

Scientific journal
PHYSICAL AND MATHEMATICAL EDUCATION
Has been issued since 2013.

ISSN 2413-158X (online)
ISSN 2413-1571 (print)

Науковий журнал
ФІЗИКО-МАТЕМАТИЧНА ОСВІТА
Видається з 2013.

<http://fmo-journal.fizmatsspu.sumy.ua/>



Ткачук В.В., Семеріков С.О., Єчкало Ю.В., Маркова О.М., Мінтій М.М. Засоби розробки доповненої реальності для Web: порівняльний аналіз. *Фізико-математична освіта*. 2020. Випуск 2(24). С. 159-167.

Tkachuk V., Semerikov S., Yechkalo Yu., Markova O., Mintii M. WebAR development tools: comparative analysis. *Physical and Mathematical Education*. 2020. Issue 2(24). P. 159-167.

DOI 10.31110/2413-1571-2020-024-2-021
УДК [004.946+004.358]::004.4'27::004.738.5

В.В. Ткачук

Криворізький національний університет, Україна
viktoriya.tkachuk@gmail.com
ORCID: 0000-0002-5879-5147

С.О. Семеріков

Криворізький державний педагогічний університет, Україна
semerikov@gmail.com
ORCID: 0000-0003-0789-0272

Ю.В. Єчкало

Криворізький національний університет, Україна
uliaechk@gmail.com
ORCID: 0000-0002-0164-8365

О.М. Маркова

Криворізький національний університет, Україна
kissa_oks@ukr.net
ORCID: 0000-0002-5236-6640

М.М. Мінтій

Криворізький державний педагогічний університет, Україна
mykhailo.mintii@gmail.com
ORCID: 0000-0002-0488-5569

ЗАСОБИ РОЗРОБКИ ДОПОВНЕНОЇ РЕАЛЬНОСТІ ДЛЯ WEB: ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ

АНОТАЦІЯ

Формулювання проблеми. Засоби розробки доповненої реальності для Web, призначені для підвищення рівня наочності навчання, самі є далекими від наочності та доступності, що породжує проблему добору та апробації засобів розробки програмного забезпечення із доповненою реальністю для Web для початківців, що володіють основами веб-розробки: учнів ліцеїв та студентів молодших курсів інформатичних спеціальностей. Мета дослідження: виконати порівняльний аналіз засобів розробки доповненої реальності для Web з метою добору засобів, доступних для початківців.

Матеріали і методи: аналіз джерел та програмного забезпечення з метою визначення стану розв'язання проблеми дослідження та добору засобів розробки доповненої реальності для Web.

Результати. Виконаний огляд засобів розробки програмного забезпечення із доповненою реальністю для Web надав можливість рекомендувати для опанування початківцями такі комбінації засобів візуалізації комп'ютерних моделей у Web та засобів відстеження реальних об'єктів: A-Frame та AR.js – API для швидкого прототипування, значна частина програм з використанням яких є HTML-подібним кодом; Three.js та JSARToolKit – для поглибленого рівня, що передбачає створення програм засобами JavaScript.

Висновки. Програмні засоби із доповненою реальністю, розроблені із використанням вказаних пар засобів, можуть бути розміщені в Інтернет на одному із хмарних сервісів. Виходячи з того, що бібліотека Three.js є основною A-Frame так само, як JSARToolKit є основою AR.js, необхідно є розробка інструктивних матеріалів насамперед із спільного використання A-Frame та AR.js. У майбутніх дослідженнях планується розробити окремі елементи методики навчання розробки програмного забезпечення із доповненою реальністю для Web, а також прототип програмного забезпечення, що надає можливість використання наочних (фотографічних та рисункових) маркерів для підготовки профорієнтаційних веб-квестів.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: доповнена реальність, програмне забезпечення, WebAR, A-Frame, AR.js, Three.js, JSARToolKit.

ВСТУП

Постановка проблеми. Доповнена реальність (augmented reality, також відома як mixed reality) є сьогодні досить популярною технологією, що поступово набуває поширення в системі освіти. Основним напрямом застосування доповненої реальності в освіті є забезпечення наочності навчання шляхом візуалізації комп'ютерних моделей об'єктів та систем за допомогою пристроїв загального (комп'ютер, обладнаний убудованою або зовнішньою веб-камерою), спеціального (окуляри доповненої реальності, шоломи віртуальної реальності) призначення та адаптованих пристроїв (мобільні телефони). Саме останній клас пристроїв є найбільш поширеним серед всіх учасників освітнього процесу. Станом на травень 2020 року в Україні нараховується 8,3 млн. користувачів мобільних ігор, 26,2 % яких – у віці 18-24 роки (www.statista.com/outlook/211/338/mobile-games/ukraine). За даними 2019 року, українські мобільні користувачі у віці 16-25 років найчастіше використовують соціальні мережі (92 %), засоби для обміну повідомленнями (66 %), відеозастосунки (64 %) та мобільні ігри (50 %) (www.statista.com/statistics/1023304/ukraine-popularity-app-categories/). Порівняння останніх двох джерел надає можливість зробити висновок про те, що в Україні від 16 до 16,6 млн. користувачів мобільних пристроїв, що є учнями старших класів, студентами всіх рівнів вищої освіти або особами юнацького віку. За даними Держстату України, на початок 2019/2020 року в коледжах, технікумах, училищах, університетах, академіях та інститутах навчалось 1,440 млн. студентів (www.ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2005/osv_rik/osv_u/vuz_u.html), при цьому у віці 16-25 років перебувало 4,163 млн. осіб (database.ukrcensus.gov.ua/PXWEB2007/ukr/publ_new1/2020/zb_chuselnist%202019.pdf).

Аналіз актуальних досліджень. Порівняння наведених статистичних даних вказує на те, що кожна особа юнацького віку має у середньому 2 мобільні номери (один мобільний пристрій із двома SIM-картами або два окремих мобільних телефони).

Станом на квітень 2020 року, на 82,1 % мобільних пристроїв в Україні встановлена операційна система Android (gs.statcounter.com/os-market-share/mobile/ukraine), а провідним веб-браузером є Chrome (використовується на 72,9 % пристроїв) (gs.statcounter.com/browser-market-share/mobile-tablet/ukraine/). Ураховуючи, що третій за популярністю веб-браузер – Opera – побудований на ядрі Chrome (dev.opera.com/tags/webkit/), частка Chrome досягає 80 %.

Незважаючи на наявність окремих клієнтів для соціальних мереж, обміну повідомленнями, перегляду відео та мобільних ігор, веб-браузер є універсальним засобом для виконання відповідних задач та швидкого створення нових програм для роботи у веб-середовищі. Головною перевагою веб-клієнтів є їх універсальність (версії Chrome існують для всіх мобільних платформ), а головним недоліком донедавна була низька швидкість виконання програм. Поява у березні 2017 року WebAssembly (webassembly.org/) надала можливість не лише суттєво прискорити виконання веб-програм, а й перенести у веб-середовище програмне забезпечення, створене для інших платформ.

Ключовим для створення програмного забезпечення із доповненою реальністю є доступ до якісних бібліотек машинного зору, розпізнавання та відслідковування об'єктів, таких як ARToolKit та її веб-версії JSARToolKit5 (github.com/artoolkitx/jsartoolkit5), застосування якої надає можливість розробки програмного забезпечення із доповненою реальністю для Web. Водночас досвід спільного застосування JSARToolKit5 та WebGL виявив, що:

- маркери, що використовує JSARToolKit5, є двовимірним різновидом штрих-коду, що має низький рівень наочності;

- візуалізація об'єктів за допомогою WebGL потребує глибокого розуміння принципів роботи 3D-графіки та значних обсягів програмного коду.

Таким чином, дані засоби розробки доповненої реальності для Web, призначені для підвищення рівня наочності навчання, самі є далекими від наочності та доступності, що породжує проблему дослідження – добір та апробація засобів розробки програмного забезпечення із доповненою реальністю для Web для початківців, що володіють основами веб-розробки: учнів ліцеїв та студентів молодших курсів інформатичних спеціальностей.

Мета статті: виконати порівняльний аналіз засобів розробки доповненої реальності для Web з метою добору засобів, доступних для початківців.

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Програмувати доповнену реальність (AR – augmented reality) – інноваційно (модно, цікаво, корисно та ін.) останні 60 років (Syrovatskyi, Semerikov, Modlo, Yechkalo & Zelinska, 2018), а її використання у веб-середовищі зумовлено виключно поточним станом розвитку технологій. Для початку роботи з нею необхідно мати лише AR-сумісний браузер, такий як Firefox або Chrome, та текстовий редактор (типу mcedit або Sublime). Базові знання основ веб-розробки (HTML, CSS та JavaScript) є необхідними для початківця, а досвід роботи з веб-API та GitHub стануть у пригоді.

Надалі під AR будемо розуміти здатність пристрою, зокрема мобільного пристрою або веб-браузера, відстежувати зображення або відображати 3D-об'єкт поверх цього зображення (Модло, Єчкало, Семеріков & Ткачук, 2017). Головна ідея AR полягає в тому, щоб відобразити комп'ютерну модель у реальному часі та реальному просторі з метою взаємодії між користувачем у реальному просторі та 3D-моделі у віртуальному (Tkachuk, Yechkalo & Markova, 2017; Yechkalo, Tkachuk, Hrunтова, Brovko & Tron, 2019) (рис. 1).

AR може бути як маркерним, так й безмаркерним. У маркерній AR пристрій відстежує 2D-маркер: коли він знаходиться, на ньому фактично відображається 3D-об'єкт (рис. 2). У безмаркерному варіанті пристрій буде шукати плоску поверхню (стіл, підлогу тощо), і розташовуватимемо 3D-об'єкт на ній.

Використовуючи камеру пристрою, AR надає можливості відображення комп'ютерно згенерованих об'єктів в ігрових, маркетингових та інших програмах – наприклад, для розстановки меблів у вітальні або примірки одягу перед їх покупкою. Це дійсно велика можливість для бізнесу – показати, як виглядає продукція, перш ніж будь-який споживач дійсно її купує (Mintii & Soloviev, 2018).

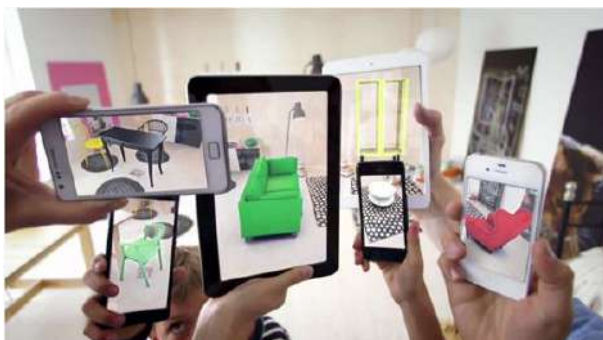


Рис. 1. Приклад роботи засобів AR на різних типах мобільних пристроїв
(www.cleveroad.com/blog/augmented-reality-as-a-powerful-tool-to-boost-your-business)



Рис. 2. Приклад роботи маркерної AR
(vimeo.com/92520735)

Для AR розробляються спеціальні пристрої, як правило, у вигляді шоломів та гарнітур, що надають можливість занурення користувача у модельне середовище.

AR доповнює реальний світ 3D-моделями, якими можна керувати за допомогою мобільного пристрою в будь-якому місці. Віртуальна реальність (Virtual Reality – VR) занурює користувача у модельний світ, для чого, як правило, необхідні наголовні дисплеї (Head Mounted Devices – HMD) (рис. 3).



а (<https://www.iconcolleges.com/2017/06/10/how-education-will-change-in-the-future/>)



б (otssolutions.com/blog/how-to-use-ar-and-vr-in-education-industry/)

Рис. 3. Використання шоломів віртуальної реальності для самостійної (а) та спільної (б) роботи

Інтерактивність у програмах для AR і VR забезпечується дуже схоже. Так, наприклад, VR фактично використовує контролери, а у деяких випадках й відстеження рук, що надає змогу користувачеві взаємодіяти з 3D-об'єктами всередині сцени, у якій вони знаходяться.

До головних небезпек використання HMD для роботи у VR відносяться:

- напруження очей;
- запаморочення і головні болі після використання HMD.

На відміну від VR, AR не має таких значних ризиків для здоров'я. Тим не менш, викликає занепокоєння можливість користувачів залишатися зосередженими на тому, що вони роблять, під час використання AR – зокрема, з причин безпеки.

Найбільш поширений тип пристосованих пристроїв, готових для AR – смартфони та планшети (рис. 4) з операційними системами iOS (версія 11 та вище під управлінням iPhone та iPad) та Android (версія 7 та вище).

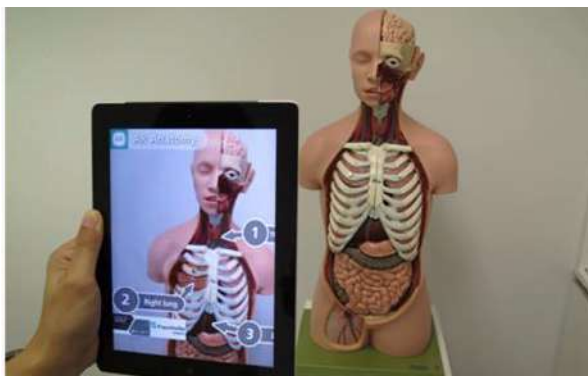


Рис. 4. AR Anatomy на планшеті (geekswipe.net/research/engineering/augmented-reality-in-engineering-and-education/)

Для веб-браузерів AR доступна, якщо у них реалізована підтримка WebRTC (developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/API/WebRTC_API) та WebGL (developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/API/WebGL_API) – насамперед Google Chrome та Mozilla Firefox.

Microsoft HoloLens є HMD-подібною гарнітурою для AR, що знаходиться у активній розробці (www.microsoft.com/en-us/hololens). Так само, як і Google Glass (www.google.com/glass/start/), вона розрахована на корпоративне використання, але, на відміну від Glass, спільно не з Android, а з Windows 10.

МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Аналіз джерел та програмного забезпечення з метою визначення стану розв'язання проблеми дослідження та добору засобів розробки доповненої реальності для Web.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

WebGL (OpenGL ES for the Web) є API для 3D-графіки у веб-браузері, що розробляється The Khronos Group Inc (www.khronos.org/webgl/). WebGL використовує мову програмування шейдерів GLSL (OpenGL Shader Language) та є частиною об'єктної моделі документа (DOM API) браузера. Всі провідні розробники браузерів Apple (Safari), Google (Chrome), Microsoft (Edge), та Mozilla (Firefox) є членами WebGL Working Group. Поточна версія WebGL – 2.0 відповідає стандарту OpenGL ES 3.0 API.

Програма, описана за допомогою WebGL, містить як код на JavaScript, та й C-подібний код GLSL. Приклад простої програми для побудови трикутника (рис. 5) з (www.tutorialspoint.com/webgl/webgl_sample_application.htm) містить 105 рядків коду, що утворюють 5 блоків:

1. Підготовка полотна (HTML-об'єкт canvas) та отримання контексту рендерингу WebGL.
2. Визначення атрибутів геометрії, таких як вершини, індекси та ін., і збереження їх у буферних об'єктах.
3. Створення та компіляція програм для вершинних і фрагментних шейдерів.
4. Зв'язування шейдерних програм з буферними об'єктами.
5. Відображення потрібного об'єкту.

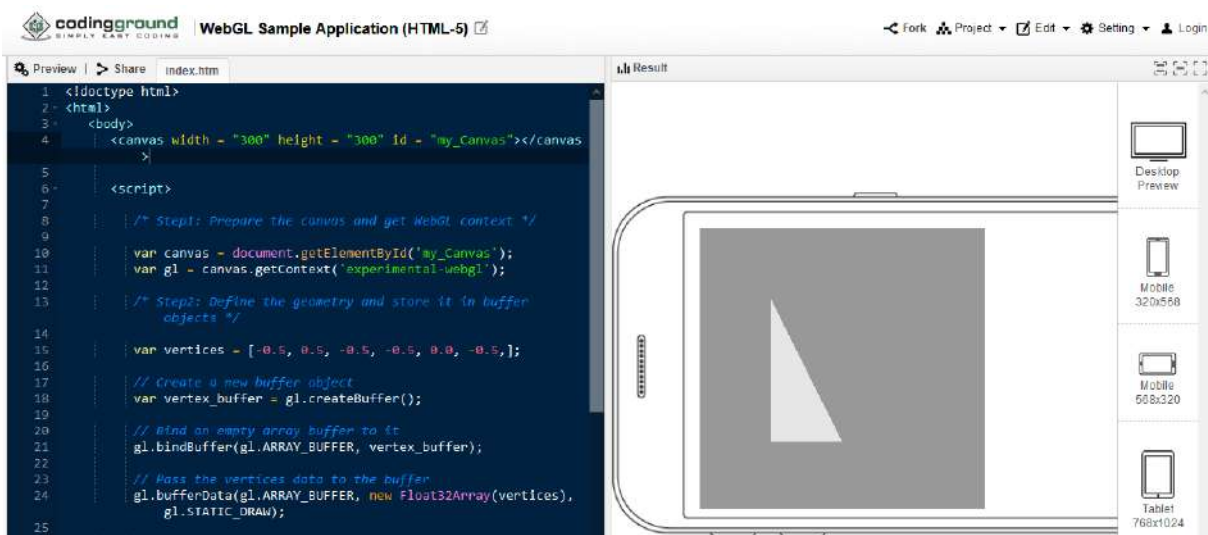


Рис. 5. Вихідний код та результат роботи простої програми на WebGL

Використання WebGL для візуалізації комп'ютерних моделей у Web – не найлегших шлях: обсяг необхідного коду буде вимірюватись тисячами рядків та потребуватиме високого рівня підготовки з програмування 3D-графіки за допомогою OpenGL. Ураховуючи, що першим завданням дослідження є добір засобів, доступних для початківців, доцільним є застосування бібліотек, що спрощують використання WebGL.

У таблиці 1 подано результати оцінювання доцільності використання бібліотек мовою JavaScript для роботи з об'єктами WebGL.

Ураховуючи спрямованість результатів проведеного аналізу на навчання початківців, були визначені кращі за рейтингом некомерційні бібліотеки для роботи з WebGL: 1 місце – Babylon.js, 2 місце – Three.js та 3 місце – A-Frame.

Babylon.js (www.babylonjs.com/) надає можливість створювати складні 2D-об'єкти з використанням суттєво меншого обсягу коду, ніж при застосуванні WebGL: так, обсяг коду, необхідний для створення об'єкту, поданого на рис. 6, у 5 разів менше, ніж WebGL-коду для суттєво простішої сцени на рис. 5.

Створена сцена є керованою за допомогою стандартних елементів управління. На відміну від інших учасників рейтингу, Babylon.js є «фізичним» рушієм, що широко застосовується при створенні комп'ютерних ігор для Web.

Three.js – це відкрита 3D-графічна бібліотека загального призначення, написана на JavaScript. На сайті <https://threejs.org/> можна знайти велику кількість якісних демонстрацій, створених із її використанням. Її автор Рікардо Мігель Кабелло, також відомий як mrdoob, є одним із піонерів використання WebGL, тому ця бібліотека часто використовується при побудові інших бібліотек.

Таблиця 1

Оцінка доцільності використання бібліотек для роботи з WebGL

Назва	Анімація	Убудоване аудіо	Доступ до мережі	Урахування законів фізики	Версія WebGL	WebVR	Імпорт	Експорт	Ліцензія	Загальна оцінка
A-Frame	+	+	-	-	1.0	+	Багато форматів (3)	HTML, three.js (2)	Вільна	10
CopperLicht	+	+	-	+	1.0	-	-	-	Вільна	5
OSG.JS	+	+	-	-	1.0	+	-	-	Вільна	5
Three.js	+	+	-	-	2.0	+	Багато форматів (9)	Багато форматів (4)	Вільна	19
Verge3D	+	+	-	+	1.0	+	Багато форматів(3)	gTTF (1)	Комерційна	9
Clara.io	+	-	-	+	1.0	+	Багато форматів (5)	Багато форматів (6)	Комерційна	15
Babylon.js	+	+	-	+	2.0	+	Багато форматів (5)	Багато форматів (9)	Вільна	21

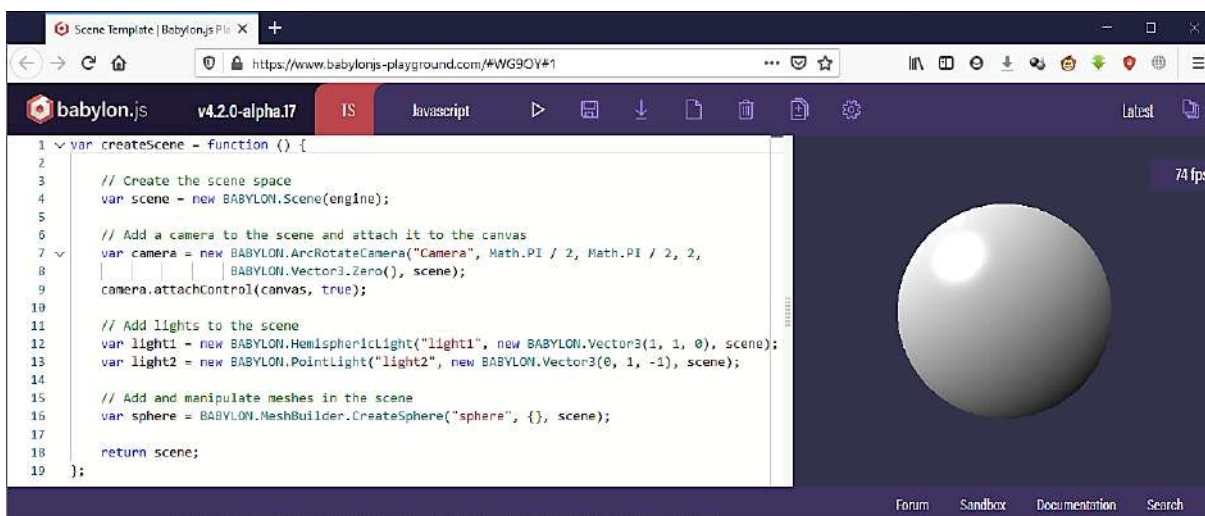


Рис. 6. Вихідний код та результат роботи простої програми на Babylon.js

Створення об'єктів у Three.js відбувається у три кроки:

- 1) визначення геометрії об'єкту – векторів позиції, кольорів та ін.;
- 2) визначення матеріалу – способу рендерингу об'єкту;
- 3) композиція геометрії та матеріалу.

Обсяг коду, необхідний для створення 3D-сцени за допомогою Three.js, є дещо більшим, ніж коду Babylon.js – це пов'язано із об'єднанням у Babylon.js операцій створення об'єкту та додавання об'єкту до сцени в один виклик конструктора відповідного класу (рис. 7).



Рис. 7. Вихідний код та результат роботи простої програми на Three.js

A-Frame фактично, є засобом швидкого прототипування, і значна частина програми з його використанням – це HTML-подібний код. Команди A Frame описуються тегами, які подібні до тегів HTML, але, на відміну від останніх, інтерпретуються не у веб-браузері на боці клієнта, а є способом доступу до JavaScript, що виконується на боці сервера (aframe.io).

Рис. 8 є дуже показовим – обсяг коду A Frame, необхідний для створення все тієї ж сфери, утричі менше, ніж коду з використанням Babylon.js/Three.js:

Таким чином, незважаючи на третє місце в рейтингу функціональних можливостей, A-Frame є лідером за наочністю та доступністю серед розглянутих бібліотек для роботи з 3D-графікою у Web. Ураховуючи, що A Frame є надбудовою над Three.js, доцільним є їх циклічне опанування, розпочинаючи із A-Frame.

ОБГОВОРЕННЯ

У (Syrovatskiy, Semerikov, Modlo, Yechkalo & Zelinska, 2018) було виконано порівняльний аналіз найбільш поширених AR SDK, тому зосередимось лише на тих із них, які придатні для розробки у Web – WebAR SDK. На жаль, серед вільних засобів таких станом на травень 2020 року лише три, і кожен з них тісно пов'язаний із розглянутими засобами побудови комп'ютерних моделей.



Рис. 8. Вихідний код та результат роботи простої програми на A-Frame

Babylon.js у серпні 2019 року анонсував Babylon AR (Murray, 2019; ar.babylonjs.com) – проект з інтеграції Babylon.js та бібліотеки комп'ютерного зору OpenCV. На поточний момент у рамках проекту реалізовано відслідковування стандартних маркерів, подібних до QR-кодів. Не зважаючи на те, що самі розробники Babylon.js визначають Babylon AR як проект на дуже ранній стадії, створені за його допомогою веб-програми працездатні лише на мобільних пристроях, які підтримують WebXR (developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/API/WebXR_Device_API). Це звужує сферу використання Babylon AR до пристроїв з Android версії 8.1 та вище. Станом на квітень 2020 року, в Україні таких пристроїв біля 65 % від загальної кількості усіх Android-пристроїв (gs.statcounter.com/android-version-market-share/mobile/ukraine). Ураховуючи тенденцію до зростання цієї частки, Babylon AR можна розглядати як перспективний проект із розробки програмного забезпечення із доповненою реальністю для Web (починаючи з 2021-2022 рр.).

ARToolKit, на 20 років старший за Babylon AR, є однією з найбільш широко використовуваних бібліотек для AR. JSARToolKit (ARToolKit.js) на поточний момент підтримує такі 3 типи квадратних маркерів (з довільним рисунком, двовимірним кодом та набори маркерів) й NFT-маркери (natural feature tracking – відслідковування довільних зображень) (github.com/artoolkitx/jsartoolkit5). JSARToolKit не є специфічною для певної бібліотеки WebGL, проте найчастіше застосовується разом із Three.js: приклад (Stemkoski, 2018) їх спільної роботи, розроблений Л. Стемкоскі (Lee Stemkoski), подано на рис. 9.



Рис. 9. Куб на маркері Hiro (спільне використання Three.js та JSARToolKit)

Обсяг коду, необхідний для реалізації функціональності прикладу – біля 100 рядків – є суттєво меншим, ніж за автономного застосування JSARToolKit. Це досягається застосування бібліотеки THREEx – розширення Three.js для розробки комп'ютерних ігор, що наближує її функціональність до Babylon.js (www.threejsgames.com/extensions/).

Її автором є Жером Етьєнн (Jerome Etienne) (github.com/jeromeetienne/threex) – основний розробник першої та другої версії бібліотеки AR.js, яка на травень 2020 року має версії, адаптовані для роботи як з A-Frame, так й з Three.js. Так само, як A-Frame є надбудовою над Three.js, в основу AR.js була покладена JSARToolKit, тому дана бібліотека підтримує всі

типи квадратних (Marker tracking) та NFT-маркерів (Image Tracking), що й JSARToolKit, а також надає можливість розміщення комп'ютерних моделей за їх географічними координатами (Location based AR) (github.com/AR-js-org/AR.js).

При застосуванні спільно із A-Frame код, необхідний для реалізації прикладу, подібного до поданого на рис. 1.9, займає кілька рядків:

```
<a-scene embedded arjs>
<a-marker preset="hiro">
<a-box></a-box>
</a-marker>
<a-entity camera></a-entity>
</a-scene>
```

ВИСНОВКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

1. Доповнена реальність – це штучне (синтетичне) середовище, створене шляхом об'єднання об'єктів реального світу та даних, згенерованих комп'ютером (комп'ютерних моделей).

2. Огляд засобів розробки програмного забезпечення із доповненою реальністю для Web надав можливість рекомендувати для опанування початківцями такі комбінації засобів візуалізації комп'ютерних моделей у Web та засобів відстеження реальних об'єктів:

а) A-Frame та AR.js – API для швидкого прототипування, значна частина програм з використанням яких є HTML-подібний код. A-Frame використовується для створення сцен, об'єктів, анімації та інших 3D-елементів у веб-браузері. AR.js використовується для відслідковування маркерів і надає можливість сцені, сконструйованій за допомогою A-Frame, відобразитися прямо на маркері;

б) Three.js та ARToolKit.js – для поглибленого рівня, що передбачає створення програм засобами JavaScript. Three.js використовує WebGL, що надає можливість створення якісних 3D-сцени безпосередньо у веб-браузері. JSARToolKit використовується для відслідковування маркерів та низькорівневого доступу до даних із камери пристрою.

3. Програмні засоби із доповненою реальністю, розроблені із використанням вказаних пар засобів, можуть бути розміщені в Інтернет на одному із хмарних сервісів. Виходячи з того, що бібліотека Three.js є основною A-Frame так само, як JSARToolKit є основою AR.js, для досягнення мети дослідження необхідною є розробка інструктивних матеріалів насамперед із спільного використання A-Frame та AR.js.

Список використаних джерел

1. A-Frame – Make WebVR. URL: <https://aframe.io/>. (дата звернення: 15.05.2020).
2. OSF HealthCareю Applications | Jump Simulation. URL: http://web.archive.org/web/20191130085337mp_/https://jumpsimulation.org/education/applications. (дата звернення: 15.05.2020).
3. AR-js-org/AR.js: Image tracking, Location Based AR, Marker tracking. All on the Web. URL: <https://github.com/AR-js-org/AR.js>. (дата звернення: 15.05.2020).
4. artoolkitx/jsartoolkit5: Javascript ARToolKit v5.x. URL: <https://github.com/artoolkitx/jsartoolkit5>. (дата звернення: 15.05.2020).
5. Babylon AR Preview CDN. URL: <https://ar.babylonjs.com/>. (дата звернення: 15.05.2020).
6. Babylon.js: Powerful, Beautiful, Simple, Open - Web-Based 3D At Its Best. URL: <https://www.babylonjs.com/>. (дата звернення: 15.05.2020).
7. Opera Software AS. Dev.Opera – webkit. URL: <https://dev.opera.com/tags/webkit/>. (дата звернення: 15.05.2020).
8. Google. Glass – Glass. URL: <https://www.google.com/glass/start/>. (дата звернення: 15.05.2020).
9. Etienne J. jeromeetienne/threex: Game Extensions for three.js. URL: <https://github.com/jeromeetienne/threex>. (дата звернення: 15.05.2020).
10. Microsoft. Microsoft HoloLens | Mixed Reality Technology for Business. URL: <https://www.microsoft.com/en-us/hololens>. (дата звернення: 15.05.2020).
11. Mintii I. S., Soloviev V. N. Augmented Reality: Ukrainian Present Business and Future Education. *Augmented Reality in Education* : Proceedings of the 1st International Workshop (AREdu 2018). (Kryvyi Rih, Ukraine, October 2, 2018). (CEUR Workshop Proceedings, Vol. 2257). Kryvyi Rih. 2018. P. 227-231. URL: <http://ceur-ws.org/Vol-2257/paper22.pdf>. (дата звернення: 15.05.2020).
12. StatCounter. Mobile & Tablet Browser Market Share Ukraine | StatCounter Global Stats. URL: <https://gs.statcounter.com/browser-market-share/mobile-tablet/ukraine/>. (дата звернення: 15.05.2020).
13. StatCounter. Mobile Android Version Market Share Ukraine | StatCounter Global Stats. URL: <https://gs.statcounter.com/android-version-market-share/mobile/ukraine>. (дата звернення: 15.05.2020).
14. Statista. Mobile Games - Ukraine | Statista Market Forecast. URL: <https://www.statista.com/outlook/211/338/mobile-games/ukraine>. (дата звернення: 15.05.2020).
15. StatCounter. Mobile Operating System Market Share Ukraine | StatCounter Global Stats. URL: <https://gs.statcounter.com/os-market-share/mobile/ukraine>. (дата звернення: 15.05.2020).
16. Murray J. Babylon AR. URL: <https://medium.com/@babylonjs/babylon-ar-7823ab4a80c1>. (дата звернення: 15.05.2020).
17. Stemkoski L. Basic Cube. URL: <https://stemkoski.github.io/AR-Examples/hello-cube.html>. (дата звернення: 15.05.2020).
18. Syrovatskyi O. V., Semerikov S. O., Modlo Y. O., Yechkalo Yu. V., Zelińska S. O. Augmented reality software design for educational purposes. *Computer Science & Software Engineering* : Proceedings of the 1st Student Workshop (CS&SE@SW 2018). (Kryvyi Rih, Ukraine, November 30, 2018). (CEUR Workshop Proceedings, Vol. 2292). Kryvyi Rih. 2018. P. 193-225. URL: <http://ceur-ws.org/Vol-2292/paper20.pdf>. (дата звернення: 15.05.2020).

19. three.js – JavaScript 3D library. URL: <https://threejs.org/>. (дата звернення: 15.05.2020).
20. THREE.js Game Extensions for Three.js. URL: <https://www.threejs.com/extensions/>. (дата звернення: 15.05.2020).
21. Tkachuk V. V., Yechkalo Yu. V., Markova O. M. Augmented reality in education of students with special educational needs. *Cloud Technologies in Education* : Proceedings of the 5th Workshop on Cloud Technologies in Education (CTE 2017). (Kryvyi Rih, Ukraine, April 28, 2017). (CEUR Workshop Proceedings, Vol. 2168). Kryvyi Rih. 2017. P. 66-71. URL: <http://ceur-ws.org/Vol-2168/paper9.pdf>. (дата звернення: 15.05.2020).
22. Yechkalo Yu., Tkachuk V., Hrunтова Т., Brovko D., Tron V. Augmented Reality in Training Engineering Students: Teaching Methods. *ICT in Education, Research and Industrial Applications. Integration, Harmonization and Knowledge Transfer* : Proceedings of the 15th International Conference on ICT in Education, Research and Industrial Applications. Integration, Harmonization and Knowledge Transfer (ICTERI 2019). Volume II: Workshops. (Kherson, Ukraine, June 12–15, 2019). Kherson. 2019. P. 952–959. URL: http://ceur-ws.org/Vol-2393/paper_337.pdf. (дата звернення: 15.05.2020).
23. Statista. Ukraine: popularity of app categories by age 2018 | Statista. URL: <https://www.statista.com/statistics/1023304/ukraine-popularity-app-categories/>. (дата звернення: 15.05.2020).
24. WebAssembly. URL: <https://webassembly.org/>. (дата звернення: 15.05.2020).
25. WebGL - Sample Application - Tutorialspoint / Tutorialspoint. URL: https://www.tutorialspoint.com/webgl/webgl_sample_application.htm. (дата звернення: 15.05.2020).
26. The Khronos Group Inc. WebGL Overview - The Khronos Group Inc. URL: <https://www.khronos.org/webgl/>. (дата звернення: 15.05.2020).
27. Mozilla and MDN contributors. WebGL: 2D and 3D graphics for the web – Web APIs | MDN. URL: https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/API/WebGL_API. (дата звернення: 15.05.2020).
28. Mozilla and MDN contributors. WebRTC API – Web APIs | MDN. URL: https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/API/WebRTC_API. (дата звернення: 15.05.2020).
29. Mozilla and MDN contributors. WebXR Device API – Web APIs | MDN. URL: https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/API/WebXR_Device_API. (дата звернення: 15.05.2020).
30. Держстат України. Заклади вищої освіти. URL: http://www.ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2005/osv_rik/osv_u/vuz_u.html. (дата звернення: 15.05.2020).
31. Модло Є. О., Єчкало Ю. В., Семеріков С. О., Ткачук В. В. Використання технології доповненої реальності у мобільно орієнтованому середовищі навчання ВНЗ. *Наукові записки*. Випуск 11. Серія : Проблеми методики фізико-математичної і технологічної освіти. Частина 1. Кропивницький : ПБВ КДПУ ім. В. Винниченка, 2017. С. 93-100. (дата звернення: 15.05.2020).
32. Державна служба статистики України. Розподіл постійного населення України за статтю та віком на 1 січня 2019 року : статистичний збірник. Київ, 2019. 345 с. URL: http://database.ukrcensus.gov.ua/PXWEB2007/ukr/publ_new1/2020/zb_chuselnist%202019.pdf. (дата звернення: 15.05.2020).

References

1. A-Frame – Make WebVR. Retrieved 15 May 2020, from <https://aframe.io/>
2. OSF HealthCare. Applications | Jump Simulation. Retrieved 15 May 2020, From http://web.archive.org/web/20191130085337mp_/https://jumpsimulation.org/education/applications
3. AR-js-org/AR.js: Image tracking, Location Based AR, Marker tracking. All on the Web. Retrieved 15 May 2020, from <https://github.com/AR-js-org/AR.js>
4. artoolkitx/jsartoolkit5: Javascript ARToolKit v5.x. Retrieved 15 May 2020, from <https://github.com/artoolkitx/jsartoolkit5>
5. Babylon AR Preview CDN. Retrieved 15 May 2020, from <https://ar.babylonjs.com/>
6. Babylon.js: Powerful, Beautiful, Simple, Open - Web-Based 3D At Its Best. Retrieved 15 May 2020, from <https://www.babylonjs.com/>
7. Opera Software AS. Dev.Opera – webkit. Retrieved 15 May 2020, from <https://dev.opera.com/tags/webkit/>
8. Google. Glass – Glass. Retrieved 15 May 2020, from <https://www.google.com/glass/start/>
9. Etienne J. jeromeetienne/threex: Game Extensions for three.js. Retrieved 15 May 2020, from <https://github.com/jeromeetienne/threex>
10. Microsoft. Microsoft HoloLens | Mixed Reality Technology for Business. Retrieved 15 May 2020, from <https://www.microsoft.com/en-us/hololens>
11. Mintii I. S., Soloviev V. N. Augmented Reality: Ukrainian Present Business and Future Education. *Augmented Reality in Education* : Proceedings of the 1st International Workshop (AREdu 2018). (Kryvyi Rih, Ukraine, October 2, 2018). (CEUR Workshop Proceedings, Vol. 2257). Kryvyi Rih. 2018. P. 227-231. Retrieved 15 May 2020, from <http://ceur-ws.org/Vol-2257/paper22.pdf>
12. StatCounter. Mobile & Tablet Browser Market Share Ukraine | StatCounter Global Stats. Retrieved 15 May 2020, from <https://gs.statcounter.com/browser-market-share/mobile-tablet/ukraine/>
13. StatCounter. Mobile Android Version Market Share Ukraine | StatCounter Global Stats. Retrieved 15 May 2020, from <https://gs.statcounter.com/android-version-market-share/mobile/ukraine>
14. Statista. Mobile Games - Ukraine | Statista Market Forecast. Retrieved 15 May 2020, from <https://www.statista.com/outlook/211/338/mobile-games/ukraine>
15. StatCounter. Mobile Operating System Market Share Ukraine | StatCounter Global Stats. Retrieved 15 May 2020, from <https://gs.statcounter.com/os-market-share/mobile/ukraine>
16. Murray J. Babylon AR. Retrieved 15 May 2020, from <https://medium.com/@babylonjs/babylon-ar-7823ab4a80c1>
17. Stemkoski L. Basic Cube. Retrieved 15 May 2020, from <https://stemkoski.github.io/AR-Examples/hello-cube.html>

18. Syrovatskyi O. V., Semerikov S. O., Modlo Y. O., Yechkalo Yu. V., Zelinska S. O. Augmented reality software design for educational purposes. *Computer Science & Software Engineering* : Proceedings of the 1st Student Workshop (CS&SE@SW 2018). (Kryvyi Rih, Ukraine, November 30, 2018). (CEUR Workshop Proceedings, Vol. 2292). Kryvyi Rih. 2018. P. 193-225. Retrieved 15 May 2020, from <http://ceur-ws.org/Vol-2292/paper20.pdf>
19. three.js – JavaScript 3D library. Retrieved 15 May 2020, from <https://threejs.org/>
20. THREE.js Game Extensions for Three.js. Retrieved 15 May 2020, from <https://www.threejs.com/extensions/>
21. Tkachuk V. V., Yechkalo Yu. V., Markova O. M. Augmented reality in education of students with special educational needs. *Cloud Technologies in Education* : Proceedings of the 5th Workshop on Cloud Technologies in Education (CTE 2017). (Kryvyi Rih, Ukraine, April 28, 2017). (CEUR Workshop Proceedings, Vol. 2168). Kryvyi Rih. 2017. P. 66-71. Retrieved 15 May 2020, from <http://ceur-ws.org/Vol-2168/paper9.pdf>
22. Yechkalo Yu., Tkachuk V., Hrunтова T., Brovko D., Tron V. Augmented Reality in Training Engineering Students: Teaching Methods. *ICT in Education, Research and Industrial Applications. Integration, Harmonization and Knowledge Transfer* : Proceedings of the 15th International Conference on ICT in Education, Research and Industrial Applications. Integration, Harmonization and Knowledge Transfer (ICTERI 2019). Volume II: Workshops. (Kherson, Ukraine, June 12–15, 2019). Kherson. 2019. P. 952–959. Retrieved 15 May 2020, from http://ceur-ws.org/Vol-2393/paper_337.pdf
23. Statista. Ukraine: popularity of app categories by age 2018 | Statista. Retrieved 15 May 2020, from <https://www.statista.com/statistics/1023304/ukraine-popularity-app-categories/>
24. WebAssembly. Retrieved 15 May 2020, from <https://webassembly.org/>
25. Tutorialspoint. WebGL – Sample Application – Tutorialspoint. Retrieved 15 May 2020, from https://www.tutorialspoint.com/webgl/webgl_sample_application.htm
26. The Khronos Group Inc. WebGL Overview - The Khronos Group Inc. Retrieved 15 May 2020, from <https://www.khronos.org/webgl/>
27. Mozilla and MDN contributors. WebGL: 2D and 3D graphics for the web – Web APIs | MDN / Retrieved 15 May 2020, from https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/API/WebGL_API
28. Mozilla and MDN contributors. WebRTC API – Web APIs | MDN. Retrieved 15 May 2020, from https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/API/WebRTC_API
29. Mozilla and MDN contributors. WebXR Device API – Web APIs | MDN. Retrieved 15 May 2020, from https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/API/WebXR_Device_API
30. Derzhstat Ukrainy. Zaklady vyshchoi osvity [Institutions of higher education]. Retrieved 15 May 2020, from http://www.ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2005/osv_rik/osv_u/vuz_u.html [in Ukrainian].
31. Modlo Ye., Yechkalo Yu., Semerikov S., Tkachuk V. Vykorystannia tekhnolohii dopovnenoi realnosti u mobilno oriientovanomu seredovyschi navchannia VNZ [Using technology of augmented reality in a mobile-based learning environment of the higher educational institution]. *Naukovi zapysky*. Vypusk 11. Serii : Problemy metodyky fizyko-matematychnoi i tekhnolohichnoi osvity. Chastyna 1. Kropyvnytskyi : RVV KDPU im. V. Vynnychenka, 2017. P. 93-100 [in Ukrainian].
32. Derzhavna sluzhba statystyky Ukrainy. Rozpodil postiinoho naseleennia Ukrainy za statti ta vikom na 1 sichnia 2019 roku : statystychnyi zbirnyk [Distribution of the permanent population of Ukraine by sex and age as of January 1, 2019: statistical collection]. Kyiv. 2019. 345 p. Retrieved 15 May 2020, from http://database.ukrcensus.gov.ua/PXWEB2007/ukr/publ_new1/2020/zb_chuselnist%202019.pdf [in Ukrainian].

WEBAR DEVELOPMENT TOOLS: COMPARATIVE ANALYSIS

V. V. Tkachuk

Kryvyi Rih National University, Ukraine

S. O. Semerikov

Kryvyi Rih State Pedagogical University, Ukraine

Yu. V. Yechkalo

Kryvyi Rih National University, Ukraine

O. M. Markova

Kryvyi Rih National University, Ukraine

M. M. Mintii

Kryvyi Rih State Pedagogical University, Ukraine

Abstract.

Formulation of the problem. *Web augmented reality (WebAR) development tools aimed at improving the visual aspects of learning are far from being visual and available themselves. These causing problems of selecting and testing WebAR development tools for beginners mastering web-design basics – students from lyceums and CS undergraduates. The research is aimed at conducting a comparative analysis of augmented reality tools for the Web to select those appropriate for beginners.*

Materials and methods. *Analysis of sources and software to determine the state of the research problem solution and select WebAR development tools.*

Results. *The conducted review of WebAR development tools enables recommending the following combinations of visualization tools of computer models in Web and tracking tools for real objects to beginners: A-Frame and AR.js are API to rapid prototyping of program which HTML-like code; Three.js and JSARToolKit are aimed at the advanced level providing for developing software using JavaScript.*

Conclusions. *Software tools with augmented reality developed with mentioned pair of tools can be placed on the Internet at one of the cloud services. Because the Three.js library is the basis for A-Frame in the same way as JSARToolKit is the basis for AR.js, it is reasonable to design instructive materials for the joint application of A-Frame and AR.js. Further research is aimed at developing certain elements of teaching methods for software design with WebAR as well as the software prototype enabling using visual (photos and figures) markers to prepare vocation-oriented web-quests.*

Keywords: *augmented reality, software, WebAR, A-Frame, AR.js, Three.js, JSARToolKit.*