

# Teaching WebAR development with integrated machine learning: a methodology for immersive and intelligent educational experiences

Serhiy O. Semerikov<sup>1,2,3,4,5</sup>[0000-0003-0789-0272], Mykhailo V. Foki<sup>1</sup>,  
Dmytro S. Shepiliev<sup>1</sup>[0000-0001-6913-8073],  
Mykhailo M. Mintii<sup>1</sup>[0000-0002-0488-5569],  
Iryna S. Mintii<sup>2,1,6,3,5</sup>[0000-0003-3586-4311], and  
Olena H. Kuzminska<sup>7,1</sup>[0000-0002-8849-9648]

<sup>1</sup> Kryvyi Rih State Pedagogical University,  
54 Universytetskyi Ave., Kryvyi Rih, 50086, Ukraine

<sup>2</sup> Institute for Digitalisation of Education of the NAES of Ukraine,  
9 M. Berlynskoho Str., Kyiv, 04060, Ukraine

<sup>3</sup> Zhytomyr Polytechnic State University,  
103 Chudnivska Str., Zhytomyr, 10005, Ukraine

<sup>4</sup> Kryvyi Rih National University,  
11 Vitalii Matusevych Str., Kryvyi Rih, 50027, Ukraine

<sup>5</sup> Academy of Cognitive and Natural Sciences,  
54 Universytetskyi Ave., Kryvyi Rih, 50086, Ukraine

<sup>6</sup> Lviv Polytechnic National University,  
12 Stepana Bandery Str., Lviv, 79000, Ukraine

<sup>7</sup> National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine,  
15 Heroiv Oborony Str., Kyiv, 03041, Ukraine

semerikov@gmail.com, ierehon575@gmail.com, sepilevdmirij@gmail.com,  
mykhailo.mintii@gmail.com, irina.mintiy@kdpu.edu.ua,  
o.kuzminska@nubip.edu.ua

<https://kdpu.edu.ua/semerikov>, <https://acnsi.org/mintii/>

**Abstract.** Augmented reality (AR) and machine learning (ML) are rapidly growing technologies with immense potential for transforming education. Web-based augmented reality (WebAR) provides a promising approach to delivering immersive learning experiences on mobile devices. Integrating machine learning models into WebAR applications can enable advanced interactive effects by responding to user actions, thus enhancing the educational content. However, there is a lack of effective methodologies to teach students WebAR development with integrated machine learning. This paper proposes a methodology with three main steps: (1) Integrating standard TensorFlow.js models like handpose into WebAR scenes for gestures and interactions; (2) Developing custom image classification models with Teachable Machine and exporting to TensorFlow.js; (3) Modifying WebAR applications to load and use exported custom models, displaying model outputs as augmented reality content. The proposed methodology is designed to incrementally introduce machine learning integration, build an understanding of model training and

usage, and spark ideas for using machine learning to augment educational content. The methodology provides a starting point for further research into pedagogical frameworks, assessments, and empirical studies on teaching WebAR development with embedded intelligence.

**Keywords:** web-based augmented reality · WebAR · machine learning · TensorFlow.js · Teachable Machine · educational technology

## 1 Вступ

Доповнена реальність у Web (Web-based Augmented Reality, або WebAR) є одним із найпоширеніших способів об'єднання реального та віртуального на мобільних Інтернет-пристроях [98, 99]. Розробка веб-додатків доповненої реальності відрізняється від інших способів розробки тим, що є крос-платформовою і не вимагає встановлення розроблених додатків, що суттєво підвищує рівень мобільності програмного забезпечення порівняно із традиційними мобільними додатками [102].

Наразі найвідоміша у світі некомерційна бібліотека для розробки WebAR – AR.js [10], започаткована Жеромом Етьенном (так, у [93] подано системний опис можливостей застосування AR.js для формування професійних компетентностей майбутніх учителів STEM-дисциплін), проте ХіуКім Юен (HiuKim Yuen [118]), один із розробників AR.js, створив нову бібліотеку під назвою MindAR [119] – більш компактну та технологічно розвинену, але, на відміну від AR.js, маловідому.

AR.js та MindAR побудовані на класичних рушіях ARToolKit та OpenCV відповідно, що наразі є промисловим стандартом. Водночас, якщо AR.js зорієнтована на опрацювання насамперед простих маркерів розміром до  $16 \times 16$ , то MindAR – на природні зображення складної структури. Інша особливість MindAR, що робить її доцільним засобом навчання – включення до її складу відомої бібліотеки машинного навчання TensorFlow [15], що надає потенційні можливості для інтеграції моделей машинного навчання у WebAR додатки з метою створення високоінтерактивних і цікавих ефектів, наприклад, використання жестів рук або міміки для управління AR-контентом.

**Мета дослідження** – розробити окремі елементи методики навчання розробки доповненої реальності для Web із інтегрованими моделями машинного навчання.

Відповідно до мети визначено такі основні **завдання дослідження**:

- а) виконати бібліометричний аналіз джерел із освітніх застосувань WebAR;
- б) дібрати засоби розробки доповненої реальності для Web;
- в) розробити та апробувати методику розробки WebAR додатків для відстеження обличчя;
- г) розробити та апробувати методику інтеграції моделей машинного навчання у WebAR додатки.

## 2 Бібліометричний аналіз джерел із освітніх застосувань WebAR

Для виконання систематизованого бібліометричного аналізу за запитом “WebAR” та “Web-based augmented reality for education” був застосований VOSviewer версії 1.6.18 [34]. В якості джерела даних для першого запиту був обраний Crossref із пошуком по заголовках документів, що надало можливість відібрати 19 документів 2017–2022 рр. (дата запити: 26.11.2022). Відібрані документи були проаналізовані за кількістю разів, які вони цитуються разом із іншими документами. Із 92 джерел, що цитувались у 19 документах, 26 цитуються спільно більше одного разу, утворюючи лише 1 кластер (рис. 1), що складають роботи [98, 99, 105], виконані під керівництвом С. О. Семерікова.

В якості джерела даних для другого запити був обраний Scopus із пошуком по заголовках, анотаціях та ключових словах документів, що надало можливість відібрати 93 документи 2001–2023 рр. (рис. 2), 66 з яких припадають на останні 5 років. Більшу частину з них складають статті у жур-

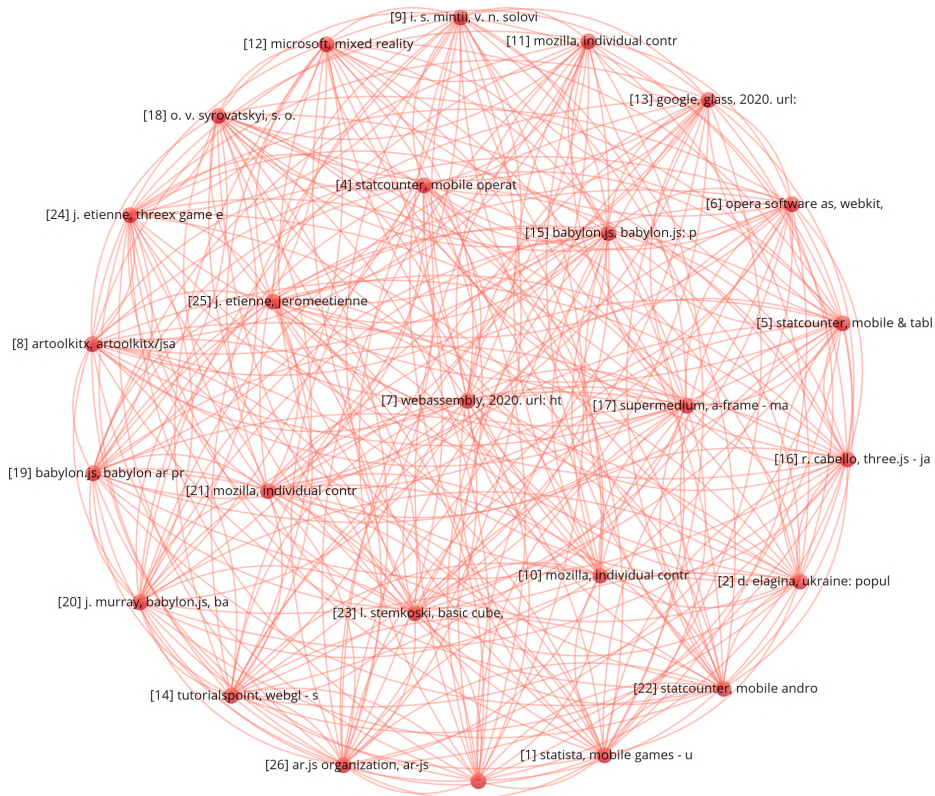


Рис. 1. Семантична мережа посилань у документах за запитом “WebAR”.

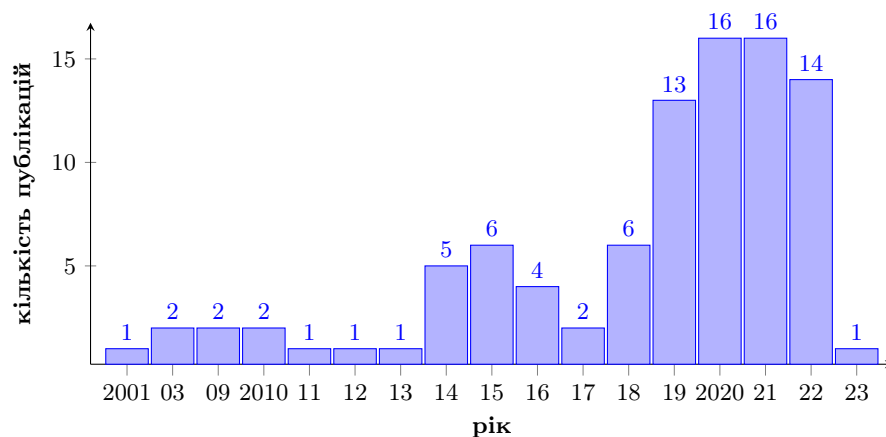


Рис. 2. Розподіл документів за роками (запит “Web-based augmented reality for education”).

налах (58 [4, 19, 21, 23–32, 35–39, 41, 42, 44, 45, 49, 52, 53, 55–59, 61–66, 69–72, 75, 78, 82, 85, 89, 91, 92, 95, 97, 100, 104, 111–113, 115, 117, 120, 121]), меншу – книги (4 [50, 54, 60, 88]) та статті у матеріалах конференцій (31 [1–3, 18, 20, 22, 33, 40, 43, 46, 51, 68, 73, 74, 77, 81, 83, 84, 86, 87, 90, 94, 96, 101, 103, 106, 107, 109, 110, 114, 116]).

Із 301 автора 93 документів 2 та більше разів цитувались 27 авторів, а 3 та більше – 9. На рис. 3 показано семантичну мережу ключових слів у документах за запитом “Web-based augmented reality for education”. Розподіл ключових слів за кластерами (рис. 4) подано у табл. 1.

Перший кластер (виділений червоним кольором на рис. 4 та у табл. 1) пов’язує **базові концепти доповненої реальності в освіті**: доповнену та віртуальну реальність із освітою (зокрема, медичною) та навчанням людей, зокрема, із використанням смартфонів.

*Доповнена реальність* виступає системотвірним елементом – вона пов’язує усі кластери та сама є пов’язаною з усіма іншими концептами.

У аналізованих документах *віртуальна реальність* не пов’язується із традиційним викладанням, мобільним навчанням та інтернет/веб-орієнтованим навчанням. Тут слід відрізнити віртуальну реальність від віртуальних навчальних середовищ, які якраз охоплюють перелічені поняття.

Концепт *освіти* також відноситься до майже універсальних – він не пов’язується лише з інтерфейсами користувача та AR-додатками.

Досить показові зв’язки *медичної освіти* з іншими кластерами: у другому кластері – із поняттями *курикулуму*, *ІКТ навчання*, *комп’ютерно зорієнтованого викладання*, *електронного навчання* та *студентами*, у третьому – із *веб-сайтами* та *педагогічними технологіями доповненої реальності*, у четвертому – із *дистанційною освітою*.







*Комп'ютерно зорієнтоване викладання* пов'язане із концептами першого (доповнена та віртуальна реальність, освіта (включно із медичною) та навчання) та третього (мотивація, веб-сайти, системи навчання, інтерактивні навчальні середовища, AR-додатки, технології доповненої реальності) кластерів.

Концепт *викладання* пов'язаний у першому кластері із доповненою реальністю, освітою та навчанням, смартфонами та інтернет/веб-орієнтованим навчанням, а у третьому – із веб-сайтами, AR-додатками та технологіями доповненої реальності.

*Інженерна освіта* пов'язана у першому кластері із доповненою та віртуальною реальністю, освітою та смартфонами, та з усіма концептами третього і четвертого кластерів.

*ІКТ навчання* пов'язані у першому кластері із доповненою та віртуальною реальністю, освітою (включно із медичною) та навчанням, смартфонами, у третьому – із мотивацією, системами навчання та веб-сайтами, у четвертому – із дистанційною освітою.

Поза межами свого кластеру, *навчальні середовища* пов'язані лише з освітою, доповненою та віртуальною реальністю з першого кластеру й веб-сайтами із третього.

Аналогічно, *мобільне навчання* пов'язане із освітою та доповненою реальністю із першого кластеру й мотивацією, веб-сайтами та системами навчання із третього.

*Інтерфейси користувача* мають зв'язки із концептами першого (навчання, доповнена та віртуальна реальність) та третього (мотивація, веб-сайти) кластерів.

*Курikulumи* пов'язані у першому кластері із освітою (включно з медичною), доповненою та віртуальною реальністю, у третьому – із веб-сайтами та у четвертому із дистанційною освітою.

Третій кластер (виділений блакитним кольором на рис. 4 та у табл. 1) пов'язує **концепти реалізації імерсивного навчального середовища**: веб-сайти, мотивацію, системи навчання, інтерактивні навчальні середовища, AR-додатки та технології доповненої реальності.

Центральними у третьому кластері є *веб-сайти*, що відноситься до майже універсальних концептів – формально, вони не пов'язується лише з інтернет/веб-орієнтованим навчанням через перекриття відповідних понять.

Концепт *мотивації* пов'язаний у першому кластері із доповненою та віртуальною реальністю, освітою та навчанням, а у третьому – із електронним та мобільним навчанням, ІКТ навчання, інтерфейсами користувача, комп'ютерно зорієнтованим викладанням, студентами та інженерною освітою.

*Системи навчання* пов'язані у першому кластері із доповненою та віртуальною реальністю і освітою, а у третьому – із електронним та мобільним навчанням, ІКТ навчання, комп'ютерно зорієнтованим викладанням, студентами та інженерною освітою.

Схожі зв'язки мають й *інтерактивні навчальні середовища*: у першому кластері – із доповненою та віртуальною реальністю і освітою, а у третьому – із електронним навчанням, комп'ютерно зорієнтованим викладанням, студентами та інженерною освітою.

Природно, *AR-додатки* пов'язані у першому кластері з доповненою реальністю та смартфонами, а у другому – із електронним навчанням, комп'ютерно зорієнтованим викладанням, викладанням, студентами та інженерною освітою.

*Технології доповненої реальності* пов'язані у першому кластері з доповненою та віртуальною реальністю і освітою (включно з медичною), а у другому – із електронним навчанням, комп'ютерно зорієнтованим викладанням, викладанням, студентами та інженерною освітою.

Четвертий кластер (виділений жовтим кольором на рис. 4 та у табл. 1) містить **концепт дистанційної освіти**, пов'язаний у першому кластері із концептами доповненої та віртуальної реальності і концептом освіти (включно з медичною), у другому – із концептами студента, інженерної освіти, ІКТ навчання, електронного навчання та курикулуму, та у третьому – із концептом веб-сайту.

Аналіз розподілу концептів за густиною зв'язків (рис. 5) та часом надає можливість визначити, що найбільш давні (до 2015 року) дослідження були зосереджені на питаннях інтерфейсів користувача та їх застосування в освіті. У роботах 2016 року центр уваги зміщувався у напрямі дослідження



**Рис. 5.** Густина зв'язків ключових слів за запитом “Web-based augmented reality for education”.



впливу на студентів викладання у навчальних середовищах. Дослідження 2017 року актуалізували концепти віртуальної реальності, інтерактивних навчальних середовищ, курикулуму, комп'ютерно зорієнтованого навчання, зокрема, у інженерній освіті. Центром уваги досліджень 2018 року стали ІКТ навчання, застосування смартфонів, AR-додатків та педагогічних технологій доповненої реальності.

WebAR стає предметом уваги досліджень 2019 року – у них підіймаються питання застосування смартфонів, інтернет/веб-орієнтованого навчання та доповненої реальності. У 2020 року вплив пандемії COVID-19 додав питання мотивації навчання та медичної освіти. Новий елемент останніх за часом досліджень – це доповнення (аугментація) людини.

### 3 Засоби розробки доповненої реальності для веб

#### 3.1 Налаштування веб-серверу та віддаленого налагоджувача

Для розробки мовами HTML та JavaScript основними засобами розробки є простий текстовий редактор і веб-браузер, в якому можна відкрити звичайну веб-сторінку HTML, збережену локально. Однак це може не спрацювати для додатків, які потребують використання камери. Крім того, може знадобитися час від часу тестувати додатки на власних мобільних пристроях, тому краще встановити локальний веб-сервер. Корисним може бути вибір протоколу HTTPS у додаткових налаштуваннях – без його використання мобільний пристрій може не надати доступ до камери.

Технічно можна виконувати всю роботу з розробки та тестування безпосередньо на настільному браузері, але іноді все ж таки доцільно спробувати на мобільному телефоні. Якщо пристрої підключені до однієї локальної мережі, у якій немає брандмауера, проблем із доступом до веб-серверу немає. Однак, якщо точка доступу до мережі знаходиться за брандмауером, можна використовувати `ngrok` для того, щоб виконати перенаправлення трафіку з порту, доступ до якого обмежений. Після встановлення `ngrok` та створення облікового запису на сайті [79] необхідно зареєструвати агент `ngrok` [80] та запустити його, вказавши в якості параметру протокол (наприклад, HTTP) та номер порту, доступ до якого закриває брандмауера (наприклад, 8887). Після запуску `ngrok` надає глобальне Інтернет-посилання за протоколом HTTPS – але лише у той час, коли працюють одночасно локальний веб-сервер та перенаправлення `ngrok`.

Традиційно, налагодження веб-додатків передбачає перегляд консолі веб-браузера, куди виводяться повідомлення, що стосуються налагодження програми. Однак на мобільному пристрої це може бути не так просто. Тут допоможе RemoteJS [108] – натиснувши після переходу на сайт кнопку “Start Debugging”, отримуємо код агента RemoteJS виду

```
<script
  data-consolejs-channel="9817ec3e-a3f7-fbe3-3836-e2e2d07d5c99"
  src="https://remotejs.com/agent/agent.js"></script>
```

Цей код необхідно скопіювати і вставити безпосередньо у веб-сторінку: після цього всі налагоджувальні повідомлення будуть надіслані на веб-сторінку з адресою [https://remotejs.com/viewer/agent\\_code](https://remotejs.com/viewer/agent_code), де `agent_code` – значення змінної `data-consolejs-channel`.

### 3.2 Застосування графічної бібліотеки для доповненої реальності у веб

WebGL [76] – JavaScript API для рендеринга 3D-графіки в браузерах. Він є крос-платформним стандартом відображення, який підтримують всі основні браузери. Проте низькорівневий код WebGL складно читати та писати, тому були створені більш зручні для користувача бібліотеки.

Three.js [17] є однією з таких бібліотек. Її автор Рікардо Мігель Кабелло, також відомий як mrdoob, є одним із піонерів використання WebGL, тому ця бібліотека часто використовується при побудові інших бібліотек. Більшість WebAR SDK підтримують Three.js, тому вона дійсно потребує опанування для ефективного розробки веб-додатків з доповненою реальністю.

Щоб зрозуміти, як на високому рівні працює Three.js, доцільно провести аналогію з роботою фото- чи кінорежисера, який:

- 1) налаштовує сцену шляхом розташування на ній об'єктів;
- 2) рухає камеру, щоб зафіксувати кадри з різних позицій та ракурсів.

Three.js не є спеціалізованою бібліотекою для доповненої реальності – вона містить суттєво більше функціональності, в тому числі тієї, що є більш придатною для веб-VR (освітлення, камери та ін.) (рис. 6).

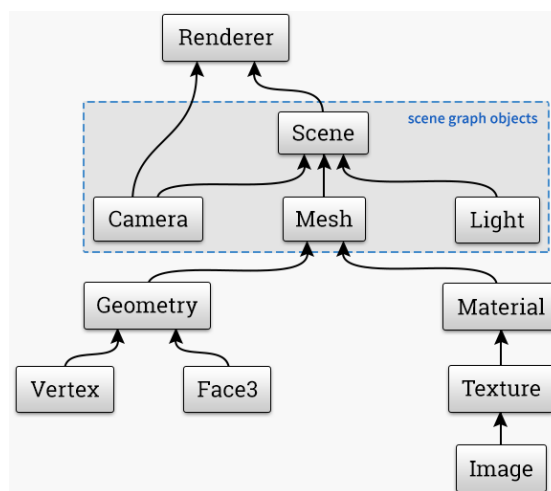


Рис. 6. Загальна структура Three.js.

Як показано на рис. 6, основою є сцена, створення об'єктів на якій відбувається у три кроки:

- 1) визначення геометрії об'єкту – векторів позиції, кольорів та ін.: так, `BoxGeometry` відповідає за прямокутний паралелепіпед;
- 2) визначення матеріалу – способу рендерингу об'єкту (його оптичні властивості – колір, фактура, блиск тощо): так, `MeshBasicMaterial` відповідає матеріалу, що має власний колір і не відбиває промені;
- 3) композиція геометрії та матеріалу виконується за допомогою `Mesh`.

Рендерер – це те, що буде відображати 3D-модель на полотні з урахуванням матеріалу, текстури та освітлення. Для роботи WebAR додатків важливо, щоб сцена була прозорою – тоді на неї можна буде накласти відеопотік з камери. Це досягається встановленням значенням параметру `alpha` у `true` у конструкторі класу `WebGLRenderer`.

Безпосередньо рендеринг виконує метод `render`, який відображає проекцію сцени на полотно (елемент `canvas`) із точки зору камери.

Перед зв'язування полотна зі сторінкою HTML для WebAR додатків необхідно виконати підключення відеопотоку.

На рис. 7 показано першу реалізацію WebAR, в якій реальний об'єкт з камери доповнений віртуальним об'єктом.



Рис. 7. Результат накладання.

Розміщення полотна поверх відео є основою WebAR. Єдине, чого бракує, це відображення об'єкту у більш доцільному місці та оновлення його положення відповідно до сигналу з камери, тобто відстеження об'єкту.

### 3.3 Налаштування бібліотеки для доповненої реальності у веб

Змінити положення зображення можна шляхом переміщення віртуальної камери, змінюючи її позицію (координати) та нахил. Доцільні зміни ви-

магають відстеження об'єктів, тому поширеною є класифікація доповненої реальності на маркерну, безмаркерну, координатну тощо. Автор бібліотеки MindAR пропонує класифікацію доповненої реальності за типом відстеження.

Перший тип – *відстеження зображень*: у цьому типі віртуальні об'єкти з'являються поверх цільових зображень, які можуть бути маркерними (barcode-like), які мають заздалегідь визначену структуру, та природними, які можуть бути чим завгодно. Зображення не обов'язково має бути друкованими чи екранними – можуть бути навіть футболки з доповненою реальністю [67].

Другий тип доповненої реальності – *відстеження обличчя*, за якого об'єкти прикріплюються до людського обличчя. Прикладами є фільтри в Instagram, Google Meet, кампанії у соціальних мережах, додатки для примірки віртуальних аксесуарів тощо.

Третій тип доповненої реальності – *відстеження довкілля* (world tracking), який також називають безмаркерною доповненою реальністю. За такого типу відстеження об'єкти доповненої реальності можуть бути розміщені де завгодно, не обмежуючись конкретним зображенням, обличчям або фізичними об'єктами. Додатки відстеження довкілля безперервно фіксують і відстежують навколишнє середовище та оцінюють фізичне положення користувача додатку. Найчастіше об'єкти доповненої реальності прикріплюються до певної поверхні, зокрема, до землі.

*Геокоординатна доповнена реальність* (location-based AR), відома за Pokémon GO, Ingress тощо передбачає прив'язку контенту до певного географічного положення – широти та довготи. Зазвичай ці програми відстежують довкілля, оскільки доповнений вміст, як правило, прикріплений до землі, а геокоординатна частина є скоріше додатковою умовою, виконання якої приводить до початку відстеження довкілля (або обличчя) у певному місці.

Можуть бути визначені й інші типи відстеження – відстеження 3D-об'єктів, відстеження рук та ін.

Незважаючи на різноманіття бібліотек для доповненої реальності, їх основною задачею є визначення позиції віртуальної камери відповідно до відстежуваного об'єкту, що ілюструється наступним псевдокодом:

```
const ar_engine = new SOME_AR_ENGINE();
while(true) {
  await nextVideoFrameReady();
  const {position, rotation} = ar_engine.computeCameraPose(video);
  camera.position = position;
  camera.rotation = rotation;
}
```

Спочатку необхідно ініціювати бібліотеку – певний AR-рушій, та отримати посилання на нього. Далі у безперервному циклі дочекатись кадру з відеопотоку реальної камери, визначити її положення (координати на нахил) та перемістити віртуальну камеру на полотні у те саме положення.

Нерідко, однак, рухають не віртуальну камеру, а об'єкти на сцені – тоді визначається положення не реальної камери, а відстежуваного об'єкту, після чого об'єкт віртуальної реальності переміщується у те саме положення, що й відстежуваний об'єкт:

```
const ar_engine = new SOME_AR_ENGINE();
while(true) {
  await nextVideoFrameReady();
  const {position, rotation} = ar_engine.computeObjectPose(video);
  some_object.position = position;
  some_object.rotation = rotation;
}
```

Зображення, що відстежується, може бути будь-якого походження, проте воно має бути підготовленим: так, якщо воно містить зайві елементи, їх необхідно видалити.

Для розпізнавання зображення з використанням бібліотеки MindAR необхідно виділити на ньому опорні точки – елементи, за якими буде виконуватись розпізнавання. Це можна зробити за допомогою компілятора зображень, розміщеного за посиланням <https://hiukim.github.io/mind-ar-js-doc/tools/compile>. Результатом роботи компілятора є бінарний файл `targets.mind`, що містить опис опорних точок, відстеження яких відбуватиметься.

Інші бібліотеки мають схожі засоби отримання опису зображень, які часто називають компіляторами NFT маркерів (від natural feature tracking). Таке зображення повинно бути візуально складним та мати високу роздільну здатність (тут деталі мають значення). Візуально складне зображення надає програмному забезпеченню багато можливостей для відстеження унікальних частин зображення, що легко розпізнаються. Від фізичного розміру NFT маркера також залежить якість його розпізнавання – до малих за розміром зображень мобільний пристрій необхідно наблизити, у той час як від великих навпаки – тримати подалі. Якість розпізнавання також залежить від освітленості екрану мобільного пристрою; крім того, камери з низькою роздільною здатністю зазвичай працюють краще, коли вони знаходяться близько до маркерів.

Бібліотека Three.js є частиною MindAR, що суттєво спрощує їх взаємодію: так, конструктор класу `MindARThree` створює необхідні для роботи із Three.js об'єкти – рендерер, сцену та камеру, доступні відповідно як поля `renderer`, `scene` і `camera`.

Якірні об'єкти, що повертаються викликом методу `addAnchor`, параметр якого відповідає номеру зображення, що розпізнається, використовуються для відстеження цільових зображень та надають позицію, в якій повинен бути розміщений об'єкт. Замість того, щоб додавати об'єкти Three.js безпосередньо до сцени, вони додаються до складової якоря – об'єкту `group` класу `THREE.Group`, що визначає множину пов'язаних об'єктів, положенням, орієнтацією та видимістю яких можна керувати спільно. Ця якірна група управ-

ляється бібліотекою MindAR, яка буде постійно оновлювати положення і орієнтацію групи відповідно до нашого набору для відстеження.

Метод `start` класу `MindARThree` виконує налаштування параметрів, вмикання камери та завантажує у пам'ять веб-браузера усі необхідні дані.

Для того, щоб рендерер, камера та сцена запрацювали, необхідно створити функцію для їх візуалізації. У безіменній функції зворотного виклику, що створюється функцією `setAnimationLoop`, для кожного кадру із об'єкту `renderer` викликається метод `render`, параметрами якого є об'єкти `scene` та `camera` – це і є анімація на полотні. У результаті отримуємо повнофункціональний WebAR додаток, що відстежує одне зображення (рис. 8).

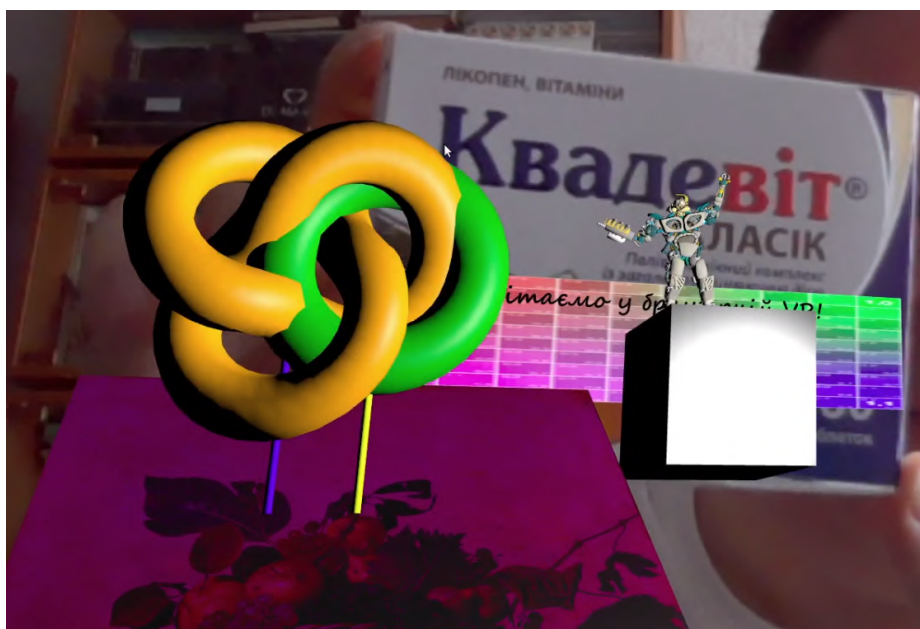


Рис. 8. Результат розпізнавання зображення.

## 4 Методика розробки WebAR додатків для відстеження обличчя

### 4.1 Модель опорних точок обличчя

Бібліотека MindAR має два основні набори модулів – для роботи з зображеннями (`image`) та для роботи з обличчями (`face`). Схожість API для відстеження зображень і відстеження обличчя чітко простежується у коді MindAR. Попри схожість, метод `addAnchor` по-іншому трактує параметр: якщо для



роботі із зображеннями це був номер цільового зображення, то при розпізнаванні обличчя це буде номер опорної точки обличчя.

Виявлення опорних точок обличчя базується на відомій моделі бібліотеки TensorFlow [5]. Модель MediaPipe Face Mesh [48] є згортковою нейронною мережею, що визначає на обличчі 468 тривимірних опорних точок ([https://github.com/tensorflow/tfjs-models/raw/master/face-landmarks-detection/mesh\\_map.jpg](https://github.com/tensorflow/tfjs-models/raw/master/face-landmarks-detection/mesh_map.jpg)), і ми можемо прив'язувати об'єкти до будь-якої з них (рис. 9).

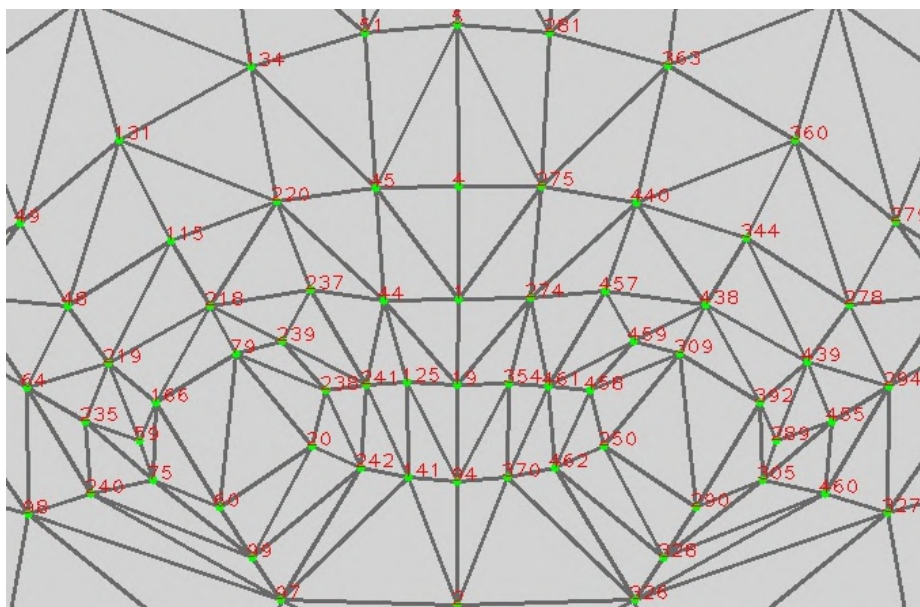


Рис. 9. Опорні точки обличчя (фрагмент).

#### 4.2 Накладання маски на обличчя

Маска для обличчя (face mesh) – ще один тип доповненої реальності, пов'язаної з накладанням зображень (текстур) на всі опорні точки обличчя людини, а не прив'язки до окремих із них. Маски для обличчя використовуються для створення різноманітних ефектів макіяжу, татуювання тощо – аж до повної віртуалізації особи.

Маска для обличчя не є заздалегідь визначеною 3D-моделлю – вона динамічно генерується з постійним оновленням геометрії. Для накладання маски на обличчя нам знадобиться відповідна текстура.

Створення маски відбувається викликом `addFaceMesh`. Метод `addFaceMesh` за формою схожий на `addAnchor`, але сутність у них різна: у `addAnchor` створюється порожня група, до якої додаються об'єкти, положенням яких керує MindAR, у той час як `faceMesh`, що повертається

`addFaceMesh`, є єдиним відображуваним об'єктом, геометрія якого змінюється у кожному кадрі.

Матеріалом маски для обличчя може бути довільна текстура – якщо її не встановити, маска для обличчя буде виглядати, як показано на першому зображенні (рис. 10).



Рис. 10. Маски для обличчя.

Побачити структуру цієї маски можна на другому зображенні (рис. 10) – для цього необхідно встановити атрибут `wireframe` матеріалу зображення. Третє та четверте зображення (рис. 10) є прикладами накладання моди-

фікованої текстури опорних точок обличчя. У документації до Meta Spark Studio [6] можна знайти набір текстур для масок для обличчя, що можна використовувати для створення власних масок, як описано у [9].

Створення гарної маски потребує певних художніх навичок, проте, послуговуючись канонічною текстурою (рис. 9), це зробити досить просто – достатньо нанести поверх неї необхідне зображення та видалити зайві лінії.

## 5 Методика інтеграції моделей машинного навчання у WebAR додатки

### 5.1 Інтеграція стандартних моделей

Для машинного навчання у Інтернеті найчастіше використовують TensorFlow [14] – безкоштовну бібліотеку машинного навчання з відкритим вихідним кодом, розроблену компанією Google. На сьогодні вона підтримує багато мов, включаючи основні – Python, Java, C++ – та підтримувані спільнотою: Haskell, C#, Julia, R, Ruby, Rust, Scala. Вона доступна на багатьох платформах, включаючи Linux, Windows, Android, а також убудованих платформах – версія бібліотеки TensorFlow Lite призначена для роботи з моделями машинного навчання на мобільних пристроях, мікроконтролерах, пристроях Інтернету речей тощо.

TensorFlow.js [15] – версія TensorFlow на JavaScript, що надає можливість розробляти та використовувати моделі, послуговуючись цією мовою, безпосередньо у браузері. TensorFlow.js поставляється з великою кількістю попередньо навчених моделей, які можна одразу використовувати [16]. Повний перелік моделей, доступних на поточний момент, подано за посиланням <https://github.com/tensorflow/tfjs-models> – багато із них є надзвичайно корисними і можуть стати гарним доповненням до AR-додатків. Якщо необхідна функціональність відсутня, можна створити та навчити власні моделі, або модифікувати наявні.

TensorFlow.js є частиною бібліотеки MindAR. Однак, моделі не є частиною TensorFlow.js, тому їх необхідно підключати окремо – так, як показано на прикладі моделі `handpose.js`, описаної у [7]. Ця модель використовується для визначення кисті руки та її складових.

Завантаження моделі `handpose` виконується з Kaggle (TensorFlow Hub) [11]: переглянувши цей репозитарій моделей, можна побачити, що вони займають чималий обсяг, тому метод `load`, що їх завантажує, викликається як асинхронна функція.

Модель `handpose` опрацьовує окремі кадри, які беруться з відеопотоку. Це достатньо обчислювально ємна процедура, тому, ураховуючи, що, доки велика точність ідентифікації рук непотрібна, можна спробувати виявляти їх не у кожному кадрі. Функція `detect` утворює окремий цикл анімації, в якому для кожного десятого кадру виконується виклик методу `estimateHands` завантаженої моделі, якому передається кадр `video`. Метод повертає масив `predictions`, який містить відомості про детектовані у кадрі

зображення рук, тому ненульовий розмір масиву – ознака того, що у кадрі була рука:

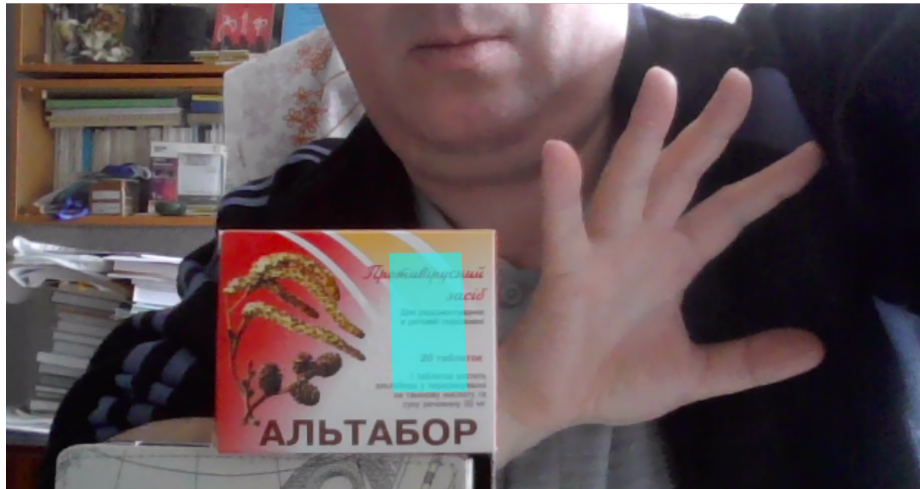
```
const video = mindarThree.video;

let frameCount = 1;

const detect = async () => {
  if (frameCount % 10 == 0) {
    const predictions = await model.estimateHands(video);
    if (predictions.length > 0) {
      //...
    }
    frameCount++;
    window.requestAnimationFrame(detect);
  }
}

window.requestAnimationFrame(detect);
```

На рис. 11 показано приклад встановлення положення площини на детектованому зображенні так, щоб воно відображало положення обмежувального прямокутника руки у кадрі – ефект достатньо простий, проте він надає уявлення про те, як використовувати моделі машинного навчання у AR-додатках.



**Рис. 11.** Жестовое управление размером та положенням віртуального об'єкта.

## 5.2 Розробка користувацьких моделей

Для швидкого створення та навчання власної моделі можна скористатись Teachable Machine [47] – складовою проекту Google A.I. Experiment (<https://labs.google/> та <https://experiments.withgoogle.com/>), що надає можливість будувати моделі для розв’язання задач класифікації зображень, звуків та поз.

Для використання Teachable Machine студентам пропонується створити новий або застосувати існуючий обліковий запис Google, після чого вони можуть обрати тип моделі, яку вони бажають створити. Доступні три типи моделей:

- модель розпізнавання зображень дозволяє ідентифікувати об’єкти на фотографіях;
- модель розпізнавання звуків дозволяє розпізнавати аудіозаписи;
- модель розпізнавання поз дозволяє розпізнавати рухи тіла.

Після вибору типу моделі необхідно надати дані для її навчання у формі фотографій, аудіозаписів або відео. Після надання даних Teachable Machine розпочне навчання моделі, що може зайняти певний час, залежно від обсягу та складності навчання. Після навчання моделі її доцільно перевірити на правильність розпізнавання даних. Якщо модель виявиться недостатньо точною, можна надати додаткові дані для її покращення. Після успішного навчання та перевірки моделі її можна експортувати для використання в інших проектах.

Завдяки широкому функціоналу Teachable Machine ми можемо розпізнавати звуки, пози, обличчя чи будь-які зображення. Але для початку її застосування необхідно підготувати фотографії та аудіозаписи для подальших експериментів, потім виконати навчання обраної моделі та застосувати її безпосередньо у веб-середовищі.

Натискаючи кнопку **Get Started** на головній сторінці, переходимо в нове вікно, в якому пропонується скористатись шаблоном проекту або створити власний.

Створюючи власний проект, маємо обрати, яку модель будемо використовувати. Зупиняємо свій вибір на **Image Project** та натискаємо **Standard image model**. В якості джерела зображень пропонуємо студентам застосувати власні веб-камери та виконати серію знімків голови з різними ракурсами (кутами нахилу та повороту), які збережемо у заздалегідь заготовлений каталог. Візьмемо кілька різних зображень від кожного учасника експерименту та розділимо на класи, зазначивши відповідні прізвища (рис. 12).

Для кожного класу зображень є ймовірність того, що певне зображення належить саме до цього класу. Пропонуємо студентам налаштувати додаткові параметри навчання, такі як кількість ітерацій та швидкість навчання моделі.

Далі переходимо власне до навчання моделі – на цьому етапі усі зображення переводяться у відповідні числові тензори. Останній крок – експериментуємо, обираючи зображенні різних людей (не лише учасників експерименту) та обговорюючи результати розпізнавання (рис. 13).



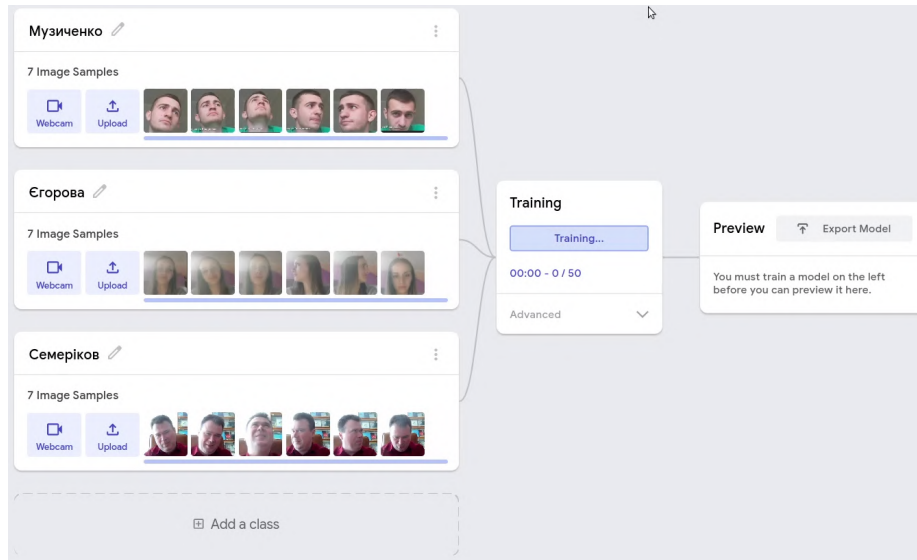


Рис. 12. Розподіл зображень по класах.

### 5.3 Інтеграція користувацьких моделей

Бібліотеки, що входять до складу Teachable Machine, базуються на моделях TensorFlow: MobileNet для класифікації зображень [8], Speech Commands для класифікації звуків [13] та PoseNet для класифікації поз тіла [12].

Відповідно, побудована модель класифікації осіб може бути експортована та застосована так само, як і раніше використані моделі опорних точок обличчя та пози рук. Натискання кнопки **Export Model** надає можливість експорту у форматах:

- TensorFlow.js – розміщення моделі за посиланнями [https://teachablemachine.withgoogle.com/models/\[...\]](https://teachablemachine.withgoogle.com/models/[...]) або завантаження моделі та коду JavaScript і p5.js (рис. 14);
- TensorFlow – завантаження коду Python та моделі у форматах h5 (Keras) та Savedmodel (TensorFlow);
- TensorFlow Lite – завантаження моделі у форматі tflite для пристроїв IoT на базі Android та Coral.

Архів з моделлю для TensorFlow.js містить 3 файли:

- `metadata.json` – текстовий файл у форматі JSON, що містить відомості про номери версій TensorFlow.js (`tfjsVersion`), Teachable Machine (`tmVersion`), бібліотеки зі складу Teachable Machine (`packageVersion`) та її імені (`packageName` – у нашому випадку це `@teachablemachine/image`), дату створення (`timeStamp`) та ім'я моделі (`modelName` – за замовчанням `tm-my-image-model`), розмір зображення (`imageSize` – усі зображення



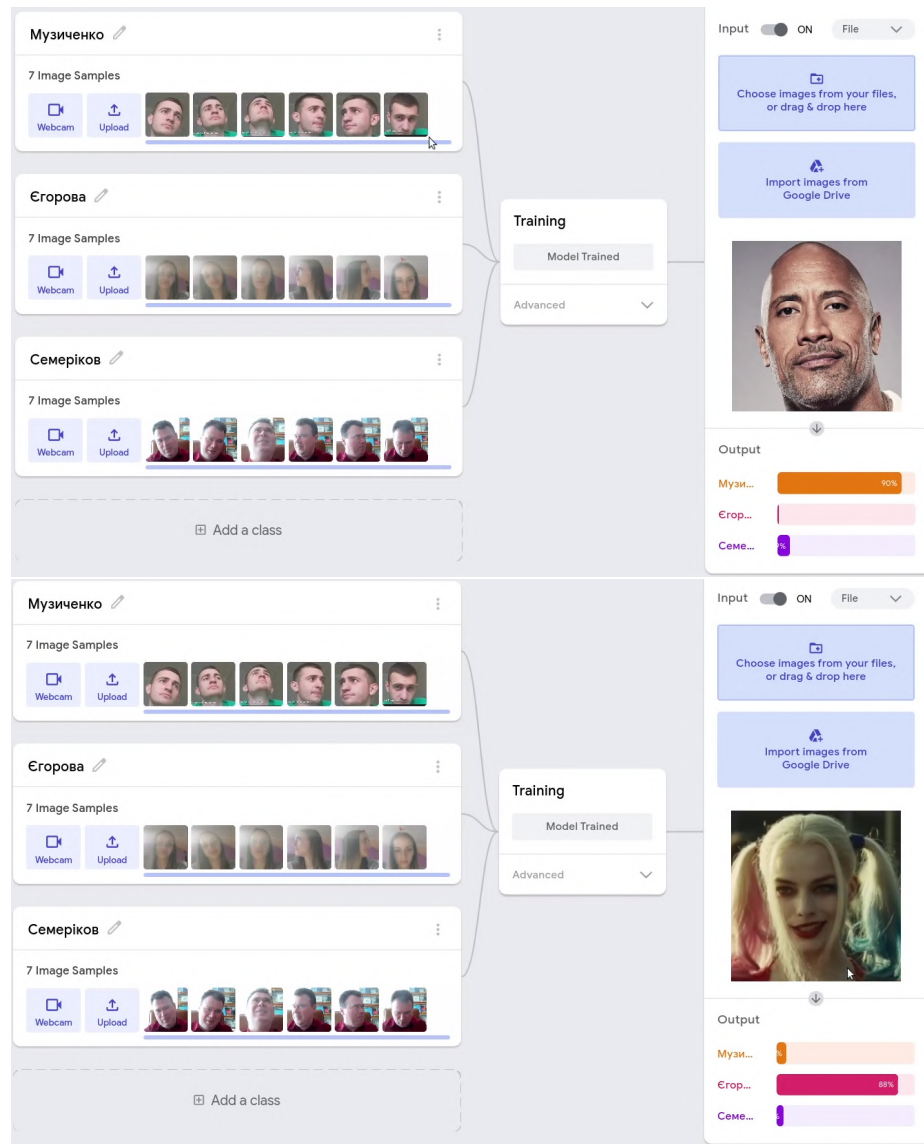
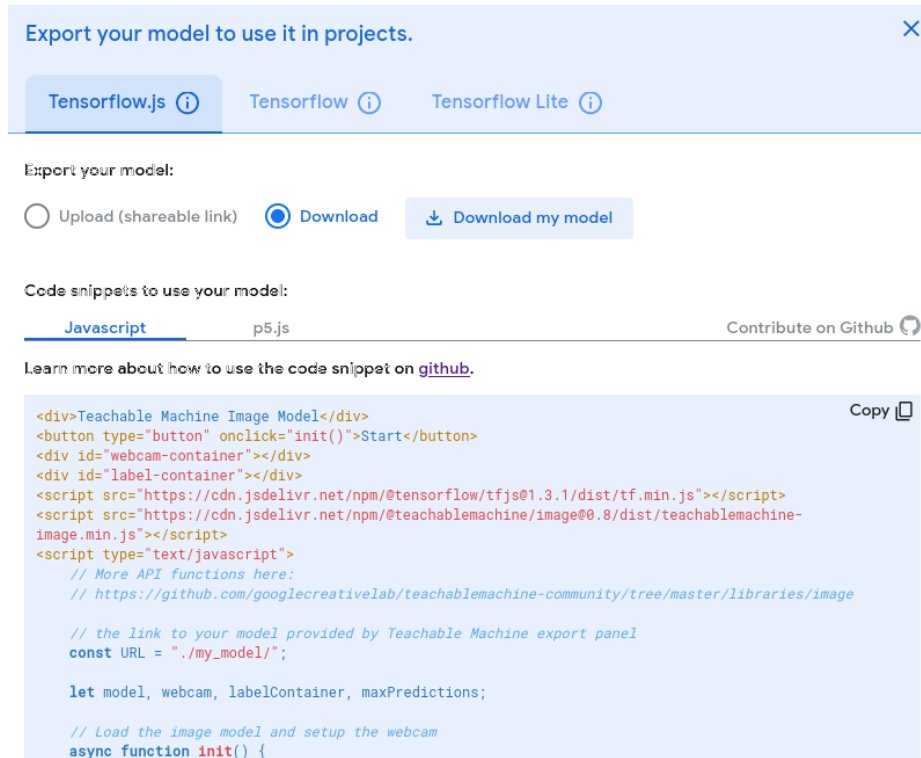


Рис. 13. Результати роботи моделі розпізнавання зображень.

- приводяться до одного розміру) та категорії (labels), що використовувались для розмітки даних: Музиченко, Єгорова, Семеріков;
- `model.json` – текстовий файл у форматі JSON, що містить відомості про архітектуру нейронної мережі (`modelTopology`);
  - `weights.bin` – бінарний файл, що містить вагові коефіцієнти нейронної мережі.



Export your model to use it in projects. X

Tensorflow.js ⓘ Tensorflow ⓘ Tensorflow Lite ⓘ

Export your model:

Upload (shareable link)  Download

Code snippets to use your model:

Javascript p5.js [Contribute on Github](#)

Learn more about how to use the code snippet on [github](#).

```
<div>Teachable Machine Image Model</div>
<button type="button" onclick="init()">Start</button>
<div id="webcam-container"></div>
<div id="label-container"></div>
<script src="https://cdn.jsdelivr.net/npm/@tensorflow/tfjs@1.3.1/dist/tf.min.js"></script>
<script src="https://cdn.jsdelivr.net/npm/@teachablemachine/image@0.8/dist/teachablemachine-image.min.js"></script>
<script type="text/javascript">
  // More API functions here:
  // https://github.com/googlecreativelab/teachablemachine-community/tree/master/libraries/image

  // the link to your model provided by Teachable Machine export panel
  const URL = "./my_model/";

  let model, webcam, labelContainer, maxPredictions;

  // Load the image model and setup the webcam
  async function init() {
```

Рис. 14. Завантаження моделі для TensorFlow.js.

При експорті моделей пропонується тестовий код для їх перевірки, з якого можна дізнатись, як підключити бібліотеку `tmImage` та завантажити модель викликом `load`, параметрами якого є шлях до файлів архітектури та метаданих моделі – `model.json` та `metadata.json`.

Після завантаження моделі викликом методу `getTotalClasses` можна визначити кількість категорій, що розрізнятиме модель – у нашому випадку це значення, збережене у `maxPredictions`, дорівнюватиме трьом.

Так само, як і раніше, кожний десятий кадр передаємо моделі для аналізу викликом `predict`, що повертає масив з двох об'єктів, що містять відомості про категорію (`className`) та ймовірність того, що зображення відноситься до неї (`probability`) – рядок із відомостями про них й візуалізується.

Із рис. 15 можна побачити, що зображення ліворуч ідентифікується правильно попри зміну фону порівняно із набором зображень, на яких виконувалось навчання (рис. 12), а зображення праворуч – неправильно.

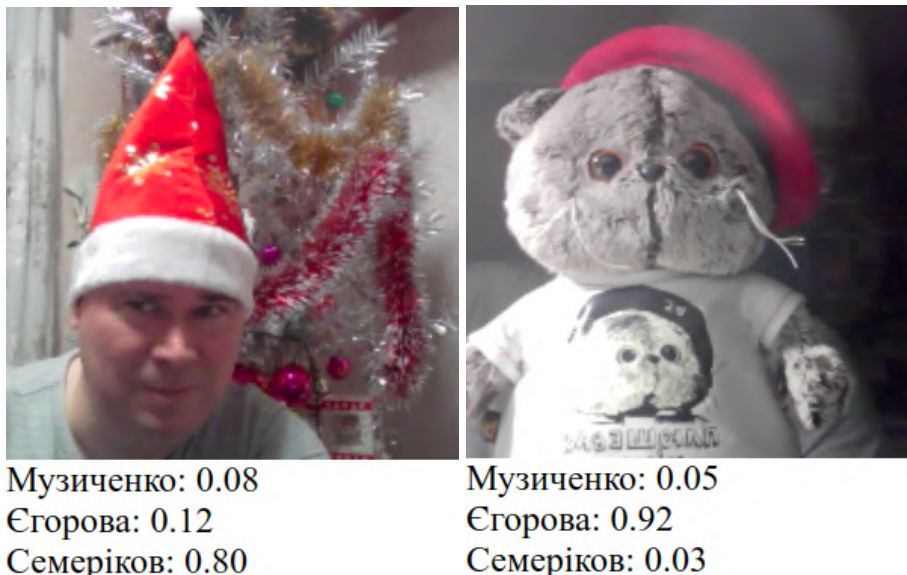


Рис. 15. Реалізація розпізнавання осіб.

## 6 Висновки

Виконане розв'язання проблеми розробки методики навчання розробки доповненої реальності для Web із інтегрованими моделями машинного навчання надало можливість отримати такі висновки:

1. Бібліометричний аналіз джерел за базами Crossref (19 документів 2017–2022 рр.) та Scopus (93 документи 2001–2023 рр.) надав можливість виокремити основні концепти дослідження, згруповані у 4 кластери:
  - (а) перший кластер пов'язує *базові концепти доповненої реальності в освіті*: доповнену та віртуальну реальність із освітою (зокрема, медичною) та навчанням людей, зокрема, із використанням смартфонів;
  - (б) другий кластер пов'язує *концепти проектування навчального середовища*: викладання, інженерну освіту, комп'ютерно зорієнтоване викладання, електронне навчання, студентів, мобільне навчання, навчальні середовища, ІКТ навчання та курикулуми;
  - (в) третій кластер пов'язує *концепти реалізації імерсивного навчального середовища*: веб-сайти, мотивацію, системи навчання, інтерактивні навчальні середовища, AR-додатки та технології доповненої реальності;
  - (г) четвертий кластер містить *концепт дистанційної освіти*, пов'язаний у першому кластері із концептами доповненої та віртуальної реальності і концептом освіти (включно з медичною), у другому – із кон-

цептами студента, інженерної освіти, ІКТ навчання, електронного навчання та курикулуму, та у третьому – із концептом веб-сайту.

Аналіз розподілу концептів за густиною зв'язків та часом надав можливість датувати появу різних концептів та відслідкувати їх розвиток від освітніх застосувань інтерфейсів користувача до його аугментації.

2. Дібрані засоби розробки доповненої реальності для Web утворюють три групи:

(а) основні засоби:

- веб-сервер Web Server for Chrome надає необхідну повну функціональність без потреби встановлення, що задовольняє вимогам простоти та мобільності;
- засіб перенаправлення трафіку ngrok надає можливість доступу до веб-сервера, який знаходиться за брандмауером (на учнівському або вчительському комп'ютері), що створює умови для спільної роботи у віддаленому режимі;
- віддалений налагоджувач RemoteJS надає можливість виконувати налагодження програм мовою JavaScript на мобільних пристроях, послугуючись десктопними браузерами;

(б) графічна бібліотека Three.js є високорівневою реалізацією крос-платформного стандарту відображення WebGL мовою JavaScript, що надає можливість працювати із графічними абстракціями високого рівня;

(в) бібліотека для доповненої реальності MindAR надає можливість роботи із природними зображенням в якості якорів доповненої реальності та містить у своєму складі бібліотеки Three.js і TensorFlow.js – останнє є ключовим для інтеграції моделей машинного навчання, створених за допомогою TensorFlow, із WebAR додатками, побудованими із використанням MindAR.

3. У процесі розробки та апробації методики розробки WebAR додатків для відстеження обличчя обґрунтовано доцільність спільного застосування моделі MediaPipe Face Mesh – згорткової нейронної мережі, що визначає на обличчі 468 тривимірних опорних точок, та бібліотеки MindAR, що надає можливість визначити будь-яку з них в якості якоря. Показано, що повне застосування моделі MediaPipe Face Mesh у бібліотеці MindAR реалізовано у вигляді маски для обличчя, що динамічно генерується з постійним оновленням геометрії – типу доповненої реальності, пов'язаного з накладання зображень на всі опорні точки обличчя людини. Подано приклади застосування масок для обличчя з метою створення ефектів макіяжу, татуювання тощо.

4. Методика інтеграції моделей машинного навчання у WebAR додатки передбачає опанування трьох основних кроків:

(а) перший крок – *інтеграція стандартних моделей* – передбачає ознайомлення із попередньо навченими моделями TensorFlow.js, що можуть бути застосовані у WebAR додатках. Показано доцільність розгляду моделі handpose.js, що використовується для визначення кисті руки та її складових, продемонстровано основну проблему WebAR –

суттєве падіння продуктивності при застосуванні моделі до кожного кадру, та запропоновано спосіб її розв'язання. У результаті першого кроку створюється WebAR додаток для жестового управління розміром та положенням віртуального об'єкта;

- (б) другий крок – *розробка користувацьких моделей* – передбачає створення та навчання власних моделей TensorFlow з використанням Teachable Machine, яка надає можливість будувати моделі для розв'язання задач класифікації зображень, звуків та поз;
- (в) третій крок – *інтеграція користувацьких моделей* – виконується шляхом експорту побудованої за допомогою Teachable Machine моделі класифікації облич та модифікації WebAR додатку, розробленого на першому кроці: завантажується власна модель, визначається кількість категорій, що вона класифікуватиме, а об'єктом доповненої реальності стають відомості про кожну із категорій та ймовірності того, що зображення з веб-камери відноситься до них. Останнє надає можливість для обговорення питань помилок класифікації та їх залежності як від налаштування параметрів навчання моделі, так і способу подання тестових зображень WebAR додатку.

Проведене дослідження не вичерпує усіх складових поставленої проблеми – так, потребують подальшого дослідження:

- історія та перспективи розвитку WebAR у освіті;
- методика спільного використання різних середовищ моделювання нейронних мереж;
- розвиток бібліотек WebAR, зокрема – у напрямі реалізації повсюдної доповненої реальності;
- співвідношення реального та віртуального у навчанні в умовах пандемії, стихійного лиха та військового конфлікту.

## References

- [1] LATICE '14: Proceedings of the 2014 International Conference on Teaching and Learning in Computing and Engineering. IEEE Computer Society, USA (2014), ISBN 9781479935925, URL <https://www.computer.org/csdl/proceedings/lattice/2014/12OmNrAdsty>
- [2] Proceedings of 2015 International Conference on Interactive Mobile Communication Technologies and Learning, IMCL 2015. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. (2015), <https://doi.org/10.1109/IMCL37494.2015>
- [3] Innovative Technologies and Learning: 4th International Conference, ICTL 2021, Virtual Event, November 29 – December 1, 2021, Proceedings, Lecture Notes in Computer Science, vol. 13117. Springer International Publishing (2021), ISBN 9783030915407, <https://doi.org/10.1007/978-3-030-91540-7>

- [4] Preface. *Journal of Physics: Conference Series* **1860**(1), 011001 (mar 2021), <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1860/1/011001>
- [5] Face Landmarks Detection (2023), URL <https://github.com/tensorflow/tfjs-models/tree/master/face-landmarks-detection>
- [6] Face reference assets for Meta Spark Studio (2023), URL <https://spark.meta.com/learn/articles/people-tracking/face-reference-assets>
- [7] Hand Pose Detection (2023), URL <https://github.com/tensorflow/tfjs-models/tree/master/hand-pose-detection>
- [8] MobileNet (2023), URL <https://github.com/tensorflow/tfjs-models/tree/master/mobilenet>
- [9] The face mask template in Adobe® Photoshop® (2023), URL <https://spark.meta.com/learn/articles/creating-and-prepping-assets/the-face-mask-template-in-Adobe>
- [10] AR.js Documentation (2024), URL <https://ar-js-org.github.io/AR.js-Docs/>
- [11] Find Pre-trained Models | Kaggle (2024), URL <https://www.kaggle.com/models>
- [12] Pose Detection in the Browser: PoseNet Model (2024), URL <https://github.com/tensorflow/tfjs-models/tree/master/posenet>
- [13] Speech Command Recognizer (2024), URL <https://github.com/tensorflow/tfjs-models/tree/master/speech-commands>
- [14] TensorFlow (2024), URL <https://www.tensorflow.org/>
- [15] TensorFlow.js | Machine Learning for JavaScript Developers (2024), URL <https://www.tensorflow.org/js>
- [16] TensorFlow.js models (2024), URL <https://www.tensorflow.org/js/models>
- [17] Three.js – JavaScript 3D Library (2024), URL <https://threejs.org/>
- [18] Al-Gharaibeh, J., Jeffery, C.: Portable non-player character tutors with quest activities. In: 2010 IEEE Virtual Reality Conference (VR), pp. 253–254 (2010), <https://doi.org/10.1109/VR.2010.5444779>
- [19] An, J., Poly, L.P., Holme, T.A.: Usability Testing and the Development of an Augmented Reality Application for Laboratory Learning. *Journal of Chemical Education* **97**, 97–105 (2020), <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.9b00453>
- [20] Antoniou, P.E., Daffi, E., Arfaras, G., Bamidis, P.D.: Versatile Mixed Reality Educational Spaces; A Medical Education Implementation Case. In: Georgalas, N., Jin, Q., Garcia-Blas, J., Carretero, J., Ray, I. (eds.) *Proceedings - 2016 15th International Conference on Ubiquitous Computing and Communications and 2016 8th International Symposium on Cyberspace and Security, IUCC-CSS 2016*, pp. 132–137, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. (2017), <https://doi.org/10.1109/IUCC-CSS.2016.026>
- [21] Antoniou, P.E., Daffi, E., Arfaras, G., Bamidis, P.D.: Versatile mixed reality medical educational spaces; requirement analysis from expert users. *Personal and Ubiquitous Computing* **21**, 1015–1024 (2017), <https://doi.org/10.1007/s00779-017-1074-5>



- [22] Anwar, S., LeClair, J., Peskin, A.: Development Of Nanotechnology And Power Systems Options For An On Line Bseet Degree. In: 2010 Annual Conference & Exposition, pp. 15.420.1 – 15.420.10, ASEE Conferences, Louisville, Kentucky (June 2010), <https://doi.org/10.18260/1-2--15776>
- [23] Arteaga, J.V., Gravini-Donado, M.L., Riva, L.D.Z.: Digital Technologies for Heritage Teaching: Trend Analysis in New Realities. *International Journal of Emerging Technologies in Learning* **16**, 132–148 (2021), <https://doi.org/10.3991/ijet.v16i21.25149>
- [24] Arvanitis, T.N., Petrou, A., Knight, J.F., Savas, S., Sotiriou, S., Gargalakos, M., Gialouri, E.: Human factors and qualitative pedagogical evaluation of a mobile augmented reality system for science education used by learners with physical disabilities. *Personal and Ubiquitous Computing* **13**, 243–250 (2009), <https://doi.org/10.1007/s00779-007-0187-7>
- [25] Atmaca, H.T., Terzi, O.S.: Building a Web-Augmented Reality application for demonstration of kidney pathology for veterinary education. *Polish Journal of Veterinary Sciences* **24**, 345–350 (2021), <https://doi.org/10.24425/pjvs.2021.137671>
- [26] Baashar, Y., Alkaws, G., Ahmad, W.N.W., Alhussian, H., Alwadain, A., Capretz, L.F., Babiker, A., Alghail, A.: Effectiveness of Using Augmented Reality for Training in the Medical Professions: Meta-analysis. *JMIR Serious Games* **10**, e32715 (2022), <https://doi.org/10.2196/32715>
- [27] Bhavika, K., Martin, J., Ardit, B.: Technology will never replace hands on surgical training in plastic surgery. *Journal of Plastic, Reconstructive and Aesthetic Surgery* **75**, 439–488 (2022), <https://doi.org/10.1016/j.bjps.2021.11.034>
- [28] Bradford, H.M., Farley, C.L., Escobar, M., Heitzler, E.T., Tringali, T., Walker, K.C.: Rapid Curricular Innovations During COVID-19 Clinical Suspension: Maintaining Student Engagement with Simulation Experiences. *Journal of Midwifery and Women’s Health* **66**, 366–371 (2021), <https://doi.org/10.1111/jmwh.13246>
- [29] Brewster, S., Murray-Smith, R. (eds.): *Haptic Human-Computer Interaction: First International Workshop, Glasgow, UK, August 31 - September 1, 2000, Proceedings, Lecture Notes in Computer Science*, vol. 2058. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg (2001), ISBN 9783540445890, <https://doi.org/10.1007/3-540-44589-7>
- [30] Brunzini, A., Papetti, A., Serrani, E.B., Scafà, M., Germani, M.: How to Improve Medical Simulation Training: A New Methodology Based on Ergonomic Evaluation. In: Karwowski, W., Ahram, T., Nazir, S. (eds.) *Advances in Human Factors in Training, Education, and Learning Sciences, Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol. 963, pp. 145–155, Springer International Publishing, Cham (2020), ISBN 978-3-030-20135-7, [https://doi.org/10.1007/978-3-030-20135-7\\_14](https://doi.org/10.1007/978-3-030-20135-7_14)
- [31] Budiharto, W., Gunawan, A.A.S., Wulandhari, L.A., Williem, Faisal, Sutoyo, R., Meiliana, Suryani, D., Arifin, Y. (eds.): *The 3rd International Conference on Computer Science and Computational Intelligence (ICCSCI 2018) : Empowering Smart Technology in Digital Era for a*

- Better Life, *Procedia Computer Science*, vol. 135. Elsevier B.V. (2018), URL <https://www.sciencedirect.com/journal/procedia-computer-science/vol/135/suppl/C>
- [32] Burian, B.K., Ebnali, M., Robertson, J.M., Musson, D., Pozner, C.N., Doyle, T., Smink, D.S., Miccile, C., Paladugu, P., Atamna, B., Lipsitz, S., Yule, S., Dias, R.D.: Using extended reality (XR) for medical training and real-time clinical support during deep space missions. *Applied Ergonomics* **106**, 103902 (2023), <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2022.103902>
- [33] Cardenas-Sainz, B., Zatarain-Cabada, R., Barron-Estrada, M., Chavez-Echeagaray, M., Cabada, R.: FisticARTivo: Design of a learning tool for physics education using web-based XR technology. In: 2022 IEEE Mexican International Conference on Computer Science, ENC 2022 - Proceedings, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. (2022), <https://doi.org/10.1109/ENC56672.2022.9882930>
- [34] Centre for Science and Technology Studies, Leiden University, The Netherlands: VOSviewer - Visualizing scientific landscapes (2024), URL <https://www.vosviewer.com/>
- [35] Coma-Tatay, I., Casas-Yrurzum, S., Casanova-Salas, P., Fernández-Marín, M.: FI-AR learning: a web-based platform for augmented reality educational content. *Multimedia Tools and Applications* **78**, 6093–6118 (2019), <https://doi.org/10.1007/s11042-018-6395-5>
- [36] Cortés Rodríguez, F., Dal Peraro, M., Abriata, L.A.: Online tools to easily build virtual molecular models for display in augmented and virtual reality on the web. *Journal of Molecular Graphics and Modelling* **114**, 108164 (2022), <https://doi.org/10.1016/j.jmgm.2022.108164>
- [37] Coughlin, T.: Impact of COVID-19 on the Consumer Electronics Market. *IEEE Consumer Electronics Magazine* **10**, 58–59 (2021), <https://doi.org/10.1109/MCE.2020.3016753>
- [38] Crandall, P.G., Engler III, R.K., Beck, D.E., Killian, S.A., O'Bryan, C.A., Jarvis, N., Clausen, E.: Development of an Augmented Reality Game to Teach Abstract Concepts in Food Chemistry. *Journal of Food Science Education* **14**(1), 18–23 (2015), <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/1541-4329.12048>
- [39] Dar, S.A.: Mobile library initiatives: a new way to revitalize the academic library settings. *Library Hi Tech News* **36**, 15–21 (2019), <https://doi.org/10.1108/LHTN-05-2019-0032>
- [40] Demir, I.: Interactive web-based hydrological simulation system as an education platform. In: Rizzoli, A.E., Quinn, N.W.T., Ames, D.P. (eds.) *Proceedings - 7th International Congress on Environmental Modelling and Software: Bold Visions for Environmental Modeling, iEMSs 2014*, vol. 2, pp. 910–912, International Environmental Modelling and Software Society (2014), <https://doi.org/10.17077/aseenmw2014.1008>
- [41] Dunkel, L., Fernandez-Luque, L., Loche, S., Savage, M.O.: Digital technologies to improve the precision of paediatric growth disorder diagnosis and management. *Growth Hormone and IGF Research* **59**, 101408 (2021), <https://doi.org/10.1016/j.ghir.2021.101408>

- [42] Erçağ, E., Yasakçı, A.: The Perception Scale for the 7E Model-Based Augmented Reality Enriched Computer Course (7EMAGBAÖ): Validity and Reliability Study. *Sustainability* **14**, 12037 (2022), <https://doi.org/10.3390/su141912037>
- [43] Farella, M., Taibi, D., Arrigo, M., Todaro, G., Fulantelli, G., Chiazzese, G.: An Augmented Reality Mobile Learning Experience Based on Treasure Hunt Serious Game. In: Busch, C., Steinicke, M., Friess, R., Wendler, T. (eds.) *Proceedings of the European Conference on e-Learning, ECEL*, pp. 148–154, Academic Conferences and Publishing International Limited (2021), <https://doi.org/10.34190/EEL.21.109>
- [44] Faridi, E., Ghaderian, A., Honarasa, F., Shafie, A.: Next generation of chemistry and biochemistry conference posters: Animation, augmented reality, visitor statistics, and visitors' attention. *Biochemistry and Molecular Biology Education* **49**, 619–624 (2021), <https://doi.org/10.1002/bmb.21520>
- [45] Farra, S., Hodgson, E., Miller, E., Timm, N., Brady, W., Gneuchs, M., Ying, J., Hausfeld, J., Cosgrove, E., Simon, A., Bottomley, M.: Effects of Virtual Reality Simulation on Worker Emergency Evacuation of Neonates. *Disaster Medicine and Public Health Preparedness* **13**, 301–308 (2019), <https://doi.org/10.1017/dmp.2018.58>
- [46] Ferguson, J., Mentzelopoulos, M., Protopsaltis, A., Economou, D.: Small and flexible web based framework for teaching QR and AR mobile learning application development. In: *Proceedings of 2015 International Conference on Interactive Mobile Communication Technologies and Learning, IMCL 2015*, pp. 383–385, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. (2015), <https://doi.org/10.1109/IMCTL.2015.7359624>
- [47] Google: Teachable Machine (2017), URL <https://teachablemachine.withgoogle.com/>
- [48] Google LLC: Face landmark detection guide | MediaPipe | Google for Developers (2023), URL [https://developers.google.com/mediapipe/solutions/vision/face\\_landmarker/](https://developers.google.com/mediapipe/solutions/vision/face_landmarker/)
- [49] Gordon, N., Brayshaw, M., Aljaber, T.: Heuristic Evaluation for Serious Immersive Games and M-instruction. In: Zaphiris, P., Ioannou, A. (eds.) *Learning and Collaboration Technologies, Lecture Notes in Computer Science*, vol. 9753, pp. 310–319, Springer International Publishing, Cham (2016), ISBN 978-3-319-39483-1, [https://doi.org/10.1007/978-3-319-39483-1\\_29](https://doi.org/10.1007/978-3-319-39483-1_29)
- [50] Hai-Jew, S.: Adult Coloring Books as Emotional Salve/Stress Relief, Tactual-Visual Learning: An Analysis from Mass-Scale Social Imagery. In: *Common Visual Art in a Social Digital Age*, pp. 171–186, Nova Science Publishers, Inc. (2022)
- [51] Harun, Tuli, N., Mantri, A.: Experience Fleming's rule in electromagnetism using augmented reality: Analyzing impact on students learning. *Procedia Computer Science* **172**, 660–668 (2020), <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.05.086>

- [52] Hensen, B., Koren, I., Klamma, R., Herrler, A.: An Augmented Reality Framework for Gamified Learning. In: Hancke, G., Spaniol, M., Osathanunkul, K., Unankard, S., Klamma, R. (eds.) *Advances in Web-Based Learning – ICWL 2018*, Lecture Notes in Computer Science, vol. 11007, pp. 67–76, Springer International Publishing, Cham (2018), ISBN 978-3-319-96565-9, [https://doi.org/10.1007/978-3-319-96565-9\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-319-96565-9_7)
- [53] Hoog, T.G., Aufdembrink, L.M., Gaut, N.J., Sung, R.J., Adamala, K.P., Engelhart, A.E.: Rapid deployment of smartphone-based augmented reality tools for field and online education in structural biology. *Biochemistry and Molecular Biology Education* **48**, 448–451 (2020), <https://doi.org/10.1002/bmb.21396>
- [54] Huang, L.: Chemistry Apps on Smartphones and Tablets. In: García-Martínez, J., Serrano-Torregrosa, E. (eds.) *Chemistry Education*, chap. 25, pp. 621–650, John Wiley & Sons, Ltd (2015), ISBN 9783527679300, <https://doi.org/10.1002/9783527679300.ch25>
- [55] Huang, T.C.: Seeing creativity in an augmented experiential learning environment. *Universal Access in the Information Society* **18**, 301–313 (2019), <https://doi.org/10.1007/s10209-017-0592-2>
- [56] Ibanez, M.B., Di-Serio, A., Villaran-Molina, D., Delgado-Kloos, C.: Augmented Reality-Based Simulators as Discovery Learning Tools: An Empirical Study. *IEEE Transactions on Education* **58**, 208–213 (2015), <https://doi.org/10.1109/TE.2014.2379712>
- [57] Ibáñez, M.B., Peláez, J., Kloos, C.D.: Using an Augmented Reality Geolocalized Quiz Game as an Incentive to Overcome Academic Procrastination. In: Auer, M.E., Tsiatsos, T. (eds.) *Mobile Technologies and Applications for the Internet of Things*, *Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol. 909, pp. 175–184, Springer International Publishing, Cham (2019), ISBN 978-3-030-11434-3, [https://doi.org/10.1007/978-3-030-11434-3\\_21](https://doi.org/10.1007/978-3-030-11434-3_21)
- [58] Ibáñez, M., Uriarte Portillo, A., Zatarain Cabada, R., Barrón, M.: Impact of augmented reality technology on academic achievement and motivation of students from public and private Mexican schools. A case study in a middle-school geometry course. *Computers and Education* **145**, 103734 (2020), <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2019.103734>
- [59] Ibáñez, M.B., Di Serio, A., Villarán, D., Delgado Kloos, C.: Experimenting with electromagnetism using augmented reality: Impact on flow student experience and educational effectiveness. *Computers and Education* **71**, 1–13 (2014), <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2013.09.004>
- [60] Jara, C.A., Candelas, F.A., Torres, F.: Internet virtual and remote control interface for robotics education. In: *Developments in Higher Education*, pp. 136–154, Nova Science Publishers, Inc. (2009)
- [61] Jung, K., Nguyen, V.T., Yoo, S.C., Kim, S., Park, S., Currie, M.: Palmito: The last battle of the U.S. Civil war reenacted using augmented reality. *ISPRS International Journal of Geo-Information* **9**, 75 (2020), <https://doi.org/10.3390/ijgi9020075>

- [62] Kang, B., Heo, J., Choi, H.H.S., Lee, K.H.: 2030 Toy Web of the Future. In: Kim, S., Jung, J.W., Kubota, N. (eds.) *Soft Computing in Intelligent Control, Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol. 272, pp. 69–75, Springer International Publishing, Cham (2014), ISBN 978-3-319-05570-1, [https://doi.org/10.1007/978-3-319-05570-1\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-319-05570-1_8)
- [63] Karas, S.I., Grakova, E.V., Balakhonova, M.V., Arzhanik, M.B., Kara-Sal, E.E.: Distance learning in cardiology: The use of multimedia clinical diagnostic tasks. *Russian Journal of Cardiology* **25**, 187–194 (2020), <https://doi.org/10.15829/1560-4071-2020-4116>
- [64] Karayilan, M., McDonald, S.M., Bahnick, A.J., Godwin, K.M., Chan, Y.M., Becker, M.L.: Reassessing Undergraduate Polymer Chemistry Laboratory Experiments for Virtual Learning Environments. *Journal of Chemical Education* **99**, 1877–1889 (2022), <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.1c01259>
- [65] Katika, T., Bolierakis, S.N., Vasilopoulos, E., Antonopoulos, M., Tsimiklis, G., Karaseitanidis, I., Amditis, A.: Coupling AR with Object Detection Neural Networks for End-User Engagement. In: Zachmann, G., Alcañiz Raya, M., Bourdot, P., Marchal, M., Stefanucci, J., Yang, X. (eds.) *Virtual Reality and Mixed Reality, Lecture Notes in Computer Science*, vol. 13484, pp. 135–145, Springer International Publishing, Cham (2022), ISBN 978-3-031-16234-3, [https://doi.org/10.1007/978-3-031-16234-3\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-031-16234-3_8)
- [66] Kazanidis, I., Pellas, N., Christopoulos, A.: A learning analytics conceptual framework for augmented reality-supported educational case studies. *Multimodal Technologies and Interaction* **5**, 9 (2021), <https://doi.org/10.3390/mti5030009>
- [67] Klavins, A.: 9 ideas for creating tech-infused augmented reality T-shirts (2021), URL <https://overlyapp.com/blog/9-ideas-for-creating-tech-infused-augmented-reality-t-shirts/>
- [68] Kobayashi, T., Sasaki, H., Toguchi, A., Mizuno, K.: A discussion on web-based learning contents with the AR technology and its authoring tools to improve students' skills in exercise courses. In: Mohd Ayub, A.F., Kashi-hara, A., Matsui, T., Liu, C.C., Ogata, H., Kong, S.C. (eds.) *Work-In-Progress Poster - Proceedings of the 22nd International Conference on Computers in Education, ICCE 2014*, pp. 34–36, Asia-Pacific Society for Computers in Education (2014)
- [69] Le, H., Nguyen, M.: An Online Platform for Enhancing Learning Experiences with Web-Based Augmented Reality and Pictorial Bar Code. In: Geroimenko, V. (ed.) *Augmented Reality in Education: A New Technology for Teaching and Learning*, pp. 45–57, Springer Series on Cultural Computing, Springer International Publishing, Cham (2020), ISBN 978-3-030-42156-4, [https://doi.org/10.1007/978-3-030-42156-4\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-030-42156-4_3)
- [70] Liu, E., Cai, S., Liu, Z., Liu, C.: *WebART*: Web-based Augmented Reality Learning Resources Authoring Tool and Its User Experience Study among Teachers. *IEEE Transactions on Learning Technologies* **16**, 53–65 (2023), <https://doi.org/10.1109/TLT.2022.3214854>

- [71] Lou, D.: Two fast prototypes of web-based augmented reality enhancement for books. *Library Hi Tech News* **36**, 19–24 (2019), <https://doi.org/10.1108/LHTN-08-2019-0057>
- [72] Lytridis, C., Tsinakos, A., Kazanidis, I.: ARTutor—An augmented reality platform for interactive distance learning. *Education Sciences* **8**, 6 (2018), <https://doi.org/10.3390/educsci8010006>
- [73] Maggi, L.O., Teixeira, J.M.X.N., Junior, J.R.F.E.S., Cajueiro, J.P.C., De Lima, P.V.S.G., De Alencar Bezerra, M.H.R., Melo, G.N.: 3DJPi: An Open-Source Web-Based 3D Simulator for Pololu’s 3Pi Platform. In: *Proceedings - 2019 21st Symposium on Virtual and Augmented Reality, SVR 2019*, pp. 52–58, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. (2019), <https://doi.org/10.1109/SVR.2019.00025>
- [74] Marín, R., Sanz, P.J.: The Human-Machine Interaction through the UJI Telerobotic Training System. In: Hamza, M.H. (ed.) *IASTED International Conference Robotics and Applications, RA 2003*, June 25-27, 2003, Salzburg, Austria, pp. 47–52, IASTED/ACTA Press (2003)
- [75] Marín, R., Sanz, P.J., Del Pobil, A.P.: The UJI Online Robot: An Education and Training Experience. *Autonomous Robots* **15**, 283–297 (2003), <https://doi.org/10.1023/A:1026220621431>
- [76] MDN contributors: *WebGL: 2D and 3D graphics for the web* (2023), URL [https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/API/WebGL\\_API](https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/API/WebGL_API)
- [77] Narman, H.S., Berry, C., Canfield, A., Carpenter, L., Giese, J., Loftus, N., Schrader, I.: Augmented Reality for Teaching Data Structures in Computer Science. In: *2020 IEEE Global Humanitarian Technology Conference, GHTC 2020*, p. 9342932, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. (2020), <https://doi.org/10.1109/GHTC46280.2020.9342932>
- [78] Nemirovsky, D.R., Garcia, A.J., Gupta, P., Shoen, E., Walia, N.: Evaluation of Surgical Improvement of Clinical Knowledge Ops (SICKO), an Interactive Training Platform. *Journal of Digital Imaging* **34**, 1067–1071 (2021), <https://doi.org/10.1007/s10278-021-00482-x>
- [79] ngrok: *Unified Application Delivery Platform for Developers* (2024), URL <https://ngrok.com/>
- [80] ngrok: *Your Authtoken* (2024), URL <https://dashboard.ngrok.com/get-started/your-authtoken>
- [81] Nguyen, M., Le, H., Lai, P.M., Yan, W.Q.: A web-based augmented reality platform using pictorial QR code for educational purposes and beyond. In: Spencer, S.N. (ed.) *Proceedings of the ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology, VRST*, p. 3364793, Association for Computing Machinery (2019), <https://doi.org/10.1145/3359996.3364793>
- [82] Nguyen, V.T., Jung, K., Dang, T.: BlocklyAR: A visual programming interface for creating augmented reality experiences. *Electronics* **9**, 1–20 (2020), <https://doi.org/10.3390/electronics9081205>
- [83] Nguyen, V.T., Jung, K., Yoo, S., Kim, S., Park, S., Currie, M.: Civil war battlefield experience: Historical event simulation using augmented reality technology. In: *Proceedings - 2019 IEEE International Conference on*



- Artificial Intelligence and Virtual Reality, AIVR 2019, pp. 294–297, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. (2019), <https://doi.org/10.1109/AIVR46125.2019.00068>
- [84] Nordin, N., Markom, M.A., Suhaimi, F.A., Ishak, S.: A Web-Based Campus Navigation System with Mobile Augmented Reality Intervention. *Journal of Physics: Conference Series* **1997**, 012038 (2021), <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1997/1/012038>
- [85] Nordin, N., Nordin, N.R.M., Omar, W.: REV-OPOLY: A Study on Educational Board Game with Webbased Augmented Reality. *Asian Journal of University Education* **18**, 81–90 (2022), <https://doi.org/10.24191/ajue.v18i1.17172>
- [86] Proskura, S., Lytvynova, S., Kronida, O., Demeshkant, N.: Mobile Learning Approach as a Supplementary Approach in the Organization of the Studying Process in Educational Institutions. In: Sokolov, O., Zholtkevych, G., Yakovyna, V., Tarasich, Y., Kharchenko, V., Kobets, V., Burov, O., Semerikov, S., Kravtsov, H. (eds.) *Proceedings of the 16th International Conference on ICT in Education, Research and Industrial Applications. Integration, Harmonization and Knowledge Transfer. Volume II: Workshops, Kharkiv, Ukraine, October 06-10, 2020, CEUR Workshop Proceedings*, vol. 2732, pp. 650–664, CEUR-WS.org (2020), URL <https://ceur-ws.org/Vol-2732/20200650.pdf>
- [87] Proskura, S.L., Lytvynova, S.H.: The approaches to Web-based education of computer science bachelors in higher education institutions. *CTE Workshop Proceedings* **7**, 609–625 (Mar 2020), <https://doi.org/10.55056/cte.416>
- [88] Redondo, E., Navarro, I., Sánchez, A., Fonseca, D.: Implementation of Augmented Reality in “3.0 Learning” Methodology: Case Studies with Students of Architecture Degree. In: Pătruț, B., Pătruț, M., Cmeciu, C. (eds.) *Social Media and the New Academic Environment: Pedagogical Challenges*, pp. 391–413, IGI Global, Hershey, PA (2013), <https://doi.org/10.4018/978-1-4666-2851-9.ch019>
- [89] Rollo, M.E., Aguiar, E.J., Williams, R.L., Wynne, K., Kriss, M., Callister, R., Collins, C.E.: eHealth technologies to support nutrition and physical activity behaviors in diabetes self-management. *Diabetes, Metabolic Syndrome and Obesity: Targets and Therapy* **9**, 381–390 (2016), <https://doi.org/10.2147/DMSO.S95247>
- [90] Ryan, G., Murphy, J., Higgins, M., McAuliffe, F., Mangina, E.: Work-in-Progress-Development of a Virtual Reality Learning Environment: VR Baby. In: Economou, D., Klippel, A., Dodds, H., Pena-Rios, A., Lee, M.J.W., Beck, D., Pirker, J., Dengel, A., Peres, T.M., Richter, J. (eds.) *Proceedings of 6th International Conference of the Immersive Learning Research Network, iLRN 2020*, pp. 312–315, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. (2020), <https://doi.org/10.23919/iLRN47897.2020.9155203>
- [91] Rønningsbakk, L., Wu, T.T., Sandnes, F.E., Huang, Y.M. (eds.): *Innovative Technologies and Learning: Second International Conference, ICITL*

- 2019, Tromsø, Norway, December 2–5, 2019, Proceedings, Lecture Notes in Computer Science, vol. 11937. Springer International Publishing (2019), ISBN 9783030353438, <https://doi.org/10.1007/978-3-030-35343-8>
- [92] Samat, C., Chaijaroen, S.: Design and Development of Constructivist Augmented Reality (AR) Book Enhancing Analytical Thinking in Computer Classroom. In: Rønningsbakk, L., Wu, T.T., Sandnes, F.E., Huang, Y.M. (eds.) Innovative Technologies and Learning, Lecture Notes in Computer Science, vol. 11937, pp. 175–183, Springer International Publishing, Cham (2019), ISBN 978-3-030-35343-8, [https://doi.org/10.1007/978-3-030-35343-8\\_19](https://doi.org/10.1007/978-3-030-35343-8_19)
- [93] Semerikov, S.O., Mintii, M.M., Mintii, I.S.: Review of the course “Development of Virtual and Augmented Reality Software” for STEM teachers: implementation results and improvement potentials. In: Lytvynova, S.H., Semerikov, S.O. (eds.) Proceedings of the 4th International Workshop on Augmented Reality in Education (AREdu 2021), Kryvyi Rih, Ukraine, May 11, 2021, CEUR Workshop Proceedings, vol. 2898, pp. 159–177, CEUR-WS.org (2021), URL <http://ceur-ws.org/Vol-2898/paper09.pdf>
- [94] Sendari, S., Wibawanto, S., Jasmine, J., Jiono, M., Puspitasari, P., Diantoro, M., Nur, H.: Integrating Robo-PEM with AR Application for Introducing Fuel Cell Implementation. In: 7th International Conference on Electrical, Electronics and Information Engineering: Technological Breakthrough for Greater New Life, ICEEIE 2021, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. (2021), <https://doi.org/10.1109/ICEEIE52663.2021.9616683>
- [95] Sepasgozar, S.M.E.: Digital twin and web-based virtual gaming technologies for online education: A case of construction management and engineering. Applied Sciences **10**, 4678 (2020), <https://doi.org/10.3390/app10134678>
- [96] Sharkey, T., Twomey, R., Eguchi, A., Sweet, M., Wu, Y.C.: Need Finding for an Embodied Coding Platform: Educators’ Practices and Perspectives. In: Cukurova, M., Rummel, N., Gillet, D., McLaren, B., Uhomobhi, J. (eds.) International Conference on Computer Supported Education, CSEDU - Proceedings, vol. 1, pp. 216–227, Science and Technology Publications, Lda (2022), <https://doi.org/10.5220/0011000200003182>
- [97] Sharp, K., McCorvie, M., Wagner, M.: Sharing Hidden Histories: The XRchaeology at Miller Grove, a Free African American Community in Southern Illinois. Journal of African Diaspora Archaeology and Heritage **12**(1), 5–31 (2023), <https://doi.org/10.1080/21619441.2021.1902706>
- [98] Shepiliev, D.S., Modlo, Y.O., Yechkalo, Y.V., Tkachuk, V.V., Mintii, M.M., Mintii, I.S., Markova, O.M., Selivanova, T.V., Drashko, O.M., Kalinichenko, O.O., Vakaliuk, T.A., Osadchyi, V.V., Semerikov, S.O.: WebAR development tools: An overview. CEUR Workshop Proceedings **2832**, 84–93 (2020), URL <http://ceur-ws.org/Vol-2832/paper12.pdf>
- [99] Shepiliev, D.S., Semerikov, S.O., Yechkalo, Y.V., Tkachuk, V.V., Markova, O.M., Modlo, Y.O., Mintii, I.S., Mintii, M.M., Selivanova, T.V.,

- Maksyshko, N.K., Vakaliuk, T.A., Osadchyi, V.V., Tarasenko, R.O., Amelina, S.M., Kiv, A.E.: Development of career guidance quests using WebAR. *Journal of Physics: Conference Series* **1840**(1), 012028 (mar 2021), <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1840/1/012028>
- [100] Smith, E., McRae, K., Semple, G., Welsh, H., Evans, D., Blackwell, P.: Enhancing Vocational Training in the Post-COVID Era through Mobile Mixed Reality. *Sustainability* **13**, 6144 (2021), <https://doi.org/10.3390/su13116144>
- [101] Spasova, N., Ivanova, M.: Towards augmented reality technology in CAD/CAM systems and engineering education. In: Roceanu, I. (ed.) *eLearning and Software for Education Conference*, pp. 496–503, National Defence University - Carol I Printing House (2020), <https://doi.org/10.12753/2066-026X-20-151>
- [102] Syrovatskyi, O.V., Semerikov, S.O., Modlo, Y.O., Yechkalo, Y.V., Zelinska, S.O.: Augmented reality software design for educational purposes. *CEUR Workshop Proceedings* **2292**, 193–225 (2018), ISSN 16130073, URL <http://ceur-ws.org/Vol-2292/paper20.pdf>
- [103] Tennakoon, D., Usmani, A.U., Usman, M., Vasileiou, A., Latchaev, S., Baljko, M., Khan, U.T., Perras, M.A., Jadidi, M.: Teaching Earth Systems Beyond the Classroom: Developing a Mixed Reality (XR) Sandbox. In: *ASEE Annual Conference and Exposition, Conference Proceedings*, American Society for Engineering Education (2022)
- [104] Thabvithorn, C., Samat, C.: Development of Web-Based Learning with Augmented Reality (AR) to Promote Analytical Thinking on Computational Thinking for High School. In: Huang, Y.M., Cheng, S.C., Barroso, J., Sandnes, F.E. (eds.) *Innovative Technologies and Learning, Lecture Notes in Computer Science*, vol. 13449, pp. 125–133, Springer International Publishing, Cham (2022), ISBN 978-3-031-15273-3, [https://doi.org/10.1007/978-3-031-15273-3\\_14](https://doi.org/10.1007/978-3-031-15273-3_14)
- [105] Tkachuk, V.V., Semerikov, S.O., Yechkalo, Y.V., Markova, O.M., Mintonii, M.M.: WebAR development tools: comparative analysis. *Physical and Mathematical Education* (2(24)) (2020), <https://doi.org/10.31110/2413-1571-2020-024-2-021>
- [106] Toguchi, A., Sasaki, H., Mizuno, K., Shikoda, A.: Build a prototype of new e-Learning contents by using the AR technology. In: *IMSCI 2011 - 5th International Multi-Conference on Society, Cybernetics and Informatics, Proceedings*, vol. 1, pp. 261–264, International Institute of Informatics and Systemics, IIIS (2011)
- [107] Toguchi, A., Sasaki, H., Mizuno, K., Shikoda, A.: Development of new e-Learning contents for improvement of laboratory courses by using the AR technology. In: *IMSCI 2012 - 6th International Multi-Conference on Society, Cybernetics and Informatics, Proceedings*, pp. 189–193, International Institute of Informatics and Systemics, IIIS (2012)
- [108] TrackJS LLC: Remote JavaScript Debugger - RemoteJS (2022), URL <https://remotejs.com/>

- [109] Tsiatsos, T., Auer, M.E. (eds.): 11th International Conference on Interactive Mobile Communication Technologies and Learning, IMCL2017, Advances in Intelligent Systems and Computing, vol. 725. Springer Verlag (2018), <https://doi.org/10.1007/978-3-319-75175-7>
- [110] Tuli, N., Mantri, A., Sharma, S.: Impact of augmented reality tabletop learning environment on learning and motivation of kindergarten kids. AIP Conference Proceedings **2357**, 040017 (2022), <https://doi.org/10.1063/5.0080600>
- [111] Turner, F., Welch, I.: The mixed reality toolkit as the next step in the mass customization co-design experience. International Journal of Industrial Engineering and Management **10**, 191–199 (2019), <https://doi.org/10.24867/IJIEM-2019-2-239>
- [112] Vahabzadeh, A., Keshav, N.U., Salisbury, J.P., Sahin, N.T.: Improvement of Attention-Deficit/Hyperactivity Disorder Symptoms in School-Aged Children, Adolescents, and Young Adults With Autism via a Digital Smartglasses-Based Socioemotional Coaching Aid: Short-Term, Uncontrolled Pilot Study. JMIR Mental Health **5**, e25 (2018), <https://doi.org/10.2196/mental.9631>
- [113] Villarán, D., Ibáñez, M.B., Kloos, C.D.: Augmented Reality-Based Simulations Embedded in Problem Based Learning Courses. In: Conole, G., Klobučar, T., Rensing, C., Konert, J., Lavoué, E. (eds.) Design for Teaching and Learning in a Networked World, Lecture Notes in Computer Science, vol. 9307, pp. 540–543, Springer International Publishing, Cham (2015), ISBN 978-3-319-24258-3, [https://doi.org/10.1007/978-3-319-24258-3\\_55](https://doi.org/10.1007/978-3-319-24258-3_55)
- [114] Wang, I., Nguyen, M., Le, H., Yan, W., Hooper, S.: Enhancing Visualisation of Anatomical Presentation and Education Using Marker-based Augmented Reality Technology on Web-based Platform. In: Proceedings of AVSS 2018 - 2018 15th IEEE International Conference on Advanced Video and Signal-Based Surveillance, p. 8639147, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. (2019), <https://doi.org/10.1109/AVSS.2018.8639147>
- [115] Westwood, J.D., Westwood, S.W., Felländer-Tsai, L., Fidopiastis, C.M., Liu, A., Senger, S., Vosburgh, K.G. (eds.): Medicine Meets Virtual Reality 22 - NextMed, MMVR 2016, Los Angeles, California, USA, April 7-9, 2016, Studies in Health Technology and Informatics, vol. 220. IOS Press (2016), ISBN 978-1-61499-624-8, URL <http://ebooks.iospress.nl/volume/medicine-meets-virtual-reality-22-nextmed-mmvr22>
- [116] Wongchiranuwat, S., Samat, C.: Synthesis of theoretical framework for augmented reality learning environment to promote creative thinking on topic implementation of graphic design for grade 9 students. In: Wong, S.L., Barrera, A.G., Mitsuhara, H., Biswas, G., Jia, J., Yang, J.C., Banawan, M.P., Demirbilek, M., Gaydos, M., Lin, C.P., Shon, J.G., Iyer, S., Gulz, A., Holden, C., Kessler, G., Rodrigo, M.M.T., Sengupta, P., Taalas, P., Chen, W., Murthy, S., Kim, B., Ochoa, X., Sun, D., Baloi-an, N., Hoel, T., Hoppe, U., Hsu, T.C., Kukulska-Hulme, A., Chu, H.C.,

- Gu, X., Chen, W., Huang, J.S., Jan, M.F., Wong, L.H., Yin, C. (eds.) ICCE 2016 - 24th International Conference on Computers in Education: Think Global Act Local - Main Conference Proceedings, pp. 639–641, Asia-Pacific Society for Computers in Education (2016), URL <https://files.eric.ed.gov/fulltext/EJ1211500.pdf>
- [117] Yang, S., Mei, B., Yue, X.: Mobile Augmented Reality Assisted Chemical Education: Insights from Elements 4D. *Journal of Chemical Education* **95**, 1060–1062 (2018), <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.8b00017>
- [118] Yuen, H.: HiuKim Yuen (2023), URL <https://www.youtube.com/channel/UC-JyA1Z1-p0wgxj5WEX56wg/featured>
- [119] Yuen, H.: MindAR (2023), URL <https://hiukim.github.io/mind-ar-js-doc/>
- [120] Zatarain-Cabada, R., Barrón-Estrada, M., Cárdenas-Sainz, B.A., Chavez-Echeagaray, M.E.: Experiences of web-based extended reality technologies for physics education. *Computer Applications in Engineering Education* **31**(1), 63–82 (2023), <https://doi.org/10.1002/cae.22571>
- [121] Zitzmann, N.U., Matthisson, L., Ohla, H., Joda, T.: Digital undergraduate education in dentistry: A systematic review. *International Journal of Environmental Research and Public Health* **17**, 3269 (2020), <https://doi.org/10.3390/ijerph17093269>