

УДК 004.946:004.77

ІМЕРСИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ У ВЕБ: ВИКЛИКИ ПРОДУКТИВНОСТІ ТА ПАРАДИГМИ ВЗАЄМОДІЇ

О. В. Литовченко, Б. І. Мозіль, І. І. Думанський

*Національний університет «Львівська політехніка»,
вул. Князя Романа, 5, Львів, 79005, Україна*

Стаття присвячена комплексному аналізу наукових досліджень використання імерсивних технологій у веб-середовищі (WebXR). Розглянуто подвійний виклик, що стоїть перед дослідниками та індустрією: забезпечення паритету продуктивності з нативними застосунками та створення нових, інтуїтивних парадигм взаємодії користувача з віртуальним середовищем. Проаналізовано ключові вузькі місця рендерингу, такі як надлишкове перемальовування та складність шейдерів, та сучасні методи оптимізації, зокрема перехід на WebGPU та використання WebAssembly для виконання інтенсивних обчислювальних завдань. Досліджено еволюцію користувацького досвіду від базових патернів до мультимодальних систем, що поєднують відстеження рук, погляду та голосу. Особливу увагу приділено проблемам доступності та появі нових сфер застосування, як-от ситуаційна аналітика. На основі аналізу узагальнено відкриті питання, що визначають напрями подальших досліджень у галузі імерсивного вебу.

Ключові слова: імерсивні технології, веб, продуктивність, парадигми взаємодії, користувацький досвід, доступність, AR, VR, WebXR, WebGPU, WebAssembly.

Постановка проблеми. Протягом останніх років екосистема WebXR зазнала стрімкої трансформації, перетворившись із нішевої експериментальної технології на повноцінну платформу для створення масових імерсивних застосунків. Ця еволюція зумовлена конвергенцією кількох технологічних напрямів, зокрема впровадженням мереж п'ятого покоління (5G), вдосконаленням методів компресії 3D-асетів і появою нового покоління XR-апаратного забезпечення [1, 2].

Центральною проблемою сучасного розвитку WebXR є подвійний виклик: з одного боку – досягнення продуктивності, співмірної з нативними застосунками, а з іншого – формування нових парадигм взаємодії, що поєднують інтуїтивність, ефективність та інклюзивність. Актуальним завданням є систематизація знань про технічні та людиноцентричні бар'єри, які стримують поширення імерсивного вебу, а також аналіз сучасних підходів, спрямованих на подолання цих обмежень.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Наукові дослідження у сфері WebXR активно розвиваються у двох головних напрямках: підвищення продуктивності та вдосконалення взаємодії користувача з імерсивними середовищами.

У напрямі продуктивності триває активна дискусія щодо переходу від WebGL до нового графічного API WebGPU, який розроблено з урахуванням сучасної

архітектури графічних процесорів. Науковці відзначають, що WebGPU забезпечує прямий доступ до низькорівневих обчислювальних ресурсів і підтримує обчислювальні шейдери, що є критично важливим для складних фізичних симуляцій та високопродуктивних 3D-сцен [3]. Водночас практичні дослідження показують, що приріст продуктивності не є автоматичним і вимагає суттєвого перегляду архітектури рендеринг-рушіїв та оптимізації графічних конвеєрів під нову модель виконання [4].

Паралельно, інші дослідники підкреслюють стратегічну роль WebAssembly (Wasm) у досягненні майже нативної швидкості виконання коду. Завдяки можливості компіляції з мов C++, Rust або Go, WebAssembly забезпечує ефективне виконання обчислювально інтенсивних процесів, таких як фізичні симуляції, комп'ютерний зір чи алгоритми штучного інтелекту, що дає змогу розвантажити основний потік JavaScript і забезпечити стабільність роботи застосунків [5].

Нещодавні порівняльні дослідження ігрових рушіїв продемонстрували, що WebXR стрімко скорочує розрив із нативними технологіями і вже може вважатися повноцінною платформою для створення застосунків у сфері іммерсивної аналітики та візуалізації даних [6].

Другий важливий напрям – взаємодія користувача та UX. Сучасні дослідження фіксують перехід від унімодальних інтерфейсів до мультимодальних систем, які поєднують кілька каналів введення: погляд, жести, мову та рух. Експериментальні дані підтверджують, що тривале використання одного методу взаємодії, наприклад жестів, призводить до фізичної втоми, відомої як «ефект руки горили», тоді як голосові команди створюють підвищене когнітивне навантаження та вимагають додаткових зусиль для запам'ятовування команд [7].

Як одне з рішень запропоновано синергетичні мультимодальні системи, які комбінують різні методи взаємодії. Одним із прикладів є техніка GazeHand2, що використовує погляд для швидкого націлювання на об'єкти та жести рук для точного маніпулювання, завдяки чому зменшується втома користувача та підвищується точність дій [8].

Поряд із цим, дослідження також звертають увагу на етичні та безпекові аспекти взаємодії. Зокрема, показано, що унікальні властивості WebXR можуть бути використані для створення нових типів «темних патернів», здатних маніпулювати поведінкою користувачів у віртуальних середовищах [9].

Не менш важливим напрямом є доступність XR. Ініціативи на кшталт XR Access працюють над адаптацією принципів WCAG для іммерсивних середовищ, створюючи методики забезпечення доступності для користувачів із сенсорними та моторними обмеженнями [10, 11].

Окремий інтерес становить нова сфера досліджень – ситуаційна аналітика (situated analytics), яка передбачає інтеграцію візуалізації даних у фізичне оточення користувача. Сучасні оглядові роботи демонструють, що такий підхід сприяє природнішому сприйняттю складних даних у контексті реального простору [12].

Незважаючи на помітний прогрес, залишаються відкритими проблеми: відсутність стандартизованих бенчмарків для WebGPU, нестача формалізованих

рекомендацій щодо доступності XR і недостатня кількість досліджень когнітивних обмежень під час роботи з даними у середовищах ситуаційної аналітики.

Мета статті – проведення системного аналізу наукових і технологічних досягнень у сфері WebXR із фокусом на двох взаємопов'язаних аспектах: викликах продуктивності та еволюції парадигм взаємодії користувача. Завданням дослідження є визначення ключових технічних вузьких місць у рендерингу, оцінка ефективності сучасних технологій WebGPU та WebAssembly, дослідження тенденцій розвитку UX у напрямі мультимодальності й інклюзивності, а також формулювання перспективних напрямів подальших досліджень у цій галузі.

Виклад основного матеріалу дослідження. Одним із найважливіших викликів для WebXR залишається підтримка стабільної продуктивності. На відміну від традиційних веб-застосунків, де головним критерієм є швидкість завантаження, у XR-середовищах вирішальним є стабільна частота кадрів – зазвичай 72–90 FPS. Зниження цього показника призводить до візуальних артефактів і втрати ефекту присутності, що може викликати кінетоз у користувачів [13].

Більшість WebXR-застосунків належать до категорії *fragment bound*, тобто обмежених швидкодією фрагментного шейдера. Це відбувається через перевантаження графічного процесора (GPU) складними обчисленнями для кожного пікселя. Основними причинами є надлишкове перемальовування (*overdraw*), особливо у сценах із прозорими або напівпрозорими об'єктами, та підвищена складність шейдерів через використання PBR-матеріалів, динамічного освітлення й тіней у реальному часі [13, 14]. Кожне додаткове джерело світла збільшує обчислювальні витрати, оскільки потребує виконання додаткових розрахунків для кожного пікселя.

Продуктивність також може бути обмежена центральним процесором (CPU), особливо якщо сцена містить велику кількість об'єктів, що створює надмірну кількість викликів *draw calls* [13, 14]. Додатковим бар'єром є тривалий час завантаження великих 3D-асетів, що впливає на швидкість запуску XR-досвіду [15].

Для усунення цих обмежень розробники застосовують комплекс перевірених методів оптимізації: об'єднання сіток (*batching*), використання інстансінгу геометрії (*instancing*), рівнів деталізації (*LOD*), а також відсікання невидимих об'єктів (*culling*) [14].

Перехід до WebGPU, який прийшов на зміну WebGL, став важливим етапом у розвитку веб-графіки. WebGPU пропонує асинхронну модель виконання та підтримку обчислювальних шейдерів (GPGPU), що відкриває нові можливості для паралельних обчислень [3]. Проте підвищення продуктивності не відбувається автоматично: ефективне використання WebGPU потребує переосмислення рендеринг-конвеєра та впровадження нових архітектур, здатних одночасно обробляти графічні й обчислювальні задачі [4].

Водночас WebAssembly (Wasm) утвердився як ключовий інструмент для виконання обчислювально інтенсивних завдань, таких як фізичні моделі, симуляції частинок чи системи штучного інтелекту [5]. Завдяки цьому вдалося суттєво зменшити навантаження на CPU та покращити стабільність фреймрейту.

У сфері оптимізації завантаження даних стандартом де-факто став формат glTF/GLB, який у поєднанні з компресією сіток Draco та текстур KTX 2.0 дає змогу зменшити використання відеопам'яті та пришвидшити вибірку текстур [14, 15]. Нові методи потокового передавання 3D-асетів дозволяють поступово завантажувати моделі у фоновому режимі, забезпечуючи швидкий старт XR-досвіду [16].

Для підтримки різних рівнів продуктивності на різних пристроях використовуються системи адаптивної продуктивності, а функція WebXR Layers дозволяє рендерити окремі елементи інтерфейсу або відео безпосередньо засобами XR-пристрою, що підвищує чіткість тексту та загальну швидкодію [1, 2, 17].

Проте навіть найоптимізованіший XR-застосунок буде неефективним без продуманої системи взаємодії користувача. Основна проблема UX у 3D-просторі полягає у відсутності стандартизованих моделей взаємодії та недостатній очевидності афродансів [8, 18]. Користувачі часто не розуміють, які об'єкти можна схопити чи активувати, що ускладнює навігацію у віртуальному просторі.

Класичні методи введення також мають свої обмеження: введення на основі погляду (gaze-based) призводить до напруження очей, керування жестами – до фізичної втоми, а голосові команди створюють високе когнітивне навантаження [7]. Додатково, відсутність безпечних контекстів, подібних до iframe, може спричинити появу маніпулятивних «темних патернів» [9].

Сучасні підходи UX орієнтуються на дієгетичні інтерфейси, які інтегруються безпосередньо у 3D-сцену, підвищуючи рівень занурення користувача [18]. З появою підтримки безконтрольного відстеження рук у WebXR відкривається шлях до більш природної взаємодії, що не потребує додаткових пристроїв.

Ключовою тенденцією стає мультимодальність, яка поєднує погляд, жести та голос. Дослідження GazeHand2 доводить ефективність такого поєднання, оскільки користувач може швидко навести погляд на об'єкт і, використовуючи невеликі жести, виконувати точні маніпуляції без фізичного перенапруження [8].

Крім того, мультимодальні інтерфейси мають природну перевагу у сфері доступності, адже забезпечують альтернативні шляхи взаємодії для людей із різними можливостями. Зусилля спільнот, таких як XR Access, спрямовані на адаптацію стандартів WCAG до XR-контексту, розробку практичних рекомендацій і методик тестування доступності [10, 11].

Водночас розвивається нова сфера – ситуаційна аналітика (situated analytics), яка досліджує інтеграцію візуалізації даних у фізичне оточення користувача. Як показано в оглядовій роботі дослідників [12], поєднання реального простору та цифрових даних відкриває нові можливості для візуальної аналітики та освітніх застосунків.

Висновки. Аналіз сучасних досягнень у сфері WebXR свідчить, що технологія переходить від експериментального до промислового рівня. Водночас вона стикається з двома основними викликами – продуктивністю та взаємодією.

У сфері продуктивності спостерігається неминучий зсув від WebGL до WebGPU, що забезпечує кращу узгодженість із сучасним апаратним забезпеченням, але вимагає повного перегляду архітектури рушіїв. WebAssembly стало стандартом

для виконання обчислювально інтенсивних задач, що наближує веб-застосунки до нативного рівня швидкодії.

У сфері взаємодії формується тенденція переходу до мультимодальних систем, які забезпечують природніший, ефективніший та інклюзивний досвід. Безконтрольне відстеження рук, погляду й голосові інтерфейси відкривають нові горизонти для інтуїтивного дизайну XR-додатків.

На основі проведеного дослідження, для кожного напрямку можна сформулювати перелік подальших досліджень.

У напрямі продуктивності: розроблення стандартизованих бенчмарків для порівняння WebGL та WebGPU, створення нових архітектур рушіїв, оптимізованих під асинхронну природу WebGPU, а також застосування машинного навчання для систем адаптивної продуктивності.

У напрямі взаємодії: дослідження когнітивних, ергономічних та емоційних аспектів мультимодальних інтерфейсів; створення формального набору Рекомендацій з доступності XR (XAG), що розширює WCAG; вивчення перцептивних меж щільності інформації у контексті ситуаційної аналітики.

Розв'язання цих завдань визначить, чи зможе імерсивний веб реалізувати свій потенціал як відкрита, доступна й високопродуктивна платформа для створення наступного покоління цифрових продуктів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. A deeper dive into WebXR support in 3D viewers. URL: <https://www.vntana.com/the-ultimate-guide-to-3d-viewers/the-ultimate-guide-to-3d-viewers-5/>.
2. Macario G. WebXR, A-Frame and Networked-Aframe as a Basis for an Open Metaverse: A Conceptual Architecture [Електронний ресурс]. 2024. URL: <https://arxiv.org/abs/2404.05317>.
3. WebGPU API – MDN Web Docs [Електронний ресурс]. URL: https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/API/WebGPU_API.
4. Chickerur S., Balannavar S., Hongekar P., Prerna A. WebGL vs. WebGPU: A performance analysis for Web 3.0. *Procedia Computer Science*. 2024. Vol. 233. P. 919–928.
5. Khomtchouk B. B. WebAssembly enables low latency interoperable augmented and virtual reality software. *arXiv preprint*. 2021. arXiv:2110.07128.
6. Butcher P., Batch A., Saffo D., MackIntyre B., Elmqvist N., Ritsos P. D. Is native naïve? Comparing native game engines and WebXR as immersive analytics development platforms. *IEEE Computer Graphics and Applications*. 2024. Vol. 44, № 3. P. 91–98.
7. Wang Z., Rao M., Ye S., Song W., Lu F. Towards spatial computing: recent advances in multimodal natural interaction for XR headsets. *arXiv preprint*. 2025. arXiv:2502.07598.
8. Jeong J., Kim S. H., Yang H. J., Lee G., Kim S. GazeHand2: A gaze-driven virtual hand interface with improved gaze depth control for distant object interaction. *Electronics*. 2025. Vol. 14, № 13. P. 2530.
9. Mukherjee C., Mohamed R., Arunasalam A., Farrukh H., Celik Z. B. Shadowed realities: An investigation of UI attacks in WebXR. *USENIX Security Symposium*. 2025.
10. XR Access. Resources [Електронний ресурс]. URL: <https://xraccess.org/resources/>.

11. Web Content Accessibility Guidelines (WCAG) Overview [Электронный ресурс]. URL: <https://www.w3.org/WAI/standards-guidelines/wcag/>.
12. Shin S., Batch A., Butcher P. W. S., Ritsos P. D., Elmquist N. The reality of the situation: A survey of situated analytics. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*. 2023. Vol. 30, № 8. P. 5147–5164.
13. WebXR Performance Best Practices [Электронный ресурс]. URL: <https://developers.meta.com/horizon/documentation/web/webxr-perf-bp>.
14. Optimizing WebXR applications [Электронный ресурс]. URL: <https://developer.playcanvas.com/user-manual/xr/optimizing-webxr/>.
15. Why 3D on the Web [Электронный ресурс]. SwiftXR Docs. URL: <https://guide.swiftxr.io/3d-content-creation/why-3d-on-the-web>.
16. Render Gaussian Splatting Models with <model> Element [Электронный ресурс]. URL: <https://m-creativelab.github.io/jsar-runtime/blogs/render-3dgs-models-with-model-element.html>.
17. Achieve Better Rendering and Performance with WebXR Layers in Oculus Browser [Электронный ресурс]. URL: <https://developers.meta.com/horizon/blog/achieve-better-rendering-and-performance-with-webxr-layers-in-oculus-browser/>.
18. Design for XR | Android XR | Android Developers [Электронный ресурс]. URL: <https://developer.android.com/design/ui/xr/guides/get-started>.

REFERENCES

1. A Deeper Dive into WebXR Support in 3D Viewers. URL: <https://www.vntana.com/the-ultimate-guide-to-3d-viewers/the-ultimate-guide-to-3d-viewers-5/>.
2. Macario, G. (2024). WebXR, A-Frame and Networked-Aframe as a Basis for an Open Metaverse: A Conceptual Architecture. *arXiv preprint arXiv:2404.05317*.
3. WebGPU API – MDN Web Docs. URL: https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/API/WebGPU_API.
4. Chickerur, S., Balannavar, S., Hongekar, P., Prerna, A., & Jituri, S. (2024). WebGL vs. webgpu: A performance analysis for web 3.0. *Procedia Computer Science*, 233, 919-928.
5. Khomtchouk, B. B. (2021). WebAssembly enables low latency interoperable augmented and virtual reality software. *arXiv preprint arXiv:2110.07128*.
6. Butcher, P., Batch, A., Saffo, D., MackIntyre, B., Elmquist, N., & Ritsos, P. D. (2024). Is native naïve? Comparing native game engines and WebXR as immersive analytics development platforms. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 44 (3), 91-98.
7. Wang, Z., Rao, M., Ye, S., Song, W., & Lu, F. (2025). Towards spatial computing: recent advances in multimodal natural interaction for XR headsets. *arXiv preprint arXiv:2502.07598*.
8. Jeong, J., Kim, S. H., Yang, H. J., Lee, G., & Kim, S. (2025). GazeHand2: A Gaze-Driven Virtual Hand Interface with Improved Gaze Depth Control for Distant Object Interaction. *Electronics*, 14(13), 2530.
9. Mukherjee, C., Mohamed, R., Arunasalam, A., Farrukh, H., & Celik, Z. B. (2025). Shadowed Realities: An Investigation of UI Attacks in WebXR. In *USENIX Security Symposium*.
10. Resources. XR Access. URL: <https://xraccess.org/resources/>.

11. Web Content Accessibility Guidelines (WCAG) Overview. W3C Web Accessibility Initiative (WAI). URL: <https://www.w3.org/WAI/standards-guidelines/wcag/>.
12. Shin, S., Batch, A., Butcher, P. W. S., Ritsos, P. D., & Elmqvist, N. (2023). The reality of the situation: A survey of situated analytics. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 30(8), 5147-5164.
13. WebXR Performance Best Practices. URL: <https://developers.meta.com/horizon/documentation/web/webxr-perf-bp>.
14. Optimizing WebXR applications. URL: <https://developer.playcanvas.com/user-manual/xr/optimizing-webxr/>.
15. Why 3D on the Web. SwiftXR Docs. URL: <https://guide.swiftxr.io/3d-content-creation/why-3d-on-the-web>.
16. Render Gaussian Splatting Models with <model> Element. URL: <https://m-creativelab.github.io/jsar-runtime/blogs/render-3dgs-models-with-model-element.html>.
17. Achieve Better Rendering and Performance with WebXR Layers in Oculus Browser. URL: <https://developers.meta.com/horizon/blog/achieve-better-rendering-and-performance-with-webxr-layers-in-oculus-browser/>.
18. Design for XR. | Android XR | Android Developers. URL: <https://developer.android.com/design/ui/xr/guides/get-started>.

doi: 10.32403/1998-6912-2025-2-71-173-180

IMMERSIVE TECHNOLOGIES ON THE WEB: PERFORMANCE CHALLENGES AND INTERACTION PARADIGMS

O. V. Lytovchenko, B. I. Mozil, I. I. Dumanskyi

*Lviv Polytechnic National University,
Kniazia Romana St, 5, Lviv, 79005, Ukraine
oleh.v.lytovchenko@lpnu.ua*

This article provides a systematic analysis of recent advances in immersive web technologies (WebXR). It addresses a dual challenge for the field: achieving performance parity with native applications while developing intuitive, efficient, and inclusive interaction paradigms for immersive environments.

The first part examines key rendering bottlenecks that limit complex 3D scenes in web browsers, including fragment-bound issues from overdraw and complex physically based rendering (PBR) shaders, as well as CPU constraints caused by excessive draw calls. Modern optimization strategies are reviewed, focusing on the transition from WebGL to WebGPU, which introduces asynchronous execution and compute shaders for general-purpose GPU processing. The crucial role of WebAssembly (Wasm) is highlighted, as it enables near-native performance by offloading intensive tasks from the main JavaScript thread. Efficient asset management techniques, including Draco mesh and KTX 2.0 texture compression, are also discussed as essential for reducing memory use and load times.

The second part explores the evolution of user experience (UX) and interaction paradigms. It outlines the limitations of unimodal interaction – such as physical fatigue and high cognitive load – and emphasizes the growing shift toward multimodal systems that combine gaze, gestures, and voice for more natural and adaptive interaction. This approach enhances both usability and accessibility by offering alternative input pathways for users with diverse abilities.

The article concludes by identifying key research directions for WebXR, including the development of standardized WebGPU benchmarks, formalized XR Accessibility Guidelines (XAG), and studies on perceptual limits in immersive data visualization.

Keywords: *immersive technologies, web, performance, interaction paradigms, user experience, accessibility, AR, VR, WebXR, WebGPU, WebAssembly.*

Стаття надійшла до редакції 23.09.2025.

Received 23.09.2025.