案将复杂的渲染任务合理地分摊至多个高端 GPU 上,最终将多个 GPU 上的渲染结果进行合并以产生最终的输出图像(Jaya 等,2020)。

ARR 的推出主要是为微软旗下的 MR 设备(Hololens)提供技术支持,然而随着系统体系日趋成熟,ARR 也逐步成为一套通用的工业级云渲染解决方案。

5.4 酷家乐云设计

酷家乐家装云设计平台(酷家乐云设计)是一套 Web/云协同渲染平台(Zheng 等,2020),如图 12 所示,其中 Web 端是平台的主要入口,用户在 Web 端通过各垂直细分领域工具,产生 3D 数字内容,并根据不同的业务需要,提供不同的绘制结果;云端除基础服务外还包含了一个超大规模的 XP 绘制集群,通过集群管理,向用户提供真实感的绘制结果,并以图片或视频等方式传送到端。

平台的整条技术链路随着业务迭代的复杂度上

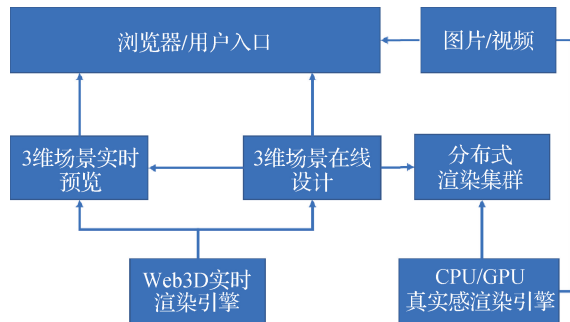


图 12 酷家乐家装云设计平台

Fig. 12 “Kujiale” cloud design platform for decoration

升,端与云侧的图形绘制均呈现了比较大的挑战,具体表现如下:1)Web 端复杂业务及场景带来的各类问题:(1)场景复杂度,WebGL 难以充分发挥现代 GPU 优势,绘制效果与绘制性能的平衡;(2)大场景性能带来的不可控;(3)细粒度的几何场景编辑;(4)不同业务需要带来的绘制效果要求与性能平衡。2)复杂业务带来的离线绘制引擎性能与用户期望的快速出图:(1)复杂场景(数以亿计的三角面片);(2)硬件架构如何最优;(3)服务器空闲带来的成本问题;(4)绘制内容的多样化,如图片、视频和动画等。

针对上述问题,酷家乐云设计平台基于自主材质体系,构建了一套较为完备的从 Web 端到云端的图形绘制引擎基础设施:1)Web 端的底层是 WebGL 图形显示引擎,上层是设计工具及垂直应用。2)云端的底层是 XPU 绘制引擎,上层则是多机器集群通过端云方式,端发送数据到云,同时云端生成绘制结果返回到端。基于不同的业务应用,云端提供不同的方式返回到端。最终,酷家乐云设计已经能够作为国内在线家装设计领域的一线平台,给广大用户(包括移动端、PC 端)提供高质量的家装设计结果(如图 13 所示)。

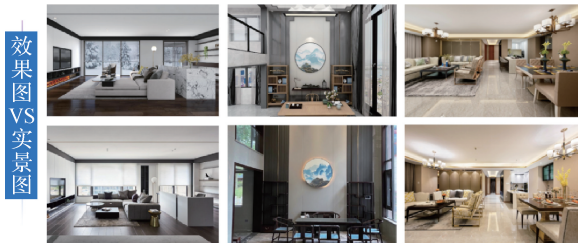


图 13 酷家乐的家装效果图和实景图比较

Fig. 13 “Kujiale” decoration renderings vs. actual decorations

综上,通过对比国内外著名的一线云渲染系统或解决方案(如表 8 所示)可以看出,整个工业界的在线三维可视化应用当前正在经历一次由端云协同驱动的远程渲染变革。虽然移动端和 Web 端这些瘦客户端不断地优化自身的渲染算法,但

对能耗的平衡必然导致此类前端设备在渲染能力上远低于桌面端设备。为此,以在线实时云渲染为代表的远程渲染技术随着网络带宽的不断增大,逐步成为当下不可或缺的在线实时渲染技术之一。

表 8 工业界云渲染系统
Table 8 Industrial cloud rendering systems

云渲染系统	公司	特点
CloudXR	英伟达	降低了 XR 应用的开发和使用门槛并利用 5G 网络优先将视频流推送到近端边缘服务器
Unity render streaming	Unity	基于 WebRTC 实现 Unity3D 在 Web 端的高质量实时展示与交互控制
Azure remote rendering	微软	针对渲染任务不同,提供两种不同渲染方案
酷家乐云设计	酷家乐	能够快速获得渲染结果,其结果足够接近现实

6 发展趋势与展望

当前,随着元宇宙及 Web 3.0 概念的兴起,整个 3 维可视化应用正在经历一次由移动互联网驱动的在线实时化绘制变革。虽然近年来移动端 GPU 渲染能力稳步提升,然而受功耗、带宽以及布局空间等先天条件制约,它与桌面端 GPU 的性能差距一直在不断拉大。为了满足移动互联网用户对设备绘制能力需求的提升,同时兼顾移动端设备的功耗级别与负载均衡,设备厂商提出了包括 SOC 芯片集成构架、TBR 渲染构架和延迟片元着色等一系列面向移动端的渲染优化设计。研究者们则另辟蹊径,不仅对高耗能实时光线跟踪算法的移动端实现提出了挑战,而且面向功耗和带宽的先天不足提出各种优化渲染策略。引擎开发商也不逞多让,以 Unreal 和 Unity3D 为代表的 3D 游戏引擎,紧随移动互联网发展的潮流,为移动端提供了通用的渲染管线和良好的可视化的 3D 应用制作平台。

Web 端作为轻量级跨平台的主流浏览环境,在移动互联网时代下仍然拥有极高的用户群体。随着诸如 X3D、WebGL 和 WebGPU 等各种 3 维图形 API 的提出,Web 端已经具有制作 3D 应用的核心技术,具有高度真实感和沉浸感的 Web3D 应用开始展现在用户面前。随着移动互联网技术的推波助澜,Web 在线 3 维实时绘制研究已经向超大规模场景实时绘制、照片级真实感和沉浸式交互感等多个目标

发起挑战。为此,研究者们针对超大规模场景轻量化、场景的细粒度化、对等传输、基于 PBR 的真实感材质、实时全局光照绘制以及 GPU 加速动画绘制等多个方面展开了相关研究。

虽然移动端和 Web 端这些瘦客户端不断地优化自身的渲染算法,但受能耗的限制必然导致此类客户端在渲染能力上远低于桌面客户端。为此,以在线实时云绘制为代表的远程绘制技术随着移动互联网带宽的不断提升,逐步成为当下不可或缺的在线实时绘制的辅助手段之一。当前,云绘制的主要任务有 3 个方面:3D 应用的自动化托管、资源调度和串流技术的应用,其中串流技术的应用是云绘制的核心。因此,各大云服务厂商和研究机构把云绘制的优化重点放在了串流技术的优化上,包括视频流的无损/低损压缩技术和视频流质量优化等。

然而,云绘制技术过度依托云服务器的渲染能力,完全忽略了前端设备。考虑到目前的瘦客户端的渲染能力已经发展到一定水准,让端云同时发挥各自绘制能力的“端云协同”技术将成为未来主流的移动在线实时渲染技术。端云协同的重点在渲染任务的分摊上,包括:光影渲染任务的分摊、着色器渲染任务的分摊和光栅化渲染任务的分摊等。渲染任务分摊好之后,让前端根据其绘制能力适当地承担其力所能及的渲染任务,不仅可以提高前端设备的利用率,而且降低了云服务器的绘制负担。展望未来,随着边缘计算和云计算的迅速普及,移动互联网的在线协同绘制构架已经从简单的端/云构架,逐

渐演变成较为复杂的端/边/云构架。面对新的构架,全新的端/边/云渲染任务的分摊成为协同渲染的一个研究目标。另外,当前多端渲染系统的计算调度模式固化,在不同设备性能、不同软件平台和不同网络条件的复杂外部环境下,智能化协同调度机制使得整个多端渲染系统的性能无法发挥最佳水准,是当前端/边/云协同在线绘制的另一个重点研究对象。此外,随着 WebGPU 的普及,WebAssembly + WebGPU 的组合方案预计会成为复杂在线 3D 场景的主流底层技术方案之一,基于该方案下的实时绘制效果也能得到更好的提升。

致谢 本文由中国图象图形学学会虚拟现实专业委员会组织撰写,该专委会更多详情请见链接:
<http://www.csig.org.cn/detail/2385>。

参考文献 (References)

- Ain Q U, Saddique A, Tariq I, Maqsood T B, Ishaq I, Zafar S and Malik B H. 2018. Comparison of mobile phone processor's architecture//Proceedings of the 9th IEEE International Conference on Software Engineering and Service Science. Beijing, China; IEEE: 970-973 [DOI: 10.1109/ICSESS.2018.8663778]
- Bachhuber C, Martinez A S, Pries R, Eger S and Steinbach E. 2019. Edge cloud-based augmented reality//2019 IEEE 21st International Workshop on Multimedia Signal Processing. Kuala Lumpur, Malaysia; IEEE: 1-6 [DOI: 10.1109/MMSP.2019.8901715]
- Bao P and Gourlay D. 2004. Remote walkthrough over mobile networks using 3-D image warping and streaming. IEE Proceedings-Vision, Image and Signal Processing, 151(4): 329-336 [DOI: 10.1049/ip-vis:20040749]
- Bhojan A, Ng S P, Ng J and Ooi W T. 2020. CloudyGame: enabling cloud gaming on the edge with dynamic asset streaming and shared game instances. Multimedia Tools and Applications, 79(43): 32503-32523 [DOI: 10.1007/s11042-020-09612-z]
- Bugeja K, Debattista K and Spina S. 2019. An asynchronous method for cloud-based rendering. The Visual Computer, 35(12): 1827-1840 [DOI: 10.1007/s00371-018-1577-8]
- Buyukkaya E, Abdallah M and Simon G. 2015. A survey of peer-to-peer overlay approaches for networked virtual environments. Peer-to-Peer Networking and Applications, 8(2): 276-300 [DOI: 10.1007/s12083-013-0231-5]
- Cai K Y, Wang W C, Chen Z B, Chen Q Q and Teng J. 2009. Exploiting repeated patterns for efficient compression of massive models//Proceedings of the 8th International Conference on Virtual Reality Continuum and ITS Applications in Industry. Yokohama, Japan; ACM: 145-150 [DOI: 10.1145/1670252.1670283]
- Cai W, Chi Y F, Zhou C H, Zhu C J and Leung V C M. 2018. UB-CGaming: ubiquitous cloud gaming system. IEEE Systems Journal, 12(3): 2483-2494 [DOI: 10.1109/JSYST.2018.2797080]
- Chatzopoulos D, Bermejo C, Huang Z P and Hui P. 2017. Mobile augmented reality survey: from where we are to where we go. IEEE Access, 5: 6917-6950 [DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2698164]
- Chen D Y and El-Zarki M. 2019. A framework for adaptive residual streaming for single-player cloud gaming. ACM Transactions on Multimedia Computing, Communications, and Applications, 15(2S): #66 [DOI: 10.1145/3336498]
- Chen H, Zhang X, Xu Y L, Ren J, Fan J T, Ma Z and Zhang W J. 2019. T-gaming: a cost-efficient cloud gaming system at scale. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 30(12): 2849-2865 [DOI: 10.1109/TPDS.2019.2922205]
- Chen L X, Xu J, Ren S L and Zhou P. 2018. Spatio-temporal edge service placement: a bandit learning approach. IEEE Transactions on Wireless Communications, 17(12): 8388-8401 [DOI: 10.1109/TWC.2018.2876823]
- Chen Z, Hu W L, Wang J J, Zhao S Y, Amos B, Wu G H, Ha K Y, Elgazzar K, Pillai P, Klatzk R, Siewiorek D and Satyanarayanan M. 2017. An empirical study of latency in an emerging class of edge computing applications for wearable cognitive assistance//Proceedings of the 2nd ACM/IEEE Symposium on Edge Computing. San Jose, USA; ACM: #14 [DOI: 10.1145/3132211.3134458]
- Chilberto J, Zaal S, Arora G and Price E. 2020. Building solutions in the azure cloud//Cloud Debugging and Profiling in Microsoft Azure. Berkeley, USA; Apress: 1-19 [DOI: 10.1007/978-1-4842-5437-0_1]
- Choy S, Wong B, Simon G and Rosenberg C. 2012. The brewing storm in cloud gaming: a measurement study on cloud to end-user latency//2012 11th Annual Workshop on Network and Systems Support for Games (NetGames). Venice, Italy; IEEE: 1-6 [DOI: 10.1109/NetGames.2012.6404024]
- Crassin C, Luebke D, Mara M, McGuire M, Oster B, Shirley P, Pike P and Wyman C. 2015. CloudLight: a system for amortizing indirect lighting in real-time rendering. Journal of Computer Graphics Techniques, 4(4): 1-27
- Debevec P. 2006. Image-based lighting//ACM SIGGRAPH 2006 Courses. Boston, Massachusetts, USA; ACM: 4-es [DOI: 10.1145/1185657.1185686]
- Dimitrov R. 2007. Cascaded shadow maps. Developer Documentation, NVIDIA Corp [EB/OL]. [2021-11-28]. http://www.cse.chalmers.se/edu/year/2011/course/TDA361/Advanced%20Computer%20Graphics/cascaded_shadow_maps.pdf
- Englert M, Jung Y, Klomann M, Etzold J, Grimm P and Jia J Y. 2015. A streaming framework for instant 3D rendering and interaction//Proceedings of the 21st ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology. Beijing, China; ACM: 192 [DOI: 10.1145/2821592.2821645]

- Evans A, Romeo M, Bahrehmand A, Agenjo J and Blat J. 2014. 3D graphics on the web: a survey. *Computers and Graphics*, 41: 43-61 [DOI: 10.1016/j.cag.2014.02.002]
- Fehn C. 2004. Depth-image-based rendering (DIBR), compression, and transmission for a new approach on 3D-TV//*Proceedings Volume 5291, Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems XI*. San Jose, US; SPIE: 93-105 [DOI: 10.1117/12.524762]
- Frigo P, Giuffrida C, Bos H and Razavi K. 2018. Grand Pwning unit: accelerating microarchitectural attacks with the GPU//2018 IEEE Symposium on Security and Privacy (SP). San Francisco, USA; IEEE: 195-210 [DOI: 10.1109/SP.2018.00022]
- Gubran A A and Aamodt T M. 2019. Emerald: graphics modeling for SoC systems//*The 46th International Symposium on Computer Architecture*. Phoenix, USA; ACM: 169-182 [DOI: 10.1145/3307650.3322221]
- Guo L Q, Pang J and Walid A. 2018a. Joint placement and routing of network function chains in data centers//*Proceedings of IEEE INFOCOM 2018-IEEE Conference on Computer Communications*. Honolulu, USA; IEEE: 612-620 [DOI: 10.1109/INFOCOM.2018.8486429]
- Guo Y, Stolyar A L and Walid A. 2018b. Shadow-routing based dynamic algorithms for virtual machine placement in a network cloud. *IEEE Transactions on Cloud Computing*, 6(1): 209-220 [DOI: 10.1109/TCC.2015.2464795]
- Gül S, Podborski D, Son J, Bhullar G S, Buchholz T, Schierl T and Hellge C. 2020. Cloud rendering-based volumetric video streaming system for mixed reality services//*Proceedings of the 11th ACM Multimedia Systems Conference*. Istanbul, Turkey; ACM: 357-360 [DOI: 10.1145/3339825.3393583]
- Hladky J, Seidel H P and Steinberger M. 2019. Tessellated shading streaming. *Computer Graphics Forum*, 38(4): 171-182 [DOI: 10.1111/cgf.13780]
- Hoppe H. 1996. Progressive meshes//*Proceedings of the 23rd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*. New York, USA; ACM: 99-108 [DOI: 10.1145/237170.237216]
- Hou X S, Dey S, Zhang J Z and Budagavi M. 2021. Predictive adaptive streaming to enable mobile 360-degree and VR experiences. *IEEE Transactions on Multimedia*, 23: 716-731 [DOI: 10.1109/TMM.2020.2987693]
- Hou X S, Lu Y and Dey S. 2017. Wireless VR/AR with edge/cloud computing//*Proceedings of the 26th International Conference on Computer Communication and Networks (ICCCN)*. Vancouver, Canada; IEEE: 1-8 [DOI: 10.1109/ICCCN.2017.8038375]
- Hu S Y, Huang T H, Chang S C, Sung W L, Jiang J R and Chen B Y. 2008. FLoD: a framework for peer-to-peer 3D streaming//*Proceedings of the 27th Conference on Computer Communications*. Phoenix, USA; IEEE: 1373-1381 [DOI: 10.1109/INFOCOM.2008.195]
- Hu S Y, Jiang J R and Chen B Y. 2010. Peer-to-peer 3D streaming. *IEEE Internet Computing*, 14(2): 54-61 [DOI: 10.1109/MIC.2009.98]
- Hwang S J, Lee J, Shin Y, Lee W J and Ryu S. 2015. A mobile ray tracing engine with hybrid number representations//*Proceedings of SIGGRAPH Asia 2015 Mobile Graphics and Interactive Applications*. Kobe, Japan; ACM: #3 [DOI: 10.1145/2818427.2818446]
- Jacinto H, Kéchichian R, Desvignes M, Prost R and Valette S. 2012. A web interface for 3D visualization and interactive segmentation of medical images//*Proceedings of the 17th International Conference on 3D Web Technology*. Los Angeles, USA; ACM: 51-58 [DOI: 10.1145/2338714.2338722]
- Jaya I, Cai W T and Li Y S. 2020. Rendering server allocation for MMORPG players in cloud gaming//*Proceedings of the 49th International Conference on Parallel Processing-ICPP*. Edmonton, Canada; ACM: #66 [DOI: 10.1145/3404397.3404463]
- Jia J Y, Wang M F, Wang W and Hei X J. 2016. On prioritization mechanisms for large-scale 3D streaming in distributed virtual environments//*Proceedings of 2016 International Conference on Virtual Reality and Visualization*. Hangzhou, China; IEEE: 465-472 [DOI: 10.1109/ICVRV.2016.85]
- Jia J Y, Wang W and Hei X J. 2014. An efficient caching algorithm for peer-to-peer 3D streaming in distributed virtual environments. *Journal of Network and Computer Applications*, 42: 1-11 [DOI: 10.1016/j.jnca.2014.03.005]
- Jia J Y, Wang W, Wang M F, Fan C, Zhang C X and Yu Y. 2014. Multi-layered incremental and scalable sector of interest (MISSOI) based efficient progressive transmission of large-scale DVE scenes. *Chinese Journal of Computers*, 37(6): 1324-1334 (贾金原, 王伟, 王明飞, 范辰, 张晨曦, 俞阳. 2014. 基于多层增量式可扩展扇形兴趣区域的大规模 DVE 场景对等渐进式传输机制. *计算机学报*, 37(6): 1324-1334) [DOI: 10.3724/SP.J.1016.2014.01324]
- Jiang W and Gu J W. 2015. Video stitching with spatial-temporal content-preserving warping//*Proceedings of 2015 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops*. Boston, USA; IEEE: 42-48 [DOI: 10.1109/CVPRW.2015.7301374]
- Laghari A A, He H, Memon K A, Laghari R A, Halepoto I A and Khan A. 2019. Quality of experience (QoE) in cloud gaming models: a review. *Multiagent and Grid Systems*, 15(3): 289-304 [DOI: 10.3233/MGS-190313]
- Lai C F, Hwang R H and Chao H C. 2017. A QoS aware resource allocation strategy for mobile graphics rendering with cloud support. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 27(1): 110-124 [DOI: 10.1109/TCSVT.2016.2589740]
- Lalos A S, Nikolas I, Vlachos E and Moustakas K. 2017. Compressed sensing for efficient encoding of dense 3D meshes using model-based Bayesian learning. *IEEE Transactions on Multimedia*, 19(1): 41-53 [DOI: 10.1109/TMM.2016.2605927]
- Le Y F, Liu J C, Ergün F and Wang D. 2014. Online load balancing for

- mapreduce with skewed data input//Proceedings of IEEE INFOCOM 2014-IEEE Conference on Computer Communications. Toronto, Canada; IEEE: 2004-2012 [DOI: 10.1109/INFOCOM.2014.6848141]
- Lee W J, Hwang S J, Shin Y, Ryu S and Ihm L. 2016. Adaptive multi-rate ray sampling on mobile ray tracing GPU//Proceedings of SIGGRAPH ASIA 2016 Mobile Graphics and Interactive Applications. Macau, China; ACM: #3 [DOI: 10.1145/2999508.2999523]
- Lee W J, Hwang S J, Shin Y, Yoo J J and Ryu S. 2015. An efficient hybrid ray tracing and rasterizer architecture for mobile GPU//Proceedings of SIGGRAPH Asia 2015 Mobile Graphics and Interactive Applications. Kobe, Japan; ACM: #2 [DOI: 10.1145/2818427.2818442]
- Lee W J, Hwang S J, Shin Y, Yoo J J and Ryu S. 2017. Fast stereoscopic rendering on mobile ray tracing GPU for virtual reality applications//Proceedings of 2017 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE). Las Vegas, USA; IEEE: 355-357 [DOI: 10.1109/ICCE.2017.7889353]
- Lee W J, Lee S H, Nah J H, Kim J W, Shin Y, Lee J and Jung S Y. 2012. SGRT: a scalable mobile GPU architecture based on ray tracing//Proceedings of ACM SIGGRAPH 2012 Posters. Los Angeles, USA; ACM: #44 [DOI: 10.1145/2342896.2342953]
- Li G L and Huang Y Y. 2004. Research and application of progressive coding of 3D model and streaming transformation. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 30(4): 370-374 (李公立, 黄毓瑜. 2004. 3维模型的渐进式编码与流传输技术的研究. 北京航空航天大学学报, 30(4): 370-374) [DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2004.04.020]
- Liu C, Jia J Y, Lu Y F, Zhang Q and Zhao L. 2019. GI-map tree: global illumination collaborative real-time rendering in Web3D dynamic scene. Journal of System Simulation, 31(8): 1591-1604 (刘畅, 贾金原, 陆一凡, 张乾, 赵磊. 2019. 光图树: Web3D动态场景全局光照的协同实时渲染. 系统仿真学报, 31(8): 1591-1604) [DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.18-VR0731]
- Liu C, Jia J Y, Zhang Q and Zhao L. 2017. Lightweight WebSIM rendering framework based on cloud-baking//Proceedings of 2017 ACM SIGSIM Conference on Principles of Advanced Discrete Simulation. Singapore, Singapore; ACM: 221-229 [DOI: 10.1145/3064911.3064933]
- Liu C, Liu X J, Jia J Y, Xu S B, Zhang Q, Huang C X and Huang X. 2021. A Web3D cloud rendering system for dynamic real-time lighting and shadow based on device power. Scientia Sinica (Informationis), 51(2): 231-246 (刘畅, 刘小军, 贾金原, 徐识溥, 张乾, 黄晨曦, 黄欣. 2021. 基于设备性能的Web3D动态实时光影云渲染系统. 中国科学: 信息科学, 51(2): 231-246) [DOI: 10.1360/SSI-2020-0334]
- Liu C, Ooi W T, Jia J Y and Zhao L. 2018a. Cloud baking: collaborative scene illumination for dynamic Web3D scenes. ACM Transactions on Multimedia Computing, Communications, and Application, 14(3S): #59 [DOI: 10.1145/3206431]
- Liu X J, Xie N, Tang K and Jia J Y. 2016. Lightweighting for Web3D visualization of large-scale BIM scenes in real-time. Graphical Models, 88: 40-56 [DOI: 10.1016/j.gmod.2016.06.001]
- Liubogoshchev M, Ragimova K, Lyakhov A, Tang S Y and Khorov E. 2021. Adaptive cloud-based extended reality: modeling and optimization. IEEE Access, 9: 35287-35299 [DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3062555]
- Ma J P, Xu J Y, Chen B and Chen Q. 2016. Generation and compression research of stable progressive meshes. Journal of Chinese Computer Systems, 37(12): 2755-2759
- MacIntyre B and Smith T F. 2018. Thoughts on the future of WebXR and the immersive web//2018 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality Adjunct (ISMAR-Adjunct). Munich, Germany; IEEE: 338-342 [DOI: 10.1109/ISMAR-Adjunct.2018.00099]
- Marion C and Jomier J. 2012. Real-time collaborative scientific WebGL visualization with WebSocket//Proceedings of the 17th International Conference on 3D Web Technology. Los Angeles, USA; ACM: 47-50 [DOI: 10.1145/2338714.2338721]
- Mark W R, McMillan L and Bishop G. 1997. Post-rendering 3D warping//Proceedings of 1997 Symposium on Interactive 3D Graphics. Providence, USA; ACM: 7-16 [DOI: 10.1145/253284.253292]
- Martin S, Bjørge M, Kakarlapudi S and Fredriksen J H. 2013. Challenges with high quality mobile graphics//Proceedings of ACM SIGGRAPH 2013 Mobile. Anaheim, USA; ACM: #7 [DOI: 10.1145/2503512.2503522]
- Martin S, Garrard A, Gruber A, Bjørge M, Zioma R, Bengé S and Nummelin N. 2015. Moving mobile graphics//Proceedings of ACM SIGGRAPH 2015 Courses. Los Angeles, USA; ACM: #18 [DOI: 10.1145/2776880.2787664]
- McMillan L. 1997. An Image-Based Approach to Three-Dimensional Computer Graphics. Chapel Hill, United States; University of North Carolina at Chapel Hill
- Mori Y, Fukushima N, Yendo T, Fujii T and Tanimoto M. 2009. View generation with 3D warping using depth information for FTV. Signal Processing: Image Communication, 24(1/2): 65-72 [DOI: 10.1016/j.image.2008.10.013]
- Mueller J H, Voglreiter P, Dokter M, Neff T, Makar M, Steinberger M and Schmalstieg D. 2018. Shading atlas streaming. ACM Transactions on Graphics (TOG), 37(6): #199 [DOI: 10.1145/3272127.3275087]
- Nah J H, Lim Y, Ki S and Shin C. 2016. Z² traversal order for VR stereo rendering on tile-based mobile GPUs//Proceedings of SIGGRAPH ASIA 2016 Technical Briefs. Macau, China; ACM: #6 [DOI: 10.1145/3005358.3005374]
- Olsson O, Persson E and Billeter M. 2015. Real-time many-light management and shadows with clustered shading//Proceedings of ACM SIGGRAPH 2015 Courses. Los Angeles, USA; ACM: #12 [DOI:

- 10.1145/2776880.2792712]
- Pitkänen M, Viitanen M, Mercat A and Vanne J. 2019. Remote VR gaming on mobile devices//Proceedings of the 27th ACM International Conference on Multimedia. Nice, France; ACM: 2191-2193 [DOI: 10.1145/3343031.3350595]
- Robart M, Paulin M and Caubet R. 1999. Material model for physically based rendering//Volume 3826, Polarization and Color Techniques in Industrial Inspection. Munich, Germany; SPIE: 10-21 [DOI: 10.1117/12.364327]
- Shade J, Gortler S, He L W and Szeliski R. 1998. Layered depth images//Proceedings of the 25th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. New York, USA; ACM: 231-242 [DOI: 10.1145/280814.280882]
- Shao W, Liu C and Jia J Y. 2020. Lightmap-based GI collaborative rendering system for Web3D application. Journal of System Simulation, 32(4): 649-659 (邵威, 刘畅, 贾金原. 2020. 基于光照贴图的Web3D全局光照协作式云渲染系统. 系统仿真学报, 32(4): 649-659) [DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.19-vr0471]
- Shi S, Nahrstedt K and Campbell R. 2012. A real-time remote rendering system for interactive mobile graphics. ACM Transactions on Multimedia Computing, Communications, and Applications (TOMM), 8(3S): #46 [DOI: 10.1145/2348816.2348825]
- Shikhare D, Bhakar S and Mudur S P. 2001. Compression of large 3D engineering models using automatic discovery of repeating geometric features [EB/OL]. [2021-11-22]. <https://www.angelfire.com/space2/dineshshikhare/papers/vmv2001.pdf>
- Shin Y, Hwang S J, Lee J, Lee W J and Ryu S. 2015. Latency tolerance techniques for real-time ray tracing on mobile computing platform//Proceedings of SIGGRAPH Asia 2015 Mobile Graphics and Interactive Applications. Kobe, Japan; ACM: #1 [DOI: 10.1145/2818427.2818437]
- Siddeq M M and Rodrigues M A. 2016. Novel 3D compression methods for geometry, connectivity and texture. 3D Research, 7(2): #13 [DOI: 10.1007/s13319-016-0091-x]
- Singh M P and Jain M K. 2014. Evolution of processor architecture in mobile phones. International Journal of Computer Applications, 90(4): 34-39 [DOI: 10.5120/15564-4339]
- Slivar I, Suznjevic M, Skorin-Kapov L and Matijasevic M. 2014. Empirical QoE study of in-home streaming of online games//Proceedings of the 13th Annual Workshop on Network and Systems Support for Games. Nagoya, Japan; IEEE: 1-6 [DOI: 10.1109/NetGames.2014.7010133]
- Smolic A, Muller K, Dix K, Merkle P, Kauff P and Wiegand T. 2008. Intermediate view interpolation based on multiview video plus depth for advanced 3D video systems//Proceedings of the 15th IEEE International Conference on Image Processing. San Diego, USA; IEEE: 2448-2451 [DOI: 10.1109/ICIP.2008.4712288]
- Sullivan G J, Ohm J R, Han W J and Wiegand T. 2012. Overview of the high efficiency video coding (HEVC) standard. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 22(12): 1649-1668 [DOI: 10.1109/TCSVT.2012.2221191]
- Sun B L, Li X, Song J C, Cheng Z N, Xu Y and Zhou X H. 2014. Texture-directed mobile GPU power management for closed-source games//Proceedings of 2014 IEEE International Conference on High Performance Computing and Communications, 2014 IEEE 6th International Symposium on Cyberspace Safety and Security, 2014 IEEE 11th International Conference on Embedded Software and Syst. Paris, France; IEEE: 348-354 [DOI: 10.1109/HPCC.2014.58]
- Surana P, Madhani N and Gopalakrishnan T. 2020. A comparative study on the recent smart mobile phone processors//Proceedings of the 7th International Conference on Smart Structures and Systems. Chennai, India; IEEE: 1-3 [DOI: 10.1109/ICSSS49621.2020.9202174]
- Taleb T, Ksentini A and Frangoudis P A. 2019. Follow-me cloud: when cloud services follow mobile users. IEEE Transactions on Cloud Computing, 7(2): 369-382 [DOI: 10.1109/TCC.2016.2525987]
- Tan Z, Zhao J H, Li Y J, Xu Y J and Lu S W. 2021. Device-based LTE latency reduction at the application layer [EB/OL]. [2021-11-22]. <https://www.usenix.org/conference/nsdi21/presentation/tan>
- Tandianus B, Seah H S, Vu T D and Phan A T. 2018. Cloud-based dynamic streaming and loading of 3D scene//Proceedings of 2018 International Conference on Cyberworlds (CW). Singapore, Singapore; IEEE: 409-414 [DOI: 10.1109/CW.2018.00079]
- Tolia N, Andersen D G and Satyanarayanan M. 2006. Quantifying interactive user experience on thin clients. Computer, 39(3): 46-52 [DOI: 10.1109/MC.2006.101]
- Trinelli M, Gallo M, Rifai M and Pianese F. 2019. Transparent AR processing acceleration at the edge//Proceedings of the 2nd International Workshop on Edge Systems, Analytics and Networking. Dresden, Germany; ACM: 30-35 [DOI: 10.1145/3301418.3313942]
- Viitanen T, Koskela M, Jääskeläinen P, Kultala H and Takala J. 2017. MergeTree: a fast hardware HLBVH constructor for animated ray tracing. ACM Transactions on Graphics, 36(5): #169 [DOI: 10.1145/3132702]
- Wang L, Jiao L, Li J, Gedeon J and Mühlhäuser M. 2019a. Moera: mobility-agnostic online resource allocation for edge computing. IEEE Transactions on Mobile Computing, 18(8): 1843-1856 [DOI: 10.1109/TMC.2018.2867520]
- Wang M F, Jia J Y, Xie N and Zhang C X. 2015a. Interest-driven avatar neighbor-organizing for P2P transmission in distributed virtual worlds. Computer Animation and Virtual Worlds, 27(6): 519-531 [DOI: 10.1002/cav.1670]
- Wang R, Yu B W, Marco J, Hu T L, Gutierrez D and Bao H J. 2016. Real-time rendering on a power budget. ACM Transactions on Graphics, 35(4): #111 [DOI: 10.1145/2897824.2925889]
- Wang R H, Zhang B, Bi J N, Zhang X H, Guo X L, Jiao D, Lv J H and Ma S L. 2020. Cloud rendering learning platform technology research for visual analysis of large scale 3D multimedia data. Multi-

- media Tools and Applications, 79 (7): 5371-5398 [DOI: 10.1007/s11042-018-6569-1]
- Wang R H, Zhang B, Wu M Q, Zhang J, Guo X L, Zhang X H, Li H B, Jiao D and Ma S L. 2019b. Performance bottleneck analysis and resource optimized distribution method for IoT cloud rendering computing system in cyber-enabled applications. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2019: #79 [DOI: 10.1186/s13638-019-1401-9]
- Wang S Q, Urgaonkar R, Zafer M, He T, Chan K and Leung K K. 2015b. Dynamic service migration in mobile edge-clouds//Proceedings of IFIP Networking Conference (IFIP Networking). Toulouse, France: IEEE: 1-9 [DOI: 10.1109/IFIPNetworking. 2015. 7145316]
- Wang W, Jia J Y, Zhang C X and Yu Y. 2010. Progressive 3D scenes replacement mechanism for P2P overlay. Journal of Computer Applications, 30(9): 2422-2426, 2430 (王伟, 贾金原, 张晨曦, 俞阳. 2010. 面向 P2P 网络的渐进式 3 维场景更新策略. 计算机应用, 30(9): 2422-2426, 2430)
- Wen L X, Xie N and Jia J Y. 2016. Client-driven strategy of large-scale scene streaming//Proceedings of the 22nd International Conference on Multimedia Modeling. Miami, USA: Springer: 93-103 [DOI: 10.1007/978-3-319-27674-8_9]
- Xie J M. 2012. Research on key technologies base Unity3D game engine//Proceedings of the 7th International Conference on Computer Science and Education. Melbourne, Australia: IEEE: 695-699 [DOI: 10.1109/ICCSE.2012.6295169]
- Yahyavi A and Kemme B. 2013. Peer-to-peer architectures for massively multiplayer online games: a survey. ACM Computing Surveys, 46(1): #9 [DOI: 10.1145/2522968.2522977]
- Yun J, Lee J, Kim C G, Lim Y K, Nah J H, Kim Y and Park W C. 2018. A novel performance prediction model for mobile GPUs. IEEE Access, 6: 16235-16245 [DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2816040]
- Zhang L, Sun A, Shea R, Liu J C and Zhang M. 2019a. Rendering multi-party mobile augmented reality from edge//Proceedings of the 29th ACM Workshop on Network and Operating Systems Support for Digital Audio and Video. Amherst, USA: ACM: 67-72 [DOI: 10.1145/3304112.3325612]
- Zhang X, Chen H, Zhao Y C, Ma Z, Xu Y L, Huang H J, Yin H and Wu D O. 2019b. Improving cloud gaming experience through mobile edge computing. IEEE Wireless Communications, 26(4): 178-183 [DOI: 10.1109/MWC.2019.1800440]
- Zheng J, Zhang J F, Li J, Tang R, Gao S H and Zhou Z H. 2020. Structured3D: a large photo-realistic dataset for structured 3D modeling//Proceedings of 2020 European Conference on Computer Vision. Glasgow, UK: Springer: 519-535 [DOI: 10.1007/978-3-030-58545-7_30]

- Zhu M H, Mondet S, Morin G, Ooi W T and Cheng W. 2011. Towards peer-assisted rendering in networked virtual environments//Proceedings of the 19th ACM international conference on Multimedia. Scottsdale, USA: ACM: 183-192 [DOI: 10.1145/2072298.2072324]

作者简介



刘畅, 1983 年生, 男, 讲师, 主要研究方向为云边缘在线协同渲染。

E-mail: 70202@nchu.edu.cn



王锐, 通信作者, 男, 教授, 主要研究方向为图形渲染、实时绘制架构与算法。

E-mail: ruiwang@zju.edu.cn



贾金原, 通信作者, 男, 教授, 主要研究方向为轻量级 Web3D 可视化。

E-mail: jia-tongji@qq.com

霍宇驰, 男, 研究员, 主要研究方向为计算机图形学。

E-mail: eehyc0@163.com

张严辞, 男, 教授, 主要研究方向为实时计算机图形绘制算法。E-mail: yczhang@scu.edu.cn

张乾, 男, 工程师, 主要研究方向为 Web3D 在线实时绘制。

E-mail: 853768471@qq.com

郑家祥, 男, 工程师, 主要研究方向为 3 维重建。

E-mail: jiaxiang.zheng135@gmail.com

唐睿, 男, 工程师, 主要研究方向为真实感绘制。

E-mail: ati@qunhemail.com

余耿, 男, 硕士研究生, 主要研究方向为云渲染。

E-mail: 1776524006@qq.com