SERVER TOMONIDA 3D RENDER TEXNOLOGIYASI: RAQAMLI TENGLIKNI TA'MINLASHNING TEXNIK-EMPIRIK TAHLILI

Zubaytova Mehriniso Husniddinovna
Buxoro davlat innovatsiyalar universiteti magistranti
E-mail: zubaytovazubaytova@gmail.com
ORCID: https://doi.org/10.5281/zenodo.21195984
Doi: https://doi.org/10.5281/zenodo.21352188

Annotatsiya. Mazkur maqolada server tomonida 3D renderlash texnologiyasining raqamli tenglikni ta'minlashdagi texnik imkoniyatlari va cheklovlari tahlil qilinadi. Zamonaviy uch o‘lchovli vizualizatsiya, virtual reallik, raqamli egizaklar, masofaviy ta'lim va interaktiv muhandislik tizimlari yuqori grafik hisoblash quvvatini talab qiladi. Natijada kuchli grafik protsessorga ega bo‘lmagan foydalanuvchilar murakkab 3D xizmatlardan foydalanishda texnologik to‘siqlarga duch keladi. Tadqiqotda server tomonida renderlash arxitekturasi, “thin client” modeli, video oqimini kodlash, tarmoq kechikishi va o'tkazuvchanlik qobiliyatining foydalanuvchi tajribasiga ta'siri tizimli ravishda o‘rganildi. Texnik-empirik tahlil uchun uch xil mijoz qurilmasi va uch xil tarmoq sharoitini qamrab oluvchi eksperimental model taklif etildi. Tahlil shuni ko‘rsatadiki, renderlash yukini server infratuzilmasiga ko‘chirish lokal qurilmaning grafik quvvatiga bog‘liqlikni sezilarli kamaytirishi mumkin. Biroq ushbu model apparat tengsizligini avtomatik ravishda bartaraf etmaydi; aksincha, tarmoq sifati, trafik narxi va serverlarning geografik joylashuvi yangi tengsizlik omillariga aylanishi mumkin. Shu sababli maqolada server tomonida 3D renderlash raqamli tenglikning yakuniy yechimi emas, balki edge computing, adaptiv video kodlash va gibrid renderlash bilan integratsiya qilinishi lozim bo‘lgan infratuzilmaviy mexanizm sifatida baholanadi.

Kalit so‘zlar: server tomonida renderlash, 3D grafika, masofaviy renderlash, raqamli tenglik, raqamli tafovut, thin client, cloud rendering, edge computing, WebRTC, GPU, interaktiv kechikish.

Kirish. Raqamli transformatsiyaning zamonaviy bosqichida foydalanuvchining axborot tizimidan foydalanish imkoniyati faqat internetga ulanish mavjudligi bilan belgilanmaydi. Qurilmaning hisoblash quvvati, grafik protsessor imkoniyati, operativ xotira hajmi va dasturiy platformaning zamonaviy grafik standartlarni qo‘llab-quvvatlashi ham raqamli xizmatlardan foydalanish darajasiga bevosita ta'sir ko‘rsatadi. Ayniqsa, real vaqt rejimidagi 3D vizualizatsiya, virtual va kengaytirilgan reallik, raqamli egizak, interaktiv tibbiy model hamda muhandislik simulyatsiyalarida apparat resurslariga bo‘lgan talab yuqoridir.

Raqamli tafovut muammosi global miqyosda ham dolzarbligicha qolmoqda. Xalqaro elektraloqa ittifoqining 2024-yilgi dastlabki statistik ma'lumotlariga ko‘ra, dunyoda 5,5 milliard kishi internetdan foydalangan, biroq taxminan 2,6 milliard kishi oflayn holatda qolgan. Shuningdek, shahar va qishloq aholisi o‘rtasidagi foydalanish ko‘rsatkichlari sezilarli farq qilgan: shaharlarda internetdan foydalanish darajasi 83 foizga yaqin bo‘lgan bir sharoitda qishloq hududlarida ushbu ko‘rsatkich 48 foiz atrofida qayd etilgan [1]. Keyingi statistik qayta hisoblashlarda 2024-yil ko‘rsatkichlari yangilangan bo‘lsa-da, sifat, ishonchlilik va iqtisodiy maqbullik bilan bog‘liq raqamli tafovut muammosi saqlanib qolmoqda.

An'anaviy 3D ilovalarda geometrik ma'lumotlarni qayta ishlash, teksturalarni xotiraga yuklash, shader dasturlarini bajarish va yakuniy tasvirni rasterizatsiya qilish foydalanuvchi qurilmasida amalga oshiriladi. Bunday client-side rendering modeli kuchli GPU mavjud bo‘lgan qurilmalarda yuqori samaradorlikni ta'minlaydi. Biroq past narxli smartfon, eski noutbuk yoki

integratsiyalashgan grafik protsessorli kompyuterda ayni 3D tizimning ishlash sifati keskin pasayishi mumkin.

Server tomonida 3D renderlash — remote rendering yoki cloud rendering — mazkur muammoning texnik alternativalaridan biridir. Ushbu modelda murakkab grafik hisob-kitoblar server GPU qurilmalarida bajariladi. Tayyor kadr video oqimi yoki boshqa siqilgan vizual formatda foydalanuvchi qurilmasiga uzatiladi. Mijoz qurilmasi esa foydalanuvchi boshqaruv signallarini serverga yuborish va kelayotgan tasvirni dekodlash vazifasini bajaradi.

Mazkur tadqiqotning maqsadi server tomonida 3D renderlash texnologiyasining raqamli tenglikni ta'minlash salohiyatini texnik va empirik mezonlar asosida tahlil qilishdan iborat.

Tadqiqotning asosiy savoli quyidagicha shakllantirilgan: server tomonida renderlash 3D xizmatlardan foydalanishdagi apparat tafovutini kamaytiradimi va ushbu jarayonda tarmoq infratuzilmasi qanday yangi cheklovlarni yuzaga keltiradi?

Tadqiqot gipotezasi sifatida quyidagi fikr ilgari suriladi: 3D renderlash jarayonining serverga ko‘chirilishi turli grafik imkoniyatlarga ega mijoz qurilmalaridagi vizual samaradorlik tafovutini kamaytiradi, biroq tizim samaradorligining asosiy determinantini lokal GPU quvvatidan tarmoq kechikishi va o'tkazuvchanlik qobiliyatiga ko‘chiradi.

Adabiyotlar tahlili. Masofaviy renderlash konsepsiyasi yangi texnologiya hisoblanmaydi. Shi va Hsu tomonidan interaktiv masofaviy renderlash tizimlari bo‘yicha amalga oshirilgan keng qamrovli tadqiqotda ushbu arxitekturalarning rivojlanish tarixi va asosiy texnologik yondashuvlari tizimlashtirilgan [2]. Mualliflar remote rendering tizimlarining asosiy vazifasini hisoblash talabchan grafik jarayonlarni masofaviy resurslarda bajarish va natijani nisbatan kam quvvatli mijozga yetkazish sifatida tavsiflaydi.

Mazkur yondashuvda mijoz qurilmasini “thin client”, ya'ni yupqa mijoz modeliga yaqinlashtirish mumkin. Nazariy jihatdan foydalanuvchining lokal qurilmasi murakkab geometriya, yorug‘lik va fizik effektlarni hisoblamaydi. Server quyidagi renderlash funksiyasini bajaradi:

$$\mathbf{I_t = R(S_t, C_t, L_t, G),}$$

bu yerda:

I_t — t vaqtdagi renderlangan tasvir;

R — renderlash funksiyasi;

S_t — 3D sahnaning joriy holati;

C_t — kamera parametrlari;

L_t — yorug‘lik holati;

G — serverning grafik hisoblash resurslari.

Renderlangan tasvir video enkoder orqali siqiladi:

$$\mathbf{B_t = E(I_t, q, r),}$$

bu yerda E — video kodlash funksiyasi, q — sifat parametri, r esa maqsadli bitreytni ifodalaydi. B_t oqimi tarmoq orqali mijozga uzatiladi va dekoder tomonidan qayta tiklanadi.

Masofaviy renderlash tizimlarining asosiy ilmiy muammolaridan biri interaktiv kechikishdir. Cloete va Holliman interaktiv remote rendering tizimlarida foydalanuvchi harakati va unga vizual javob o‘rtasidagi vaqtni interaction latency tushunchasi bilan izohlaydi [3]. Ularning tadqiqotida kechikish bir nechta komponentlardan tashkil topishi va uzoq masofali tarmoq ulanishlarida real kechikish 70 millisekundlik interaktiv chegaradan oshishi mumkinligi ko‘rsatilgan.

Server tomonida renderlash tizimi uchun umumiy javob vaqtini quyidagicha ifodalash mumkin:

$$\mathbf{T_total = T_input + T_up + T_render + T_encode + T_down + T_decode + T_display.}$$

Bu yerda:

T_input — foydalanuvchi signalini qayd etish vaqti;

T_up — boshqaruv signalining serverga uzatilish vaqti;
T_render — serverda kadrni renderlash vaqti;
T_encode — kadrni kodlash vaqti;
T_down — video oqimining mijozga yetib kelish vaqti;
T_decode — tasvirni dekodlash vaqti;
T_display — ekranda aks ettirish kechikishi.

Mazkur model muhim nazariy xulosaga olib keladi: server renderlash tizimida kuchsiz GPU muammosi yo‘qolishi mumkin, ammo uning o‘rnini tarmoq va multimedia uzatish tizimining samaradorligi bilan bog‘liq muammo egallaydi.

WebRTC texnologiyasi real vaqt rejimidagi media oqimlarini past kechikish bilan uzatish imkoniyati tufayli remote rendering tizimlarida alohida ahamiyatga ega. WebRTC bo‘yicha adabiyotlarning tizimli tahlillari uning real vaqt kommunikatsiyasi va interaktiv multimedia tizimlaridagi salohiyatini ko‘rsatadi [4]. Shu bilan birga, tarmoqdagi jitter, paket yo‘qotilishi va o'tkazuvchanlik qobiliyatining o‘zgarishi tasvir sifatiga salbiy ta'sir qilishi mumkin.

So‘nggi tadqiqotlarda sof server renderlashdan tashqari gibrid arxitekturalarga ham e'tibor kuchaymoqda. Tan va boshqalar tomonidan taklif qilingan Distributed Hybrid Rendering yondashuvida hisoblash vazifasi server va mijoz o‘rtasida taqsimlanadi [5]. Server yuqori hisoblash talab qiluvchi ray tracing jarayonlarini bajaradi, lokal qurilma esa rasterizatsiya bilan bog‘liq ayrim vazifalarni amalga oshiradi.

DHR+S tadqiqotida gibrid model an'anaviy masofaviy renderlash uchun zarur bo‘lgan o'tkazuvchanlik qobiliyatining taxminan 20–30 foizidan foydalanishi va ayrim grafik komponentlar bo‘yicha 200 ms gacha bo‘lgan tarmoq kechikishiga nisbatan chidamlilik namoyish qilishi qayd etilgan [6]. Ushbu natija raqamli tenglik nuqtai nazaridan muhimdir, chunki rivojlanayotgan hududlarda foydalanuvchilar nafaqat kuchsiz qurilmalar, balki beqaror tarmoq sharoitlariga ham ega bo‘lishi mumkin.

Mavjud adabiyotlar remote rendering samaradorligi, kechikish va tasvir sifati masalalarini keng o‘rgangan. Biroq texnologiyani raqamli tenglikning apparat komponentini kamaytiruvchi mexanizm sifatida tahlil qilishga nisbatan kamroq e'tibor qaratilgan. Mazkur tadqiqot aynan ushbu ilmiy bo‘shliqni texnik-empirik model orqali yoritishga qaratilgan.

Tadqiqot metodologiyasi

Tadqiqot texnik-empirik va qiyosiy eksperimental yondashuv asosida shakllantirildi. Metodologiyaning asosiy maqsadi lokal va server tomonida renderlash arxitekturalarida mijoz qurilmasining apparat quvvati foydalanuvchi tajribasiga qanday ta'sir ko‘rsatishini taqqoslashdan iborat.

Tadqiqot uchun uch toifadagi shartli mijoz konfiguratsiyasi belgilandi:

Qurilma guruhi	Texnik tavsif	Grafik imkoniyat
D1	Past quvvatli mobil yoki eski kompyuter	Integratsiyalashgan/past GPU
D2	O‘rta segment noutbuk yoki kompyuter	O‘rta darajadagi GPU
D3	Yuqori samarali ish stansiyasi	Diskret yuqori quvvatli GPU

Eksperimental arxitektura ikki renderlash rejimini nazarda tutadi.

Birinchi rejim — lokal renderlash (LR). Bunda 3D sahna to‘liq mijoz qurilmasida qayta ishlanadi.

Ikkinchi rejim — server tomonida renderlash (SSR). Bunda 3D sahna GPU serverida renderlanadi, kadrlar H.264 yoki H.265 singari video kodek yordamida siqiladi va WebRTC asosidagi real vaqt kanali orqali mijozga yuboriladi.

Tarmoq sharoitini modellashtirish uchun uch ssenariy taklif qilindi:

Tarmoq ssenariysi	RTT	O‘tkazuvchanlik qobiliyati	Paket yo‘qotilishi
N1 — optimal	20 ms	50 Mbit/s	0–0,1%
N2 — o‘rta	60 ms	15 Mbit/s	0,5%
N3 — cheklangan	120 ms	5 Mbit/s	1–2%

Tadqiqotning asosiy mustaqil o‘zgaruvchilari renderlash turi, mijoz qurilmasining quvvati va tarmoq ssenariysidan iborat.

Bog‘liq o‘zgaruvchilar sifatida quyidagi ko‘rsatkichlar belgilandi:

1. o‘rtacha kadrlar chastotasi — FPS;
2. end-to-end interaktiv kechikish — millisekund;
3. mijoz CPU yuklanishi — foiz;
4. mijoz GPU yuklanishi — foiz;
5. tarmoq trafik sarfi — Mbit/s;
6. kadr vaqtining standart og‘ishi;
7. vizual sifat ko‘rsatkichi.

FPS asosidagi DPG qiymati qancha yuqori bo‘lsa, qurilmaning apparat xususiyatlari foydalanuvchi tajribasiga shuncha kuchli ta'sir qiladi. DPG qiymatining kamayishi esa xizmatning apparat jihatdan inklyuzivroq ekanligini ko‘rsatadi.

Taklif etilgan metodologiya real tajribada Docker asosidagi mijoz konteynerlari, GPU server, WebRTC media server va Linux tc/netem vositalari yordamida amalga oshirilishi mumkin. Har bir konfiguratsiyada tajriba kamida 30 marta takrorlanishi, o‘rtacha qiymat va 95 foizlik ishonch oralig‘i hisoblanishi tavsiya etiladi.

Natijalar va texnik-empirik tahlil. Taklif etilgan model asosidagi qiyosiy tahlilda lokal renderlash va server renderlash o‘rtasidagi asosiy farq hisoblash yukining joylashuvida kuzatiladi.

Lokal renderlashda D1 qurilmasi murakkab 3D sahnaning barcha grafik operatsiyalarini o‘z resurslari orqali bajarishi kerak. Masalan, yuqori poligonli sahna, dinamik yorug‘lik va post-processing effektlari qo‘llanilganda D1 qurilmasining FPS ko‘rsatkichi interaktiv foydalanish chegarasidan pastga tushishi ehtimoli yuqori. D3 qurilmasi ayni sahnani yuqori kadrlar chastotasida qayta ishlashi mumkin.

Nazariy eksperimental ssenariyda quyidagi natija modeli olinishi mumkin:

Qurilma	Lokal renderlash FPS	Server renderlash FPS, N1
D1	12	58
D2	34	59
D3	60	60

Ushbu qiymatlar haqiqiy ishlab chiqarish tizimidan olingan statistik natijalar emas, balki taklif etilgan metodologiyada tekshirilishi lozim bo‘lgan ssenariy modelidir.

Lokal renderlash uchun DPG quyidagicha hisoblanadi:

DPG_LR = (60 − 12) / 60 × 100 = 80%.

Server renderlash uchun:

DPG_SSR = (60 − 58) / 60 × 100 ≈ 3,3%.

Model natijasiga ko‘ra, server tomonida renderlash apparat samaradorligi bo‘yicha qurilmalararo tafovutni 80 foizdan 3,3 foizgacha kamaytirish potensialiga ega.

Mazkur natijani ehtiyotkorlik bilan talqin qilish zarur. Server renderlash D1 qurilmasini texnik jihatdan D3 qurilmasiga aylantirmaydi. Aksincha, 3D hisoblash resursi foydalanuvchining lokal mulki bo‘lgan GPU qurilmasidan markazlashgan server GPU infratuzilmasiga ko‘chiriladi.

Shunday qilib, quyidagi transformatsiya sodir bo‘ladi:

lokal apparatga bog‘liqlik → tarmoq va server infratuzilmasiga bog‘liqlik.

N1 tarmoq ssenariysida server renderlash yuqori samaradorlik ko‘rsatishi mumkin. 20 ms RTT va 50 Mbit/s o'tkazuvchanlik sharoitida video oqimini yetkazish uchun yetarli resurs mavjud bo‘ladi. Bunday sharoitda mijoz qurilmasining asosiy vazifasi video dekodlashdan iborat.

N2 ssenariysida 60 ms RTT mavjud bo‘lganda foydalanuvchi boshqaruv signali va vizual javob o‘rtasidagi kechikish sezilarli bo‘lishi mumkin. Cloete va Holliman tadqiqotidagi interaktiv kechikish muammosi mazkur holatning ilmiy asosini ko‘rsatadi [3].

N3 ssenariysida esa 120 ms RTT va 5 Mbit/s o'tkazuvchanlik server tomonida renderlashning asosiy cheklovini namoyon qiladi. Adaptiv bitreyt algoritmi video sifatini pasaytirishi, kodek kvantizatsiya darajasini oshirishi va natijada tekstura detallarining yo‘qolishiga olib kelishi mumkin.

Shu nuqtai nazardan server tomonida renderlash raqamli tenglikning ikki qarama-qarshi ta'sirini yuzaga keltiradi.

Birinchidan, **apparat tengsizligi kamayadi**. Foydalanuvchi yuqori narxli diskret GPU sotib olmasdan murakkab 3D xizmatdan foydalanishi mumkin. Bu ayniqsa ta'lim tizimlari uchun muhim. Masalan, uch o‘lchovli anatomiya modeli yoki muhandislik laboratoriyasining vizual simulyatsiyasi oddiy noutbukda video oqimi sifatida namoyish etilishi mumkin.

Ikkinchidan, **tarmoq tengsizligi kuchayishi mumkin**. Yuqori sifatli va past kechikishli tarmoqqa ega foydalanuvchi 3D tizimdan samarali foydalanadi. Beqaror yoki qimmat internetga ega foydalanuvchi esa vizual artefaktlar, yuqori kechikish va uzilishlarga duch keladi.

Demak, raqamli tenglikni quyidagi oddiy model bilan ifodalash yetarli emas:

Digital access = Internet access.

3D va hisoblash talabchan xizmatlar sharoitida kengroq model talab qilinadi:

Meaningful Digital Access = f(C, D, N, A, S),

bu yerda:

C — connectivity, ya'ni ulanish mavjudligi;
D — device capability, qurilma imkoniyati;
N — network quality, tarmoq sifati;
A — affordability, iqtisodiy maqbullik;
S — service architecture, xizmat arxitekturasi.

Server tomonida renderlash ushbu funksiyada D o‘zgaruvchisining salbiy ta'sirini kamaytiradi. Biroq N va A omillarining ahamiyatini oshirishi mumkin.

Server renderlashning raqamli tenglikka ta'sir modeli

Texnik tahlil asosida server renderlashning ta'sirini uch bosqichli modelda ifodalash mumkin.

Birinchi bosqich — hisoblashni markazlashtirish. GPU talab qiluvchi vazifalar serverga ko‘chiriladi. Foydalanuvchi qurilmasiga qo‘yiladigan minimal apparat talablari kamayadi.

Ikkinchi bosqich — vizual natijani universallashtirish. Turli qurilmalar ayni serverda renderlangan tasvirni qabul qiladi. Natijada 3D sahnaning grafik sifati lokal GPU modeliga kamroq bog‘liq bo‘ladi.

Uchinchi bosqich — tarmoq differensiallashuvi. Foydalanuvchi tajribasidagi asosiy tafovut qurilma quvvatidan tarmoq sifatiga ko‘chadi.

Ushbu uchinchi bosqich server renderlash tizimlarini loyihalashda eng muhim ijtimoiy-texnik muammodir.

Masalan, faqat 1080p va 15–25 Mbit/s oqimga mo‘ljallangan tizim texnik jihatdan kuchsiz qurilmalarni qo‘llab-quvvatlashi mumkin. Biroq past o'tkazuvchanlikka ega hudud foydalanuvchilarini amalda tizimdan chetlashtiradi. Shu sababli “thin client support”ning mavjudligi avtomatik ravishda raqamli inklyuzivlikni anglatmaydi.

Adaptiv arxitekturaning ahamiyati. Raqamli tenglikka yo‘naltirilgan server rendering platformasi statik video konfiguratsiyasidan foydalanmasligi kerak. Tizim real vaqt rejimida tarmoq holatini baholashi lozim:

$$Q_{t+1} = F(BW_t, RTT_t, PL_t, J_t),$$

bu yerda:

BW — mavjud o'tkazuvchanlik;

RTT — tarmoq aylanish vaqti;

PL — paket yo‘qotilishi;

J — jitter;

Q — keyingi vaqt oralig‘i uchun render yoki video sifati parametri.

Agar o'tkazuvchanlik pasaysa, tizim bir vaqtning o‘zida bir nechta parametrni moslashtirishi mumkin: render rezolyutsiyasini kamaytirish, video bitreytni pasaytirish, frame rate darajasini o‘zgartirish yoki ayrim grafik effektlarni serverda o‘chirib qo‘yish.

Bunda asosiy maqsad maksimal grafik sifat emas, balki **minimal barqaror interaktivlik**ni saqlab qolishdan iborat bo‘lishi kerak.

Raqamli tenglik nuqtai nazaridan quyidagi optimallashtirish funksiyasini taklif qilish mumkin:

$$\max U = \alpha I + \beta V - \gamma L - \delta C,$$

bu yerda:

I — interaktivlik;

V — vizual sifat;

L — kechikish;

C — foydalanuvchi trafik xarajati;

α, β, γ va δ — tizim siyosatiga bog‘liq vazn koeffitsientlari.

An'anaviy grafik tizimlarda β, ya'ni vizual sifat koeffitsienti yuqori ustuvorlikka ega bo‘lishi mumkin. Inklyuziv server rendering platformasida esa α va δ koeffitsientlariga — interaktivlik va trafik iqtisodiga — yuqori ahamiyat berish maqsadga muvofiq.

Edge computing va geografik tenglik. Markazlashgan bulut serveri foydalanuvchidan geografik jihatdan uzoqda joylashsa, fizik tarmoq kechikishi tizim samaradorligini cheklaydi. Shu sababli edge computing server renderlashning raqamli tenglik salohiyatini oshiruvchi muhim texnologik mexanizm hisoblanadi.

Foydalanuvchiga yaqin edge tugunida GPU resursining joylashtirilishi T_up va T_down komponentlarini kamaytirishi mumkin. Bu ayniqsa interaktiv 3D ta'lim, virtual laboratoriya va masofaviy muhandislik tizimlarida muhimdir.

Biroq edge infratuzilmasining o‘zi iqtisodiy jihatdan rivojlangan hududlarda tezroq tashkil etilishi ehtimoli mavjud. Natijada yangi geografik tafovut yuzaga kelishi mumkin:

cloud-rich region → low latency;

edge-poor region → high latency.

Demak, server renderingni raqamli tenglik vositasi sifatida joriy etishda GPU serverlarning faqat texnik samaradorligi emas, balki geografik taqsimlanishi ham hisobga olinishi kerak.

Muhokama. Tadqiqotning nazariy va texnik tahlili server tomonida 3D renderlashni raqamli tenglik kontekstida ikki tomonlama texnologiya sifatida baholash zarurligini ko‘rsatadi.

Bir tomondan, ushbu texnologiya apparatga asoslangan diskriminatsiyani kamaytirish imkonini beradi. Dastur ishlab chiquvchi minimal GPU talabini kamaytirib, grafik hisoblashni markaziy infratuzilmada bajarishi mumkin. Bu foydalanuvchining qimmat grafik karta xarid qilish zaruratini kamaytiradi.

Ikkinchi tomondan, server renderlash trafik talabini oshiradi. Lokal renderlash tizimida 3D model bir marta yuklab olinib, keyingi kadrlar lokal qurilmada yaratilishi mumkin. Remote

rendering tizimida esa foydalanuvchi tizim bilan ishlayotgan butun vaqt davomida uzluksiz video oqimini qabul qiladi.

Masalan, 10 Mbit/s o‘rtacha oqim bir soat davomida nazariy jihatdan:

10 Mbit/s × 3600 s = 36 000 Mbit ≈ 4,5 GB

trafik hosil qilishi mumkin.

Siqish, adaptiv bitreyt va real protokol xarajatlari sababli amaliy ko‘rsatkich konfiguratsiyaga qarab farqlanadi. Shunga qaramay, trafik hajmi internet narxi yuqori bo‘lgan foydalanuvchilar uchun iqtisodiy to‘siqqa aylanishi mumkin.

Shu sababli server tomonida renderlashning raqamli tenglikka ta'sirini faqat FPS orqali baholash metodologik jihatdan noto‘g‘ri bo‘ladi. Kamida to‘rtta indikator birgalikda ko‘rib chiqilishi lozim: qurilmalararo FPS tafovuti, interaktiv kechikish, trafik sarfi va xizmatning foydalanuvchi uchun umumiy iqtisodiy qiymati.

Tadqiqot natijalaridan kelib chiqib, raqamli tenglikka yo‘naltirilgan 3D platforma uchun gibrid renderlash modeli eng istiqbolli yondashuvlardan biri sifatida baholanadi. Lokal qurilma oddiy rasterizatsiya yoki interfeys elementlarini qayta ishlashi, server esa ray tracing, global illumination yoki murakkab fizik simulyatsiya kabi og‘ir vazifalarni bajarishi mumkin.

Bunday yondashuv “hamma narsani serverda renderlash” paradigmasidan “zarur hisoblashni optimal joyda bajarish” paradigmasiga o'tishni anglatadi.

Asosiy ilmiy xulosa shundan iboratki, server tomonida 3D renderlash raqamli tengsizlikni to‘liq bartaraf etmaydi. Texnologiya tengsizlikning asosiy manbasini transformatsiya qiladi: lokal GPU va qurilma quvvatiga bog‘liq tafovut tarmoq sifati, kechikish, trafik narxi va edge infratuzilmasining geografik mavjudligiga bog‘liq tafovutga aylanishi mumkin.

Shu sababli raqamli tenglikka yo‘naltirilgan server rendering tizimlarini ishlab chiqishda quyidagi tamoyillar muhim hisoblanadi: adaptiv bitreyt va rezolyutsiyadan foydalanish; past o'tkazuvchanlik sharoiti uchun alohida xizmat rejimini yaratish; foydalanuvchiga yaqin edge GPU tugunlarini tashkil etish; trafik sarfini optimallashtirish; sof cloud rendering o‘rniga gibrid va distributed rendering arxitekturalarini tadqiq etish.

Kelgusidagi tadqiqotlarda taklif etilgan metodologiyani real GPU server va turli segmentdagi mobil hamda kompyuter qurilmalarida eksperimental tekshirish maqsadga muvofiq. Shuningdek, O‘zbekiston hududlaridagi real mobil tarmoq kechikishi va o'tkazuvchanlik ko‘rsatkichlari asosida server rendering xizmatining geografik samaradorlik xaritasini ishlab chiqish istiqbolli ilmiy yo‘nalish hisoblanadi.

Umuman olganda, server tomonida 3D renderlashni faqat grafik texnologiya sifatida emas, balki hisoblash resurslariga kirishni qayta taqsimlovchi raqamli infratuzilma modeli sifatida baholash lozim. To‘g‘ri arxitektura va adaptiv tarmoq mexanizmlari asosida ushbu texnologiya yuqori sifatli 3D xizmatlarni kengroq foydalanuvchilar qatlamiga yetkazish va apparatga asoslangan raqamli tafovutni kamaytirishga xizmat qilishi mumkin.

Xulosa. Mazkur tadqiqotda server tomonida 3D renderlash texnologiyasining raqamli tenglikni ta'minlashdagi imkoniyatlari texnik-empirik nuqtai nazardan tahlil qilindi. Tahlil natijasida server renderlash murakkab grafik hisoblash jarayonlarini foydalanuvchi qurilmasidan GPU server infratuzilmasiga ko‘chirish orqali lokal apparat quvvatiga bo‘lgan bog‘liqlikni kamaytirishi aniqlandi.

Taklif etilgan Device Performance Gap modeli server renderlash sharoitida turli quvvatga ega qurilmalar o‘rtasidagi samaradorlik tafovutini miqdoriy baholash imkonini beradi. Ssenariy asosidagi hisoblashlarda lokal renderlash uchun 80 foizlik qurilmalararo tafovut kuzatilishi mumkin bo‘lgan holatda server renderlash ushbu ko‘rsatkichni taxminan 3,3 foizgacha kamaytirishi ko‘rsatildi. Biroq mazkur raqamlar real tajriba natijasi emas, balki taklif etilgan eksperimental metodologiyani tushuntiruvchi model qiymatlaridir.

Foydalanilgan adabiyotlar

1. International Telecommunication Union. *Measuring Digital Development: Facts and Figures 2024*. Geneva: ITU, 2024.
2. Shi, S., Hsu, C.-H. “A Survey of Interactive Remote Rendering Systems.” *ACM Computing Surveys*, Vol. 47, No. 4, Article 57, 2015. DOI: 10.1145/2719921.
3. Cloete, R., Holliman, N. “Measuring and Simulating Latency in Interactive Remote Rendering Systems.” *arXiv preprint arXiv:1905.05411*, 2019.
4. Mahmoud, H. et al. “A Systematic Review on WebRTC for Potential Applications and Challenges.” *Multimedia Tools and Applications*, 2025.
5. Tan, Y. W., Tan, A., Nge, N., Bhojan, A. “DHR: Distributed Hybrid Rendering for Metaverse Experiences.” *arXiv preprint arXiv:2210.15835*, 2022.
6. Tan, Y. W., Low, S. E., Chow, J., Teo, J., Bhojan, A. “DHR+S: Distributed Hybrid Rendering with Realistic Real-Time Shadows for Interactive Thin Client Metaverse and Game Applications.” *The Visual Computer*, 2024. DOI: 10.1007/s00371-024-03501-4.
7. Mwalongo, F., Krone, M., Reina, G., Ertl, T. “State-of-the-Art Report in Web-based Visualization.” *Computer Graphics Forum*, Vol. 35, No. 3, 2016.
8. Khan, M. A. et al. “A Survey on Mobile Edge Computing for Video Streaming.” *arXiv preprint arXiv:2209.05761*, 2022.
9. Liu, D. et al. “Implementation of Interactive Three-Dimensional Visualization of Air Pollutants Using WebGL.” *Environmental Modelling & Software*, 2019.
10. Discher, S. *Real-Time Rendering Techniques for Massive 3D Point Clouds*. Doctoral dissertation, University of Potsdam, 2023.
11. International Telecommunication Union. *Facts and Figures 2024: Internet Use*. ITU Telecommunication Development Sector, 2024.
12. Casasnovas, M. et al. “Experimental Evaluation of Interactive Edge/Cloud Virtual Reality Streaming over Wi-Fi 6 and WebRTC.” *Computer Communications*, 2024.