KO‘P FOYDALANUVCHILI VIRTUAL BORLIQ TIZIMLARIDA USTUVORLASHTIRISH BILAN INTEGRATSIYALANGAN HOLAT KOMPENSATSIYASI: 6DoF OG‘ISH O‘LCHOVI VA VIZUAL SAKRASH XATOSINING NAZARIY BAHOLARI

J.J.Munirov[1]

1. Osiyo xalqaro universiteti stajyor-o‘qituvchisi

Mas'ul muallif: Munirov Jonibek Jamshed o‘g‘li, Osiyo xalqaro universiteti stajyor-o‘qituvchisi.

e-mail: munirovjonibek@gmail.com

Received: 04 Noyabr 2026
Accepted: 09 Noyabr 2026
Published: 14 Noyabr 2026

Copyright: © 2026 by the author(s). Licensee Buxoro xalqaro universiteti ilmiy axborotnomasi.

Iqtibos uchun: Munirov, J. J. KO‘P FOYDALANUVCHILI VIRTUAL BORLIQ TIZIMLARIDA USTUVORLASHTIRISH BILAN INTEGRATSIYALANGAN HOLAT KOMPENSATSIYASI: 6DoF OG‘ISH O‘LCHOVI VA VIZUAL SAKRASH XATOSINING NAZARIY BAHOLARI / J. J. Munirov // Buxoro xalqaro universiteti ilmiy axborotnomasi. — 2026. — T. 11, № 1. — B. 374–378.

Annotatsiya. Maqolada heterogen tarmoq sharoitida ishlovchi ko‘p foydalanuvchili virtual borliq (VR) tizimlarida bashoratli ekstrapolyatsiya (dead reckoning) asosidagi holat kompensatsiyasini ma’lumot uzatish ustuvorligi bilan birgalikda modellashtirish masalasi qaralgan. Pozitsiya va kvaternion ko‘rinishidagi aylanishni qamrab oluvchi 6DoF og‘ish o‘lchovi, og‘ishni o‘z ichiga olgan ustuvorlik funksiyasi, yuborish oralig‘i hamda qabul qiluvchi tomondagi holat kelishuvi sxemalari rasmiylashtirilgan. Chegaralangan tezlanish farazida ekstrapolyatsiya xatosi ma’lumot yoshining kvadratiga mutanosib ekani, aylanish uchun Grönwall tengsizligiga asoslangan yuqori baho, paket yo‘qotishini hisobga olgan holda ma’lumot yoshi chegarasi va og‘ish hadi kiritilganda xatoning o‘z-o‘zini cheklash xossasi isbotlangan. Holat kelishuvining keng tarqalgan «to‘g‘ridan-to‘g‘ri quvish» shakli doimiy kechikish beradi; siljishni so‘ndirish sxemasi esa uni yo‘qotadi va vizual sakrashni chegaralaydi. Statik vaznlarda sekin ulanishli foydalanuvchi ikki karra noqulay holatga tushishi ko‘rsatilgan. Natijalar sonli misolda tasvirlangan; eksperimental baholash keyingi ishlarda bajariladi.

Kalit so'zlar: virtual borliq, dead reckoning, holat kompensatsiyasi, ustuvorlashtirish, ma’lumot yoshi, kvaternion, vizual sakrash xatosi, heterogen tarmoq.

Kirish. Ko‘p foydalanuvchili virtual borliq (VR) tizimlari ta’lim, virtual laboratoriya va masofaviy hamkorlik vositasi sifatida tobora keng qo‘llanilmoqda. Bunday tizimlarda har bir ishtirokchining holati - boshi va qo‘llarining pozitsiyasi va aylanishi - tarmoq orqali boshqa ishtirokchilarga uzluksiz uzatiladi. Ko‘p foydalanuvchili XR dasturiy tizimlaridagi 2649 ta real nosozlik tahlilida holat sinxronlash nomuvofiqligi eng ko‘p uchraydigan toifa bo‘lib, barcha nosozliklarning 18,0 foizini tashkil etgani qayd etilgan [1]. Interaktiv ko‘p foydalanuvchili VR’da tarmoq kechikishi foydalanuvchi tajribasi, samaradorlik va hamkorlikka salbiy ta’sir ko‘rsatishi eksperimental tarzda o‘rganilgan [2]; kechikishning real vaqtli ko‘p o‘yinchili o‘yinlarga ta’siri ham avvalroq tadqiq etilgan [3].

Kechikishni foydalanuvchidan yashirishning klassik usuli - bashoratli ekstrapolyatsiya (dead reckoning, DR): qabul qiluvchi obyektning oxirgi ma’lum holati va tezligidan uning joriy holatini taxmin qiladi. Bu yondashuv taqsimlangan interaktiv simulyatsiya (DIS) standartida qo‘llanilgan [4] va tarmoq o‘yinlarida kechikishni kompensatsiyalash usullari sharhida ham o‘rganilgan [5]; DR asosidagi tizimlarda aniqlik masalasi alohida o‘rganilgan [6].

Heterogen tarmoqda - bir sessiyada tez va sekin ulanishlar birga bo‘lganda - tarmoq resursini tejash uchun yangilanishlar ustuvorlik asosida, masalan, qiziqish zonasini boshqarish usullari bilan tanlab yuboriladi [7]. Biroq bu holda DR sifati yuborish jadvaliga bevosita bog‘liq bo‘lib qoladi: yangilanish qancha kam yuborilsa, ekstrapolyatsiya shuncha uzoq davom etadi va xato shuncha ortadi. Amaliyotda ustuvorlashtirish va holat kompensatsiyasi odatda alohida loyihalanadi, VR uchun muhim bo‘lgan aylanish (6DoF) va qabul qiluvchi tomondagi silliqlash bosqichining vizual sifatga ta’siri esa ular bilan birgalikda kam tahlil qilinadi. Ma’lumot yangiligini o‘lchash uchun ma’lumot yoshi (Age of Information) tushunchasi taklif etilgan [8], biroq u VR’dagi ko‘rinish xatosi bilan bevosita bog‘lanmagan.

Ushbu maqolaning maqsadi - ustuvorlashtirish bilan integratsiyalangan holat kompensatsiyasining rasmiy modelini qurish va uning xossalarini nazariy baholash. Maqolaning hissasi quyidagilardan iborat: (i) pozitsiya va aylanishni birlashtiruvchi 6DoF og‘ish o‘lchovi va uni o‘z ichiga olgan ustuvorlik hamda yuborish oralig‘i modeli; (ii) chegaralangan tezlanish farazida ekstrapolyatsiya xatosi, ma’lumot yoshi va vizual sakrash uchun beshta tasdiq ko‘rinishidagi yuqori baholar; (iii) amaliy ahamiyatga ega ikki xulosa - keng tarqalgan silliqlash sxemasining doimiy kechikishi va statik vaznlarda sekin foydalanuvchining ikki karra noqulay holati; (iv) natijalarning sonli tasviri. Ish muallifning ko‘p agentli moslashuvchan sinxronlash bo‘yicha tadqiqotining bir qismi bo‘lib, uning CRDT asosidagi muvofiqlashtirish qatlami avvalgi maqolada tahlil qilingan [11].

1. TIZIM MODELI

1.1. Holat va ekstrapolyatsiya

N ta foydalanuvchi-agentdan iborat tizimni qaraymiz. i-agentning t paytdagi holati si(t) = (pi(t), qi(t), vi(t), ωi(t)) bilan beriladi, bu yerda pi ∈ ℝ3 - pozitsiya, qi - birlik kvaternion ko‘rinishidagi aylanish, vi - chiziqli tezlik, ωi - dunyo koordinatalaridagi burchak tezligi. Yangilanish g paytda hosil qilinadi va si(g) ni o‘z ichiga oladi. Qabul qiluvchi birinchi tartibli ekstrapolyatsiyani qo‘llaydi (Δ = t − g):

p̂i(t) = pi(g) + vi(g)·Δ, (1)

q̂i(t) = exp(½·ωi(g)·Δ) ⊗ qi(g), (2)

bu yerda exp(½·ωΔ) - ω o‘qi atrofida ‖ω‖Δ burchakka burishni ifodalovchi kvaternion, ⊗ - kvaternion ko‘paytmasi. Aylanishlar orasidagi oraliq qiymatlar sferik chiziqli interpolyatsiya (SLERP) bilan hisoblanadi [9].

1.2. 6DoF og‘ish o‘lchovi

Pozitsiya va burchak og‘ishlari quyidagicha aniqlanadi:

Δpi(t) = ‖pi(t) − p̂i(t)‖, Δθi(t) = 2·arccos|⟨qi(t), q̂i(t)⟩|. (3)

Δθ ∈ [0, π] - ikki aylanish orasidagi eng kichik burchak; modul belgisi q va −q bir xil aylanishni ifodalashini hisobga oladi. Ikki og‘ish birliklari har xil bo‘lgani uchun ular [0, 1] oralig‘iga keltirilib, birlashtiriladi:

Di(t) = (1 − r)·min(Δpi/dmax, 1) + r·min(Δθi/θmax, 1), (4)

bu yerda dmax va θmax - sezgirlik chegaralari, r ∈ [0, 1] - aylanish ulushining vazni.

1.3. Ustuvorlik va yuborish oralig‘i

Har bir agent uzatish ustuvorligini uch omil asosida hisoblaydi:

Pi(t) = α·Ii(t) + β·L̃i(t) + γ·Di(t), α + β + γ = 1, (5)

bu yerda Ii ∈ [0, 1] - qiziqish zonasi modeli bo‘yicha obyekt ahamiyati [7], L̃i ∈ [0, 1] - normallashtirilgan tarmoq holati:

L̃i = (1/Li − 1/Lmax) / (1/Lmin − 1/Lmax), (6)

Li - agentning tarmoq kechikishi. Barcha hadlar [0, 1] oralig‘ida bo‘lgani uchun Pi ∈ [0, 1]. Ustuvorlik yuborish oralig‘ini chiziqli belgilaydi:

τ(P) = τmax − P·(τmax − τmin). (7)

Ya’ni P = 1 da yangilanish har τmin soniyada, P = 0 da har τmax soniyada yuboriladi. Vaznlar (α, β, γ) statik berilishi yoki ko‘p agentli mustahkamlab o‘rganish orqali moslashtirilishi mumkin; ushbu maqolada ular berilgan deb hisoblanadi.

1.4. Ma’lumot yoshi

Qabul qiluvchidagi ma’lumot yoshi - oxirgi qabul qilingan yangilanish hosil qilingandan beri o‘tgan vaqt [8]:

A(t) = t − g(t), (8)

bu yerda g(t) - t paytgacha yetib kelgan eng so‘nggi yangilanishning hosil qilingan vaqti. (1)–(2) ga ko‘ra ekstrapolyatsiya aynan Δ = A(t) vaqt oralig‘ida bajariladi.

1.5. Holat kelishuvi

Yangi yangilanish kelganda bashorat x̂ sakrab o‘zgaradi. Ekranda bu sakrash bevosita ko‘rsatilmasligi uchun ko‘rsatilgan holat x̃ silliqlanadi (h - tick davri, κ ∈ (0, 1] - silliqlash koeffitsienti). Ikki sxemani qaraymiz.

(a) To‘g‘ridan-to‘g‘ri quvish: ko‘rsatilgan holat har tick’da bashorat tomon yaqinlashadi:

x̃n+1 = x̃n + κ·(x̂n+1 − x̃n). (9)

(b) Siljishni so‘ndirish: ko‘rsatilgan holat bashorat va so‘nib boruvchi siljish yig‘indisi sifatida olinadi:

x̃n = x̂n + on, on+1 = (1 − κ)·on, (10)

yangilanish kelganda esa siljish ekran uzluksiz qoladigan qilib yangilanadi: o ← o + (x̂eski − x̂yangi). Aylanish uchun siljish kvaternion bilan ifodalanadi va har tick’da SLERP yordamida birlik kvaternion tomon κ ulushga yaqinlashtiriladi.

1.6. Vizual sakrash xatosi

Foydalanuvchi ko‘radigan sakrash - ko‘rsatilgan holatning bir tick’dagi siljishi:

Jn = ‖x̃n − x̃n−1‖. (11)

Baholash uchun uning o‘rtacha qiymati J̄ va 95-persentili J95 ishlatiladi.

2. Nazariy tahlil

Quyidagi farazlarni qabul qilamiz. F1: chiziqli tezlanish chegaralangan: ‖a(t)‖ ≤ amax. F2: dunyo koordinatalaridagi burchak tezlanishi chegaralangan: ‖dω/dt‖ ≤ εmax. F3: bir tomonlama tarmoq kechikishi Lmax dan oshmaydi, paketlar bir-biridan mustaqil ρ ehtimol bilan yo‘qoladi. F4: yangilanish hosil qilingan paytdagi holatni aniq o‘z ichiga oladi.

1-tasdiq (pozitsiya xatosi). F1 va F4 bajarilganda Δpi(t) ≤ ½·amax·A(t)2.

Isbot. Teylor formulasining integral qoldiqli ko‘rinishiga ko‘ra p(t) = p(g) + v(g)·Δ + ∫gt (t − s)·a(s) ds. (1) ni ayirib, normani baholasak: Δp ≤ amax·∫gt (t − s) ds = ½·amax·Δ2, bu yerda Δ = A(t). Doimiy tezlanishda tenglik bajariladi, ya’ni baho aniq (yaxshilab bo‘lmaydi).

2-tasdiq (aylanish xatosi). F2 va F4 bajarilganda Δθi(t) ≤ εmax·φ(ΩA)·A2, bu yerda Ω = ‖ω(g)‖, φ(x) = (ex − 1 − x)/x2, φ(0) = ½.

Isbot. R(t) - haqiqiy, R̂(t) - ekstrapolyatsiya qilingan aylanish matritsalari, E = R·R̂T - ular orasidagi xato aylanishi bo‘lsin. dR/dt = [ω]×R va dR̂/dt = [ω(g)]×R̂ dan E ning burchak tezligi ω − E·ω(g) ga teng ekani kelib chiqadi. Burilish burchagi θ(E) burchak tezligi normasidan tez o‘smaydi, ‖ω(g) − E·ω(g)‖ ≤ 2·sin(θ/2)·Ω ≤ θ·Ω va F2 bo‘yicha ‖ω(s) − ω(g)‖ ≤ εmax(s − g). Demak, θ′(s) ≤ εmax(s − g) + Ω·θ(s), θ(g) = 0. Grönwall tengsizligi beradi: θ(t) ≤ ∫0Δ εmax·u·eΩ(Δ − u) du = εmax·(eΩΔ − 1 − ΩΔ)/Ω2.

ΩA kichik bo‘lganda φ ≈ ½ va baho ½·εmaxA2 ga yaqinlashadi - 1-tasdiqning aylanish uchun o‘xshashi. Doimiy o‘q

atrofidagi aylanishda baho deyarli aniq; aks holda eΩA ko‘paytuvchi tufayli u ehtiyotkor (ortiqcha) bo‘lishi mumkin.

3-tasdiq (ma’lumot yoshi). Agar yangilanishlar doimiy τ = τ(P) oraliq bilan hosil qilinsa, F3 da: (a) yo‘qotish bo‘lmaganda A(t) ≤ τ + Lmax; (b) har qanday butun m ≥ 1 uchun Pr{A(t) > m·τ + Lmax} ≤ ρm.

Isbot. A(t) > mτ + Lmax bo‘lsa, (t − mτ − Lmax, t − Lmax] oralig‘ida hosil qilingan yangilanishlarning birortasi ham t gacha yetib kelmagan; ular kamida m ta va har biri Lmax ichida yetib kelishi kerak edi, demak hammasi yo‘qolgan. Mustaqillikdan ehtimol ρm dan oshmaydi. ρ = 0 da m = 1 hol (a) ni beradi.

1-natija. 1- va 3-tasdiqlardan, yo‘qotish bo‘lmaganda, Δp ≤ B(P) = ½·amax·(τ(P) + Lmax)2 va ∂B/∂P = −amax·(τ(P) + Lmax)·(τmax − τmin).

Demak, ustuvorlik xatoni kvadratik ravishda kamaytiradi, ustuvorlikni oshirishning foydasi esa sekin (Lmax katta) tarmoqda kattaroq. Bu ustuvorlikni sekin ulanishli foydalanuvchilarga yo‘naltirish adolatlilik nuqtai nazaridan samarali ekanini ko‘rsatadi.

4-tasdiq (o‘z-o‘zini cheklash). Yuboruvchi t − tk ≥ τ(P(t)) shart bajarilishi bilan yangilanish yuborsin (tk - oxirgi yuborish payti; qaror uzluksiz vaqtda qabul qilinadi) va γ(1 − r) > 0 bo‘lsin. U holda F1 da yuboruvchi tomonidagi og‘ish har doim Δp ≤ max{dmax, ½·amax·τ̄2}, bu yerda τ̄ = τmax − γ(1 − r)·(τmax − τmin).

Isbot. Δp ≥ dmax bo‘lgan har qanday paytda (4) ga ko‘ra D ≥ 1 − r, (5) dan P ≥ γ(1 − r) va (7) dan τ(P) ≤ τ̄. [tk, tk + τ̄] oralig‘ida 1-tasdiq bo‘yicha Δp ≤ ½·amax·τ̄2. tk + τ̄ dan keyin esa Δp birinchi marta dmax ga yetgan paytda yuborish sharti bajariladi va yangilanish yuboriladi; agar tk + τ̄ paytda Δp ≥ dmax bo‘lsa, yuborish shu paytning o‘zida sodir bo‘ladi. Δp uzluksiz bo‘lgani uchun har ikki holda ham yuborishdan oldingi og‘ish max{dmax, ½·amaxτ̄2} dan oshmaydi.

Qarorlar h davrli tick’larda qabul qilinsa, chegaraga O(h) tartibli tuzatish qo‘shiladi.

Xususiy holda γ = 1, r = 0 bo‘lsa, τ̄ = τmin va model DIS’dagi chegaraviy yangilash qoidasiga - og‘ish chegaradan oshganda yuborishga [4] - yaqinlashadi, faqat yuborish tezligi yuqoridan chegaralangan bo‘ladi. Demak, (5) model klassik chegaraviy DR’ni ahamiyat va tarmoq holatini ham hisobga oluvchi «yumshoq» ko‘p mezonli shaklga umumlashtiradi, dmax esa amalda sezgirlik chegarasi vazifasini bajaradi.

5-tasdiq (holat kelishuvi). Doimiy v tezlik bilan harakat va aniq bashorat holida: (a) (9) sxemada ko‘rsatilgan holat bashoratdan barqaror e∞ = (1 − κ)·‖v‖·h/κ masofaga orqada qoladi; (b) (10) sxemada barqaror orqada qolish yo‘q, ‖e‖ kattalikdagi tuzatishdan keyin qoldiq (1 − κ)n‖e‖ bo‘yicha so‘nadi, bir tick’lik sakrash esa J ≤ κ·‖e‖ + ‖v‖·h bilan chegaralangan (bitta tuzatish uchun); qoldiqni δ dan kichik qilish uchun n ≥ ln(δ/‖e‖)/ln(1 − κ) tick kerak.

Isbot. (a) en = x̂n − x̃n desak, (9) va x̂n+1 = x̂n + v·h dan en+1 = (1 − κ)(en + v·h); qo‘zg‘almas nuqta e∞ = (1 − κ)vh/κ. (b) (10) da x̃n − x̂n = on va on = (1 − κ)no0; Jn = ‖v·h + on − on−1‖ ≤ ‖v‖h + κ‖on−1‖ ≤ ‖v‖h + κ‖e‖.

Tuzatish kattaligi ‖e‖ eski va yangi bashoratlarning yangilanish kelgan paytdagi farqiga teng, shu sababli 1- va 3-tasdiqlardan ‖e‖ ≤ ½·amax((τ + Lmax)2 + Lmax2). Shunday qilib, vizual sakrash ustuvorlik, tarmoq kechikishi va silliqlash koeffitsientiga bir vaqtda bog‘liq: κ ni kamaytirish sakrashni kichraytiradi, lekin xatoni tuzatish vaqtini uzaytiradi.

2-natija (sekin foydalanuvchining ikki karra noqulayligi). Statik vaznlarda va bir xil I, D qiymatlarida sekin (s) va tez (f) agentlarning yuborish oraliqlari farqi τs − τf = β·(L̃f − L̃s)·(τmax − τmin) ≥ 0, ma’lumot yoshi chegaralari farqi esa (Ls − Lf) + β·(L̃f − L̃s)·(τmax − τmin) ga teng.

Ya’ni sekin foydalanuvchining ma’lumoti ham kechroq yetib boradi, ham kamroq yuboriladi. 1-natija bilan birgalikda bu vaznlarni har bir foydalanuvchining holatiga qarab moslashtirish (masalan, mustahkamlab o‘rganish orqali) zarurligini asoslaydi. Shuni ham ta’kidlash kerakki, (6) normallashtirish Lmin kichik bo‘lganda real kechikishlar oraliG‘ini kuchli siqadi (3-bo‘limga qarang); logarifmik normallashtirish L̃ = ln(Lmax/L)/ln(Lmax/Lmin) bu kamchilikdan holi.

3. Sonli misol

Tasdiqlarni tasvirlash uchun quyidagi parametrlarni olamiz: τmin = 0,05 s, τmax = 0,5 s, κ = 0,3, h = 0,05 s, ‖v‖ = 1,5 m/s. Tezlanish chegarasi amax = 2 m/s^2 misol uchun tanlangan bo‘lib, o‘lchangan qiymat emas. Hisoblar (1)–(11) formulalar asosida bajarilgan; bu eksperimental natija emas, balki chegaralarning tasviri. 1-jadvalda turli ustuvorlik va kechikish qiymatlari uchun yuborish oraliG‘i, pozitsiya og‘ishi chegarasi B(P) va (10) sxemadagi bir tick’lik sakrash chegarasi keltirilgan.

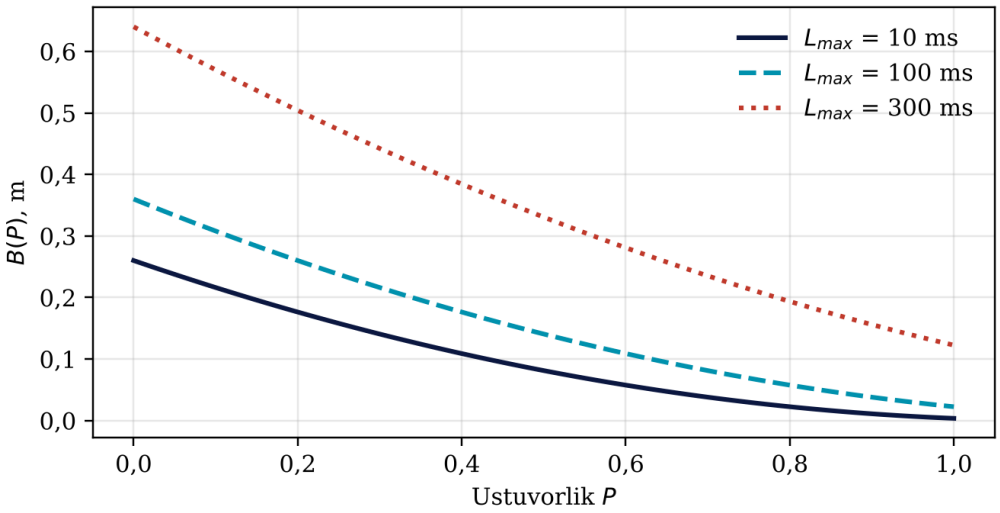
1-jadval.

Og‘ish va sakrash chegaralari (amax = 2 m/s^2, κ = 0,3, h = 0,05 s, ‖v‖ = 1,5 m/s)

Lmax, ms	P	τ(P), s	B(P), m	J chegarasi, m
10	0	0,500	0,260	0,153
10	0,5	0,275	0,081	0,099
10	1	0,050	0,004	0,076
100	0	0,500	0,360	0,186
100	0,5	0,275	0,141	0,120
100	1	0,050	0,022	0,085
300	0	0,500	0,640	0,294
300	0,5	0,275	0,331	0,201
300	1	0,050	0,122	0,139

1-rasmda B(P) ning ustuvorlikka bog‘liqligi ko‘rsatilgan. 1-natijaga mos ravishda egri chiziqning qiyaligi kechikish

katta bo‘lganda keskinroq: P = 0,5 nuqtada ∂B/∂P qiymati Lmax = 10 ms da −0,257, 100 ms da −0,338, 300 ms da −0,517 m ga teng.



1-rasm. Pozitsiya og‘ishi yuqori chegarasining ustuvorlikka bog‘liqligi

5-tasdiqning (a) bandiga ko‘ra, yuqoridagi parametrlarda (9) sxema bashorat aniq bo‘lgan taqdirda ham avatarni e∞ = 0,7·1,5·0,05/0,3 = 0,175 m ga orqada ko‘rsatadi - bu foydalanuvchi uchun sezilarli xato bo‘lishi mumkin; (10) sxemada bu xato nolga teng. 4-tasdiq uchun dmax = 0,1 m, γ = 0,33, r = 0,5 olinsa, τ̄ = 0,426 s va yuboruvchi tomonidagi og‘ish chegarasi 0,181 m bo‘ladi; γ = 1, r = 0 da esa chegara dmax = 0,1 m ga tushadi.

2-natijani tasvirlash uchun (6) normallashtirishni Lmin = 1 ms, Lmax = 500 ms bilan olamiz. Unda L = 5 ms (optik tola) uchun Ľ = 0,198, L = 200 ms (sekin mobil tarmoq) uchun Ľ = 0,003; logarifmik normallashtirishda mos ravishda 0,741 va 0,147. β = 0,33 da yuborish oraliqlari farqi chiziqli normallashtirishda 0,029 s, logarifmikda 0,088 s ni tashkil etadi. Bundan ko‘rinadiki, chiziqli normallashtirishda tarmoq hadi tez va sekin ulanishlarni deyarli ajratmaydi, sekin foydalanuvchining asosiy noqulayligi esa kechikishning o‘zidan kelib chiqadi.

Tasdiqlardagi chegaralar tasodifiy tezlanish va burchak tezlanishiga ega traektoriyalarda sonli modellashtirish yo‘li bilan qo‘shimcha tekshirildi: barcha hollarda kuzatilgan og‘ishlar nazariy chegaralardan oshmadi, doimiy tezlanishda esa 1-tasdiqdagi chegaraga aniq erishildi.

4. Muhokama. Olingan natijalar uchta amaliy xulosaga olib keladi. Birinchidan, holat kompensatsiyasi sifati yuborish jadvalidan ajralmas: 1-tasdiq va 1-natijaga ko‘ra xato ma’lumot yoshining kvadratiga mutanosib, shuning uchun ustuvorlikni loyihalashda vizual xato bevosita maqsad funksiyasiga kiritilishi kerak. Og‘ish hadi γD shuni ta’minlaydi va 4-tasdiq bo‘yicha xatoning yuqori chegarasini kafolatlaydi. Ikkinchidan, holat kelishuvi sxemasi vizual sifatga alohida hissa qo‘shadi: to‘g‘ridan-to‘g‘ri quvish sxemasi bashorat aniq bo‘lganda ham doimiy orqada qolish beradi, siljishni so‘ndirish esa uni bartaraf etib, sakrashni κ va tuzatish kattaligi orqali chegaralaydi. Uchinchidan, statik vaznlar sekin foydalanuvchini ikki karra noqulay holatga qo‘yadi, ustuvorlikni oshirishning foydasi esa aynan unda kattaroq; bu vaznlarni foydalanuvchi holatiga qarab moslashtirish zaruratini nazariy jihatdan asoslaydi.

Modelning cheklovlari ham mavjud. Birinchi tartibli ekstrapolyatsiya va chegaralangan tezlanish farazlari inson harakatining keskin o‘zgarishlarida buzilishi mumkin; bir tomonlama kechikish uchun yuqori chegara va paket yo‘qotishining mustaqilligi real tarmoqlarda har doim bajarilmaydi; amax, dmax, θmax, κ kabi parametrlar hozircha o‘lchov asosida tanlanmagan. Shuningdek, 2-tasdiqdagi aylanish bahosi umumiy holda ehtiyotkor bo‘lishi mumkin.

Taklif etilgan model muallif tomonidan ishlab chiqilayotgan «Hamohang» dasturiy stendida amalga oshirilgan: 3D pozitsiya va kvaternion aylanish bo‘yicha ekstrapolyatsiya, (4) og‘ish o‘lchovi, (5) ustuvorlik va (7) yuborish oralig‘i, heterogen tarmoq simulyatori hamda (11) vizual sakrash metrikasi. Keyingi bosqichda real tarmoq o‘lchovlari asosida integratsiyalangan model faqat ekstrapolyatsiyadan foydalanuvchi bazaviy usul bilan bir xil sharoitda, ko‘p marta takrorlangan simulyatsiyalarda solishtiriladi (juftlangan Wilcoxon testi bilan), so‘ngra natijalar real VR muhitida foydalanuvchilar ishtirokida tekshiriladi.

Xulosa. Maqolada ko‘p foydalanuvchili VR tizimlari uchun ustuvorlashtirish bilan integratsiyalangan holat kompensatsiyasining rasmiy modeli taklif etildi: pozitsiya va kvaternion aylanishni birlashtiruvchi 6DoF og‘ish o‘lchovi, og‘ishni o‘z ichiga olgan ustuvorlik funksiyasi, yuborish oralig‘i va holat kelishuvi sxemalari. Chegaralangan tezlanish farazida ekstrapolyatsiya xatosi, ma’lumot yoshi va vizual sakrash uchun yuqori baholar isbotlandi, og‘ish hadi xatoning o‘z-o‘zini cheklashini ta’minlashi, keng tarqalgan silliqlash sxemasining doimiy orqada qolishi va statik vaznlarda sekin foydalanuvchining ikki karra noqulay holati ko‘rsatildi. Bu natijalar ustuvorlik va holat kompensatsiyasini alohida emas, yagona model sifatida loyihalash hamda vaznlarni foydalanuvchi holatiga qarab moslashtirish zarurligini asoslaydi. Modelni real tarmoq o‘lchovlari asosida simulyatsiyada va VR muhitida eksperimental baholash keyingi ishlarning mavzusidir.

Foydalanilgan adabiyotlar ro'yxati

[1] Li S., Zhang C., Li B., Gao C., Lyu M. R. When shared worlds break: Demystifying defects in multi-user extended reality software systems. arXiv:2510.01182, 2025.

[2] Van Damme S., Sameri J., Schwarzmann S., Wei Q., Trivisonno R., De Turck F., Torres Vega M. Impact of latency on QoE, performance, and collaboration in interactive multi-user virtual reality // Applied Sciences. 2024. Vol. 14, No. 6. Art. 2290.

[3] Pantel L., Wolf L. C. On the impact of delay on real-time multiplayer games // Proceedings of NOSSDAV '02. ACM, 2002. DOI: 10.1145/507670.507674.

[4] IEEE Std 1278.1-2012. IEEE Standard for Distributed Interactive Simulation - Application Protocols. IEEE, 2012.

[5] Liu S., Xu X., Claypool M. A survey and taxonomy of latency compensation techniques for network computer games // ACM Computing Surveys. 2022. Vol. 54, No. 11s. Art. 243.

[6] Aggarwal S., Banavar H., Khandelwal A., Mukherjee S., Rangarajan S. Accuracy in dead-reckoning based distributed multi-player games // Proceedings of ACM SIGCOMM 2004 Workshops on NetGames '04. ACM, 2004. DOI: 10.1145/1016540.1016559.

[7] Liu E. S., Theodoropoulos G. K. Interest management for distributed virtual environments: A survey // ACM Computing Surveys. 2014. Vol. 46, No. 4. Art. 51.

[8] Kaul S., Yates R., Gruteser M. Real-time status: How often should one update? // Proceedings IEEE INFOCOM 2012. P. 2731–2735. DOI: 10.1109/INFCOM.2012.6195689.

[9] Shoemake K. Animating rotation with quaternion curves // ACM SIGGRAPH Computer Graphics. 1985. Vol. 19, No. 3. P. 245–254. DOI: 10.1145/325165.325242.

[10] Hatami M., Qu Q., Chen Y., Kholidy H., Blasch E., Ardiles-Cruz E. A survey of the real-time metaverse: Challenges and opportunities // Future Internet. 2024. Vol. 16, No. 10. Art. 379.

[11] Munirov, J. J. TAQSIMLANGAN TIZIMLARDA KONFLIKTSIZ REPLIKATSIYALANUVCHI MA'LUMOT TURLARI (CRDT): NAZARIY TAHLIL VA RESURS-CHEKLANGAN REAL VAQTLI MUHITLAR UCHUN KONTSEPTUAL KENGAYTMA / J. J. Munirov // Buxoro xalqaro universiteti ilmiy axborotnomasi. - 2026. - T. 9, № 2. - B. 296–300. - DOI: 10.67780/buxoro-xalqaro-universiteti-ilmiy-axborotnomasi.2026.54bc6f34.