

<https://doi.org/10.31891/2219-9365-2023-75-15>

УДК 004

ЛИСЕНКО Максим

Державний університет «Житомирська політехніка»

kkn_lms@ztu.edu.ua

ОГЛЯД СУЧАСНИХ ІНСТРУМЕНТІВ ТА ПІДХОДІВ ДО РОЗБОККИ AR-ДОДАТКІВ

Дана стаття присвячена дослідженню технології доповненої реальності (AR) та її впливу на різні сфери людської діяльності. У вступі визначено поняття AR як інноваційної технології, яка розширює сприйняття реального світу за допомогою накладання на нього віртуальних об'єктів.

У розділі "Варіанти архітектури доповненої реальності" розглянуто різні підходи до організації AR-систем. Виділені хмарна архітектура, архітектура на основі межових обчислень (MEC), локальна архітектура та гібридна архітектура, кожна з яких має свої особливості та переваги.

Розділ "Інструменти розробника" розглядає ключові засоби, які використовують розробники для створення AR-додатків. Детально розглянуто ігрові двигуни та набори розробки програмного забезпечення (SDK), які допомагають реалізувати AR-проекти з різними функціональними можливостями.

У розділі "Сфери застосування AR" обговорено широкий спектр галузей, де застосовується технологія доповненої реальності. Розглянуто її роль у маркетингу та рекламі, освіті, медицині, а також в іграх та розвагах. Підкреслено потенціал AR для покращення навчання, медичної діагностики, рекламних кампаній та ігрового досвіду.

У висновках підсумовано основні висновки статті. Підкреслено значущість технології доповненої реальності для сучасного суспільства та визначено перспективи її подальшого розвитку. Вказано на необхідність подальших досліджень та розробки для вирішення викликів та оптимізації функціональності AR-систем.

Ключові слова: доповнена реальність, SDK, хмара, MEC

LYSENKO Maksym
Zhytomyr Polytechnic State University

OVERVIEW OF MODERN TOOLS AND APPROACHES TO THE DEVELOPMENT OF AR APPLICATIONS

This article is devoted to the research of augmented reality (AR) technology and its impact on various spheres of human activity. In the introduction, the concept of AR is defined as an innovative technology that expands the perception of the real world by overlaying virtual objects on it.

In the section "Variants of Augmented Reality Architecture" different approaches to the organization of AR systems are considered. Cloud architecture, edge computing (MEC) architecture, local architecture and hybrid architecture are highlighted, each with its own characteristics and advantages.

The Developer Tools section covers the key tools that developers use to create AR applications. The game engines and software development kits (SDKs) that help implement AR projects with various functionalities are covered in detail.

The section "Applications of AR" discusses a wide range of industries where augmented reality technology is used. Its role in marketing and advertising, education, medicine, and games and entertainment is examined. The potential of AR to improve learning, medical diagnostics, advertising campaigns and gaming experiences is highlighted.

The main conclusions of the article are summarized in the conclusions. The importance of augmented reality technology for modern society is emphasized and the prospects for its further development are determined. The need for further research and development to solve challenges and optimize the functionality of AR systems is indicated.

Key words: Augmented reality, SDK, Cloud, MEC

Постановка проблеми у загальному вигляді

та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Сучасна глобальна дійсність, набуваючи прогресивних рис, невинно піддається впливу інноваційних технологій. Однією з таких передових досягнень є технологія доповненої реальності (AR), яка на дотичному рівні зливає справжній фізичний світ з іммерсивною віртуальною сферою, що сприяє появі новаторських парадигм у сферах освіти, розваг і підприємництва. Доповнена реальність, безперечно набуває обширного попиту в низці життєвих сфер, що відбувається не випадково, оскільки її можливості дають змогу досягати вражаючих результатів у різноманітних галузях. Приведений у даній науковій статті аналіз відображає сучасний етап розвитку технології доповненої реальності.

1. Визначення технології доповненої реальності:

Технологія Доповненої Реальності (ДР) сприяє покращенню сприйняття об'єктів фізичного світу за допомогою включення додаткової інформації до фактичного спостереження користувача. У загальному розумінні, система ДР реалізує проекцію комп'ютерно створених розширень на реальні об'єкти, що сполучає фізичні та віртуальні компоненти для синхронної взаємодії [1]. Ця синергія дозволяє реальним та віртуальним об'єктам одночасно, надаючи користувачеві адекватну глибину сприйняття. Крім візуальних додатків, конкретні ДР пристрої підтримують голосовий ввід, аудіовивід та тактильний відгук для

збагачення додатків та підвищення їх інформативності. Таким чином, ДР доповнює оточуюче середовище користувача додатковою інформацією, аналізуючи його, виділяючи ключові деталі сцени та доповнюючи їх додатковими знаннями із баз даних [2]. Загалом, систему ДР характеризують наступні три основні риси [3].

- Поєднує реальні та віртуальні об'єкти в реальному середовищі;
- Працює в інтерактивному режимі та в реальному часі;
- Реєструє (вирівнює) реальні та віртуальні об'єкти один з одним.

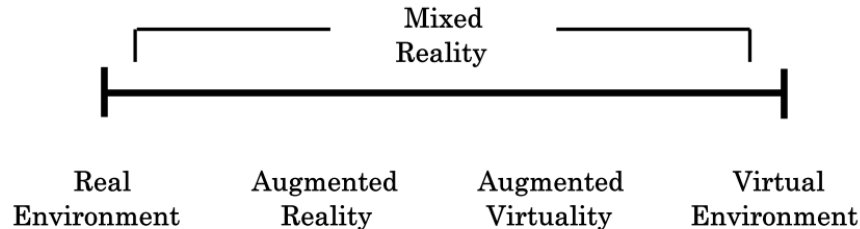


Рис. 1. Континуум реальності-віртуальності Мілграма та Кішіно [4]

Вельми важливим є розуміння різниці між технологією доповненої реальності (AR) та віртуальною реальністю (VR), а також їх взаємного розташування на континуумі від реального до віртуального середовища, відміченого в публікації [4]. AR є компонентом Мішаної Реальності (MR), де фізичне оточення залишається реальним, однак це оточення поповнюється додатковими об'єктами та інформацією. Натомість, як у розширеній віртуальності, так і у віртуальному середовищі/VR, навколишній контекст є віртуальним. На Рисунку 1 відображено зображення континууму від реального до віртуального.

Узагальнюючи, додаток доповненої реальності включає в себе компоненти вхідних даних, процесу обробки і генерації вихідних результатів.

- Вхідні дані: включають в себе різноманітні дані з датчиків пристрою або з інших супутніх пристроїв.
- Процес обробки: включає набір функцій, які здійснюють обчислення для формування вихідних даних, які будуть відображені на екрані мобільного пристрою.
- Вихідні результати: передбачають дію розширення, яка включає проектування віртуального вмісту на поточний сприйнятий образ реального оточення.

Різнманітні категорії засобів введення включають камери, мікрофони, гіроскопи, системи глобального позиціонування (GPS) та інші аналогічні апаратні компоненти, що також враховують портативні пристрої, що складаються з низки вбудованих сенсорів [5], у тому числі таких як сенсорне введення [6].

Сам додаток доповненої реальності може здійснювати обробку вхідного потоку або передавати його окремому об'єкту, яким може бути хмарний сервер, сервер обчислень на краю мережі (MEC) або сервер туманного обчислення.

На підставі розгортання функцій обробки визначаються різноманітні архітектури технології доповненої реальності. Ряд методів обробки, які зветься відстеженням, рендерінгом, взаємодією, калібруванням та реєстрацією, виконують роль важливих складових для досягнення корисного взаємодійного досвіду з технологією AR.

Відстеження сприяє визначенню інформації про актуальне положення з метою забезпечення зорієнтованості віртуального контенту відносно фізичних об'єктів. Методи відстеження можуть бути умовно розділені на сенсорні, візуальні та гібридні підходи [7]. Системи відстеження, що базуються на сенсорах, розраховують на оптичні, акустичні, механічні та магнітні датчики [8], тоді як системи відстеження на основі зору використовують вхід від камери та алгоритми обробки зображень для визначення просторового розташування відносно реальних об'єктів [9]. Відстеження на основі зору додатково підрозділяється на відстеження з використанням маркерів [10] та без маркерів [56] (також відоме як відстеження природних об'єктів), де "маркер" визначає зображення або візуальний атрибут реального об'єкта, що надає йому унікальну характеристику. "Маркери" можуть бути захоплені камерою AR та розпізнані програмним забезпеченням AR [12]. В інтуїтивний спосіб гібридні системи відстеження поєднують різні методи відстеження з метою забезпечити більш надійний процес визначення положення, наприклад, система відстеження, яка об'єднує в собі GPS, інерційний та комп'ютерний зір [13].

Техніка візуалізації визначає цифровий зміст, що активується при розпізнаванні певного об'єкта. Після розпізнавання об'єкта функція візуалізації генерує відповідний зміст для відображення. Процес візуалізації вимагає значних обчислювальних зусиль через особливості сучасних доповнених програм реального часу. Тому рекомендується спрямувати візуалізацію на потужні обчислювальні платформи, такі як хмара.

Методи калібрування та реєстрації забезпечують точну відповідність між реальним світом та віртуальними об'єктами, коли точка огляду користувача є постійною, тоді як методи взаємодії дефінують способи, за допомогою яких користувач може взаємодіяти з віртуальним вмістом AR [7]. Інтерактивна взаємодія передбачає використання різних інтерфейсів, таких як акустичний, матеріальний та текстовий, для взаємодії з віртуальними об'єктами [14].

AR-дисплеї надають користувачеві візуальний результат. Основні види технологій відображення для AR включають прозорі дисплеї, змонтовані на голові (HMD), проєкційні дисплеї [15], [16] і портативні дисплеї [17].

Прозорі HMD можуть бути розділені на дві основні категорії: Optical See Through (OST), яка дозволяє користувачам спостерігати реальний світ з відображеною графікою через природний погляд [18], і Video See-Through (VST), де користувач може спостерігати відео зображення реального світу з накладеною графікою [19]. Крім візуального відтворення, аудіовідтворення та тактильний зворотній зв'язок також можуть бути реалізовані за допомогою окремих AR-пристроїв.

Незважаючи на те, що концепція доповненої реальності наявна протягом більш ніж двох десятиліть, останні досягнення в технологічному просторі перетворили цю концепцію на активну реалізацію, яка сприяє покращенню звичайного життя користувачів. Ці технологічні прориви включають в себе комп'ютерне обладнання та програмне забезпечення, бездротовий зв'язок і мережу, дисплеї та носимі пристрої [20].

В останні роки AR здобула популярність у багатьох різних галузях, таких як промисловість, охорона здоров'я, розваги, освіта та навчання [21]. Розширення можливостей Доповненої Реальності для мобільних пристроїв, таких як звичайні мобільні телефони та портативні пристрої, надає додаткові переваги цій технології [22]–[25]. Пристрій Google Glass [26], який вперше надійшов у комерційний обіг у 2014 році, представив покращений користувацький досвід, спрямований на майбутні можливості AR [27], [28]. Відтоді ця технологія продовжує розвиватись і стає доступною для широкого кола мобільних користувачів завдяки безлічі програм, таких як Pokemon Go [29], Google Lens [30], а також новітніх носимих пристроїв, як, наприклад, Microsoft HoloLens [31].

Обмежена тривалість роботи акумуляторів та обмежена обчислювальна потужність пристроїв накладають обмеження на можливості впровадження мобільної доповненої реальності. Вирішення цього питання полягає у віднесенні важких обчислювальних завдань на віддалені сервери, такі як хмарові інфраструктури [32]–[35], що дозволяє досягти життєздатних рішень. Проте, віддалене виконання завдань призводить до виникнення транспортних затримок, що є неприйнятним для додатків AR, які вимагають мінімальних затримок.

Концепція Multi-access Edge Computing (MEC) спрямована на наближення обчислювальних процесів до кінцевих пристроїв, що зменшує затримки, пов'язані з виконанням завдань на віддалених хмарових серверах, та сприяє спрощенню оптимізації завдань з критичними затримками [36]–[39]. Використання мобільних периферійних обчислень відкриває можливості здійснення обробки на найближчих базових станціях, створюючи перспективний підхід до вирішення завдань з розподіленими обчисленнями AR за допомогою бездротових радіомереж [40]. Передбачена майбутнім розвитком Доповненої Реальності ставить високі вимоги до бездротового з'єднання, яке може бути реалізоване завдяки складним системам зв'язку, такими як мережі 5G.

2. Варіанти архітектури доповненої реальності

Даний розділ презентує можливі варіанти мережевої архітектури для існуючих і перспективних систем Доповненої Реальності (AR). Високі вимоги до сучасних і майбутніх додатків Доповненої Реальності та постійна еволюція різних технологій об'єднуються для створення різних архітектурних сценаріїв, включаючи хмарну, краєву, локалізовану та гібридну архітектури. Вибір конкретної архітектури залежить від розміщення основних обчислювальних процесів AR: на віддалених хмарних серверах, на периферійних серверах, на локальних серверах, на клієнтських AR-пристроях або у поєднанні цих підходів для відповідності вимогам конкретних програмних рішень.

2.1. Хмарна архітектура

В рамках хмарної архітектури функціонування системи доповненої реальності здійснюється на основі клієнт-серверної моделі. Мобільні пристрої доповненої реальності, які виконують локальні програми, прийнято називати клієнтами. Сервер AR, що є центральною обчислювальною одиницею, розташований у хмаровому середовищі та надає доступ до своїх ресурсів з будь-якого місця завдяки мережі Інтернет. Клієнтські пристрої захоплюють зображення, здійснюють базову обробку, надсилають ці дані на сервер і, в свою чергу, відображають отримані розширення, які надсилаються з сервера. Обчислювально більш важкі завдання обробки зображень виконуються на хмарному AR-сервері [41].

2.2. Архітектура на основі межевих обчислень (MEC)

Деякі сценарії використання доповненої реальності вимагають низької затримки, яка не гарантується хмарною архітектурою. Межове обчислення є найбільш прийнятною обчислювальною парадигмою [43], яка відповідає цим сценаріям використання. Межова архітектура також діє як клієнт-серверна модель, де сервер доповненої реальності розташований на межі мережі. Термінальні пристрої AR

виконують ті ж самі обов'язки, що і в хмарній архітектурі. Сервер AR здійснює інтенсивні обчислювальні завдання, такі як попередня обробка, відстеження AR і рендеринг доповнень. Основна мета підключення до Інтернету полягає в спрощенні таких завдань, як оновлення програмного забезпечення пристрою, але не включення його в основний процес обробки AR, який вимагає низької затримки. Подібно до хмарної архітектури, легкі та енергоефективні пристрої Доповненої Реальності можна використовувати з межевою архітектурою, завдяки розвантаженню обчислень. Проте архітектура, ґрунтована на межах, краще підходить для обслуговування програм з критичною потребою в низьких затримках.

2.3. Локальна архітектура

У даній статті наведено два альтернативних варіанти локальної архітектури. Перший варіант передбачає розгортання AR-сервера в безпосередній близькості від AR-пристроїв, ідеально - в одному місці з ними. При цьому AR-пристрої та AR-сервер будуть підключені до найближчої базової станції, імовірно, за допомогою бездротових з'єднань. Функції обчислення, які вимагають великих ресурсів, здійснює сервер, тоді як AR-пристрої виконують лише обмежений набір необхідних обробок.

Також ми розглядаємо інший сценарій, коли AR-сервер може бути відсутнім. У такому випадку AR-пристрій виконує ряд обробок, включаючи захоплення зображення, реалізацію AR-відстеження, створення доповненого візуального змісту та його відображення на екрані. Тут AR-пристрій виступає як самостійна система, так як весь обчислювальний процес, необхідний для роботи додатка, здійснюється безпосередньо на пристрої. Інтернет-з'єднання залишається необхідним для керування, резервного копіювання та оновлення програмного забезпечення.

2.4. Гібридна архітектура

Гібридна архітектура мережі доповненої реальності включає в себе хмарний вузол, крайовий вузол і клієнтську мережу докупи. Для досягнення інтерактивних функцій доповненої реальності, які важливі з точки зору затримки, рекомендується розміщувати їх на крайовому вузлі, оскільки загальна затримка мережі безпосередньо залежить від довжини шляху сигналу та кількості проміжних елементів маршрутизації та комутації. Навпаки, програми, які не потребують надзвичайно низької затримки, краще розміщувати на хмарному вузлі. Функції контролю та управління можуть бути виконані як на хмарному вузлі, так і на крайовому вузлі. Серед цих функцій відзначаються сигналізація площини управління, обробка потоку послуг, планування політики та створення можливостей, а також робота та технічне обслуговування мережі, керування вузлом [42]. Ці функції не безпосередньо впливають на інтерактивний характер AR-досвіду. Крайовий вузол відповідає за функції у площині користувача, які забезпечують вимоги додатків доповненої реальності з надзвичайно низькою затримкою.

Ієрархічна архітектура для обслуговування додатків доповненої реальності [44], включає в себе крайовий рівень, розташований між звичайним рівнем користувача та хмарним рівнем. Рівень користувача охоплює низку пристроїв доповненої реальності, обладнаних бездротовими з'єднаннями, які підключаються до крайового рівня. Крайовий рівень, в свою чергу, забезпечує підтримку бази даних та значних обчислювальних ресурсів. Граничний рівень складається з трьох модулів, відомих як комунікаційний блок, операційна платформа та віртуалізований контролер. Ці модулі взаємодіють для досягнення конвергенції в областях зв'язку, обчислень та керування, що підтверджується специфікацією згаданої архітектури.

Визначення найбільш відповідної архітектури для системи доповненої реальності (AR) прямо залежить від вимог, поставлених перед додатками. Можливість використання локалізованої архітектури не є оптимальною варіацією для багатьох можливих сценаріїв застосування та її широке застосування не зазначено в науковій літературі. Це обумовлено двома причинами. Однією з головних причин є необхідність забезпечити складну обробку основних функцій, для забезпечення максимально зручного взаємодії з системою доповненої реальності. Вимога до такої високої обчислювальної потужності спричинює необхідність більш інтенсивного споживання обчислювальних ресурсів, що в свою чергу може спричинити швидке розрядження батарей мобільних пристроїв. Батареї в пристроях доповненої реальності мають обмежену ємність, а часті перезарядження можуть стати не зручними та обтяжливими для користувачів. По-друге, обмеження на рівні мережі поступово зменшуються, що створює сприятливий контекст для досягнення низьких затримок у зв'язку. Високошвидкісний доступ до Інтернету відкриває можливості для реалізації обчислювального розгортання як життєздатної альтернативи. Тому, хмарні архітектури, і особливо архітектури на основі межі (edge), виявляються відповідними для забезпечення потрібних низьких затримок у зв'язку для додатків AR.

3. Інструменти розробника

3.1 Ігрові двигуни

Ігровий двигун є спеціалізованим фреймворком, розробленим для створення відеоігор, що включає набір специфічних бібліотек та пакетів для ефективною реалізації ігрового досвіду [46], [47], [48]. Ігрові двигуни складаються з трьох ключових компонентів:

- Механізм візуалізації;
- Фізичний рушій;
- Математичний апарат.

Ці компоненти взаємодіють між собою, надаючи можливість персонажам взаємодіяти, виконувати рухи та здійснювати стрибки. Із застосуванням цих двигунів можливо втілити різноманітні аспекти, такі як генерація тіней або створення декорацій в межах ігрового оточення. Структура компонентів ігрового двигуна наведена на рисунку 2.

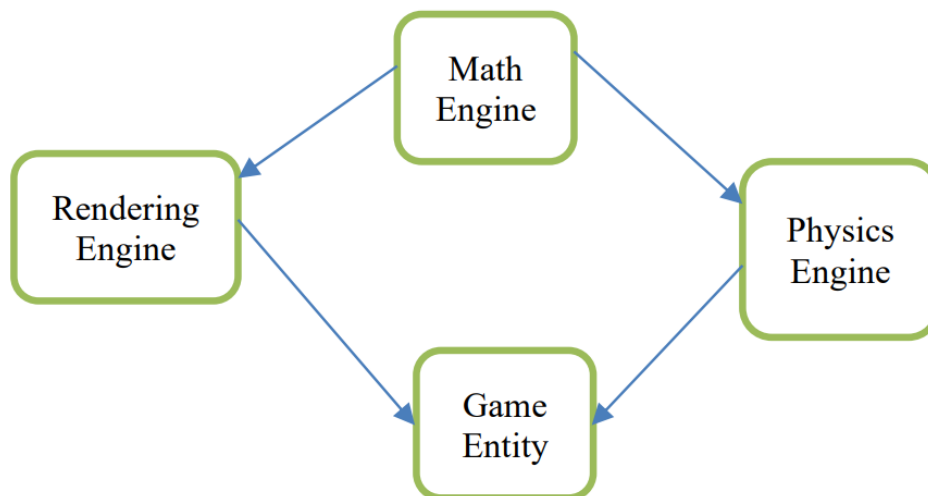


Рис. 2. Компоненти ігрового двигуна

3.2 Набори розробки програмного забезпечення (SDK)

Набуваючи широкого застосування, SDK практично використовується в усіх відомих ігрових рушіях, оскільки це забезпечує розробників можливість використовувати вже існуючий набір інструментів для розробки програмного забезпечення, спрямованого на конкретні платформи [45]. Цей компонент становить основну складову багатьох програм, ігор та додатків. Він охоплює не лише структуру, але також містить специфічні дані щодо усіх доступних бібліотек, деталі тестування, налагодження, інформацію про датчики та контролери, які використовуються у межах даного SDK [49]. До нього також включено ретельно вивчену документацію, що сприяє збору інформації про те, як вирішувати будь-які завдання або розробляти додатки. Функціонування SDK в ігровому контексті проілюстроване на рисунку 3.

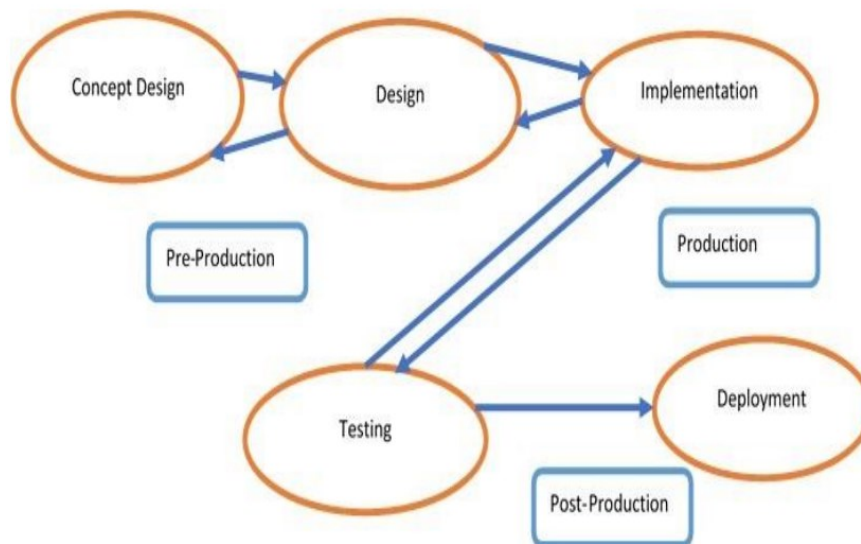


Рис. 3. Робота SDK в ігровому двигуні

Багато компонентів в програмах доповненої реальності (AR) спрощуються завдяки використанню пакетів SDK AR, що включають в себе функції візуалізації AR, відстеження та розпізнавання вмісту. Компонент ідентифікації можна розглядати як "розум" додатків AR, відстеження функціонує як "око" реального досвіду, а візуалізація виконує роль складових уявлень у сценаріях реального життя. Деякі широкі категорії, де впроваджені SDK AR, включають браузері доповненої реальності на основі маркерів та функції, пов'язані з місцезнаходженням та відстеженням [46]. Таблиця 1 демонструє відмінності між SDK доповненої реальності та ігровими двигунами відповідно. Таблиця 2 демонструє порівняння різних SDK AR.

Таблиця 1.

Різниця між AR SDK та ігровими двигунами [13,14,15]

№	AR SDK	Ігрові двигуни AR
1	Розробники розробляють цифрові елементи, що повністю інтегровані в реальний світ.	Розробникам надається фундамент для формування відео з доповненою реальністю.
2	Функціональні можливості, такі як трекінг об'єктів, одночасна візуальна локалізація, а також відображення та розпізнавання зображень, включені до складу SDK.	Розробникам надається можливість створювати та керувати тривимірними персонажами з метою їх взаємодії з реальним оточенням.
3	Надають змогу розробляти персоналізовані програми доповненої реальності з реалістичним взаємодосвідом.	Забезпечують можливість розробки персоналізованих ігор доповненої реальності з використанням досвіду доповненої реальності.
4	Існуючі програми доповненої реальності підлягають редагуванню.	Доступна можливість створення та редагування програм доповненої реальності з використанням тривимірних моделей.
5	Включені в структуру обладнання та операційну систему, що реалізує відображення доповненої реальності.	Впроваджені у структуру обладнання, такого як мобільні телефони, що підтримують функціонування доповненої реальності.
6	Підтримуються різними платформами, що забезпечує більшу варіативність та адаптивність.	API (інтерфейс прикладного програмування) взаємодіє з операційними системами доповненої реальності для їхньої ефективної роботи.

Таблиця 2.

Різниця між SDK доповненої реальності

№	SDK	Ліцензія	Підтримка Unity 3D	Платформа, що підтримується	Відстеження об'єктів (3D)
1	EasyAR	Безкоштовна, комерційна	Так	Mac, Linux, Windows	Так
2	Vuforia	Безкоштовна, комерційна	Так	Mac, Windows	Так
3	ARmedia	Безкоштовна, комерційна	Так	Mac, Linux, Windows	Так
4	Kudan	Безкоштовна, комерційна	Так	iOS, Android	Так
5	Metaio	Безкоштовна, комерційна	Так	iOS, Android, Windows	Так
6	Xludia	Комерційна	Так	iOS, Android	Так
7	ARToolkit	Безкоштовна	Так	Windows, Mac, Linux, iOS, Android	Ні
8	Aurasma	Безкоштовна, комерційна	-	iOS, Android	Так
9	HoloBuilder	Безкоштовна, комерційна	Так	iOS, Android, Windows, Blackberry	Так
10	Robocortex	Безкоштовна, комерційна	Так	Windows, Mac	Ні
11	Wikitude	Безкоштовна, комерційна	Так	iOS, Android, Windows	Так
12	ARcrowd	Безкоштовна	Ні	-	-
13	ARMES	Комерційна	-	Windows	-
14	DroidAR	Безкоштовна	-	-	Так
15	ARCore	Безкоштовна	Так	iOS	Так

4. Сфери застосування AR

До недавнього часу було загальноприйнятою думкою, що доповнена реальність обмежується головним чином галуззю ігор. Проте сучасні досягнення в цій технології відкрили широкий потенціал її використання, охопивши сфери оборони, медичних наук, освіти, виробництва, ланцюгів постачання, робототехніки, розваг та ігор. Доповнена реальність стала дійсно важливим проривом, який має можливість застосування у різних галузях. Наступні підсфери, які будуть оглянуті, відображають останні дослідження та охоплюють всі сфери застосування в даний час [51].

4.1 Маркетинг і реклама

Пандемія COVID-19 призвела до змін в споживчих звичках клієнтів, перекладаючи попит з традиційних компаній на онлайн-магазини. Ця глобальна епідемія виявила суттєвий вплив на міжнародну бізнес-сферу, що призвело до великого зростання використання технологічних засобів, таких як мобільні програми для електронної торгівлі. Значні переваги, що володіють додатки доповненої реальності для смартфонів, сприяють їх розвитку і мають вплив на різні сфери. Відзначаючи розширені можливості цієї технології, варто підкреслити її зростаючу популярність. Споживачі мають змогу взаємодіяти з інтерактивними віртуальними об'єктами, оцінювати їх у контексті своїх потреб та здійснювати вибір оптимальних варіантів перед покупкою [52]. Ідея доповненої реальності може також слугувати нарративним

середовищем для просування товарів, сприяючи більш докладному розумінню покупцями продукту та наданню кращого обслуговування користувачів [50], включаючи обговорення характеристик продукту. Зокрема, у 2014 році компанія Timberland представила концепцію віртуального гардеробу, що базується на AR, де клієнти могли спостерігати за зображенням свого профілю на моделі та випробовувати різні типи одягу, щоб з'ясувати, який з них найкраще підходить [53], як ілюструється на Рис. 4.



Рис. 4. Віртуальна примірючка

4.2 Освіта

Пандемія Covid-19 спричинила негативні наслідки для системи вищої освіти в усьому світі. Ця медична криза призвела до обмежень щодо мобільності та соціального контакту, в той же час створивши низку викликів та труднощів для вищої освіти, зокрема перехід від традиційних методів навчання до онлайн та змішаних форм навчання, а також реорганізацію технологічних інструментів. Це зумовило активне прийняття і впровадження онлайн-технологій вищими навчальними закладами по всьому світу для оптимізації педагогічного процесу та завдань навчання. Впровадження доповненої та віртуальної реальності (AR і VR) у навчальний процес робить навчання більш динамічним та цікавим, де теоретичні концепції стають конкретними в емоційно насичених контекстах, сприяючи розвитку спеціалізованих навичок у студентів [54]. Використання засобів інтерактивних дисплеїв сприяє ефективнішому сприйманню, обробці та засвоєнню інформації студентами. Водночас, це додає новий рівень захоплюючості, стимулюючи активніше навчання. Програми навчання, які включають моделювання, 3D-графіку та макетування, реалізовані у фреймворку Augmented Education, забезпечують можливість студентам створювати моделі для глибшого розуміння і вивчення понять у сферах анімації та архітектури. Відповідно до старовинного вислову, "картинка варта тисячу слів", а доповнена реальність, безумовно, має значення більше тисячі слів [55].

4.3 Медицина

Застосування доповненої реальності в сфері медичних досліджень репрезентує значущий науковий рух вперед, спрямований на підвищення безпеки та ефективності. Приклад застосування Microsoft HoloLens у хірургії хребта, де цей пристрій здійснює відображення накладення на тілі пацієнтів, наочно демонструє потенціал технології доповненої реальності у медичній сфері. Застосування AR у хірургії надає медичному персоналу напутні інструкції, сприяючи виконанню операцій більш ефективно та з найменшим ризиком. Це дозволяє хірургам, навіть знаходячись на відстані тисяч миль один від одного, взаємодіяти та координувати проведення медичних процедур [55], [56]. Зокрема, ця технологія допомагає пацієнтам здобути більше інформації щодо їхнього лікування та попереджувальних заходів [57].

4.4 Ігри та розваги

Не можливо обговорювати важливість доповненої реальності в контексті анімації та ігор, не враховуючи впливу відомої гри "Pokemon Go" (як показано на рисунку 5). Саме ця відеогра спричинила відродження інтересу громадськості до AR. У галузі відеоігор AR здобула вельми вагому позицію, що дає гравцям можливість зануритися в імпровізоване віртуальне оточення, взаємодіяти з уявними сценаріями, такими як боротьба з зомбі, інопланетянами чи полювання на фантастичних істот. Низка доступних доповнених ігор, таких як "Temple Treasures Hunt", "Army of Robots", "Beer Pong AR" та багато інших [58], підтверджує цю тенденцію. Гравці прагнуть відчувати себе частиною віртуального світу, де використання AR сприяє покращенню гравального досвіду, забезпечуючи набагато глибше занурення у гру.



Рис. 5. Гра Pokemon Go

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Технологія доповненої реальності стала новим інструментом, що відкриває можливість розширити сприйняття та взаємодію з оточуючим світом. Ця технологія знайшла застосування в різних галузях, включаючи освіту, медицину, промисловість та розваги.

Однією з ключових переваг доповненої реальності є її здатність доповнювати реальний світ цифровим вмістом, що робить її набагато більш взаємодійською та доступною для користувачів. Також ця технологія сприяє покращенню навчального процесу та допомагає з ефективною взаємодією зі складними системами, такими як техніка та машини.

Завдання, що стоять перед технологією доповненої реальності, включають вимоги до апаратного та програмного забезпечення, а також розробку додатків та інтерфейсів для взаємодії з користувачем. На сьогоднішній день існує широкий спектр програмних та апаратних платформ для розробки доповненої реальності, таких як ARKit, ARCore, Unity, Unreal Engine, HoloLens, Magic Leap та інші, і вибір платформи вимагає уважного підходу для досягнення конкретних цілей.

Перспективи розвитку технології доповненої реальності виглядають дуже обіцяючими. Ця технологія може змінити спосіб, яким ми сприймаємо світ та взаємодіємо з ним. Вона надає можливості для покращення навчання, розваг та роботи.

Незважаючи на усі переваги та можливості, що надає технологія доповненої реальності, вона потребує додаткових досліджень та розробки. Проблеми зв'язку та синхронізації між пристроями та додатками, які використовують доповнену реальність, потребують уваги. Належна якість зображення та швидкість роботи пристроїв також важливі для успішної імплементації технології.

References

1. C. Westphal, "Challenges in networking to support augmented reality and virtual reality," in Proc. IEEE ICNC, 2017, pp. 1–15.
2. Multi-Access Edge Computing (MEC); Phase 2: Use Cases and Requirements. Accessed: Aug. 2, 2023. [Online]. Available: https://www.etsi.org/deliver/etsi_gs/MEC/001_099/002/02.01.01_60/gs_MEC002v020101p.pdf
3. R. Azuma, Y. Baillot, R. Behringer, S. Feiner, S. Julier, and B. MacIntyre, "Recent advances in augmented reality," IEEE Comput. Graph. Appl., vol. 21, no. 6, pp. 34–47, Nov./Dec. 2001.
4. P. Milgram and F. Kishino, "A taxonomy of mixed reality visual displays," IEICE Trans. Inf. Syst., vol. 77, no. 12, pp. 1321–1329, 1994.
5. D. Chatzopoulos, C. Bermejo, Z. Huang, and P. Hui, "Mobile augmented reality survey: From where we are to where we go," IEEE Access, vol. 5, pp. 6917–6950, 2017.
6. R. Xiao, J. Schwarz, N. Throm, A. D. Wilson, and H. Benko, "MRTouch: Adding touch input to head-mounted mixed reality," IEEE Trans. Visual. Comput. Graph., vol. 24, no. 4, pp. 1653–1660, Apr. 2018.
7. F. Zhou, H. B.-L. Duh, and M. Billinghurst, "Trends in augmented reality tracking, interaction and display: A review of ten years of ISMAR," in Proc. 7th IEEE/ACM Int. Symp. Mixed Augmented Real., 2008, pp. 193–202.
8. J. P. Rolland, L. D. Davis, and Y. Baillot, "A survey of tracking technologies for virtual environments," in Fundamentals of Wearable Computers and Augmented Reality. Hoboken, NJ, USA: CRC Press, 2001, pp. 83–128.
9. M. Bajura and U. Neumann, "Dynamic registration correction in videobased augmented reality systems," IEEE Comput. Graph. Appl., vol. 15, no. 5, pp. 52–60, Sep. 1995.
10. H. Kato and M. Billinghurst, "Marker tracking and HMD calibration for a video-based augmented reality conferencing system," in Proc. 2nd IEEE ACM Int. Workshop Augment. Real. (IWAR), 1999, pp. 85–94.
11. G. Simon, A. W. Fitzgibbon, and A. Zisserman, "Markerless tracking using planar structures in the scene," in Proc. IEEE ACM Int. Symp. Augment. Real. (ISAR), 2000, pp. 120–128.
12. V. Geroimenko, "Augmented reality technology and art: The analysis and visualization of evolving conceptual models," in Proc. IEEE 16th Int. Conf. Inf. Visual., 2012, pp. 445–453.
13. R. T. Azuma et al., "Making augmented reality work outdoors requires hybrid tracking," in Proc. 1st Int. Workshop Augment. Real., vol. 1, 1998, pp. 219–224.
14. I. Rabbi and S. Ullah, "A survey on augmented reality challenges and tracking," Acta Graphica: Znanstveni časopis Za Tiskarstvo i grafičke Komunikacije, vol. 24, nos. 1–2, pp. 29–46, 2013.

15. P. Mistry, P. Maes, and L. Chang, "WUW-wear ur world: A wearable gestural interface," in Proc. ACM Extended Abstracts Human Factors Comput. Syst. (CHI), 2009, pp. 4111–4116.
16. J. Schöning, M. Rohs, S. Kratz, M. Löchtfeld, and A. Krüger, "Map torchlight: A mobile augmented reality camera projector unit," in Proc. ACM Extended Abstracts Human Factors Comput. Syst. (CHI), 2009, pp. 3841–3846.
17. D. Wagner and D. Schmalstieg, "Handheld augmented reality displays," in Proc. IEEE Virtual Real. Conf. (VR), 2006, pp. 321–321.
18. K. Kiyokawa, Y. Kurata, and H. Ohno, "An optical see-through display for mutual occlusion of real and virtual environments," in Proc. IEEE/ACM Int. Symp. Augment. Real. (ISAR), 2000, pp. 60–67.
19. A. State, K. Keller, and H. Fuchs, "Simulation-based design and rapid prototyping of a parallax-free, orthoscopic video see-through headmounted display," in Proc. IEEE/ACM 4th Int. Symp. Mixed Augment. Real. (ISMAR), 2005, pp. 28–31.
20. G. Papagiannakis, G. Singh, and N. Magnenat-Thalmann, "A survey of mobile and wireless technologies for augmented reality systems," Comput. Animation Virtual Worlds, vol. 19, no. 1, pp. 3–22, 2008.
21. D. Van Krevelen and R. Poelman, Augmented Reality: Technologies, Applications, and Limitations," Dept. Comput. Sci., Vrije Univ. Amsterdam, Amsterdam, The Netherlands, 2007.
22. P. Haynes, S. Hehl-Lange, and E. Lange, "Mobile augmented reality for flood visualisation," Environ. Model. Softw., vol. 109, pp. 380–389, Nov. 2018.
23. M. H. Kurniawan, Suharjito, Diana, and G. Witjaksono, "Human anatomy learning systems using augmented reality on mobile application," Procedia Comput. Sci., vol. 135, pp. 80–88, 2018.
24. P. Dangkhom, "Mobile augmented reality on Web-based for the tourism using HTML5," in Proc. IEEE Int. Conf. Inf. Netw. (ICOIN), 2018, pp. 482–485.
25. S. Larabi, "Augmented reality for mobile devices: Textual annotation of outdoor locations," in Augmented Reality and Virtual Reality. Heidelberg, Germany: Springer, 2018, pp. 353–362.
26. Google Glass. Accessed: Aug. 2, 2023. [Online]. Available: <https://www.google.com/glass/start/>
27. O. J. Muensterer, M. Lacher, C. Zoeller, M. Bronstein, and J. Kübler, "Google glass in pediatric surgery: An exploratory study," Int. J. Surg., vol. 12, no. 4, pp. 281–289, 2014.
28. M. C. Leue, T. Jung, and D. tom Dieck, "Google glass augmented reality: Generic learning outcomes for art galleries," in Information and Communication Technologies in Tourism. Vienna, Austria: Springer, 2015, pp. 463–476.
29. Pokémon Go. Accessed: Aug. 2, 2023. [Online]. Available: <https://www.pokemongo.com/en-us/>
30. Google Lens. Accessed: Aug. 2, 2023. [Online]. Available: <https://lens.google.com/>
31. Microsoft HoloLens. Accessed: Aug. 2, 2023. [Online]. Available: <https://www.microsoft.com/en-us/hololens/>
32. B. Shi, J. Yang, Z. Huang, and P. Hui, "Offloading guidelines for augmented reality applications on wearable devices," in Proc. 23rd ACM Int. Conf. Multimedia, 2015, pp. 1271–1274.
33. R. Shea, A. Sun, S. Fu, and J. Liu, "Towards fully offloaded cloudbased ar: Design, implementation and experience," in Proc. 8th ACM Multimedia Syst. Conf., 2017, pp. 321–330.
34. W. Zhang, B. Han, and P. Hui, "On the networking challenges of mobile augmented reality," in Proc. Workshop Virtual Real. Augment. Real. Netw., 2017, pp. 24–29.
35. A. Younis, T. X. Tran, B. Qiu, and D. Pompili, "Demo abstract: Mobile augmented reality leveraging cloud radio access networks," in Proc. IEEE 20th Int. Symp. World Wireless Mobile Multimedia Netw. (WoWMoM), 2019, pp. 1–3.
36. Y. C. Hu, M. Patel, D. Sabella, N. Sprecher, and V. Young, "Mobile edge computing—A key technology towards 5G," ETSI, Sophia Antipolis, France, White Paper, 2015.
37. T. Taleb, K. Samdanis, B. Mada, H. Flinck, S. Dutta, and D. Sabella, "On multi-access edge computing: A survey of the emerging 5G network edge cloud architecture and orchestration," IEEE Commun. Surveys Tuts., vol. 19, no. 3, pp. 1657–1681, 3rd Quart., 2017.
38. W. Zhang, B. Han, and P. Hui, "JAGUAR: Low latency mobile augmented reality with flexible tracking," in Proc. 26th ACM Int. Conf. Multimedia, 2018, pp. 355–363.
39. L. Liu, H. Li, and M. Gruteser, "Edge assisted real-time object detection for mobile augmented reality," in Proc. 25th Annu. Int. Conf. Mobile Comput. Netw., 2019, pp. 1–16.
40. X. Qiao, P. Ren, S. Dustdar, and J. Chen, "A new era for Web AR with mobile edge computing," IEEE Internet Comput., vol. 22, no. 4, pp. 46–55, Jul./Aug. 2018.
41. Z. Huang, W. Li, P. Hui, and C. Peylo, "CloudRidAR: A cloud-based architecture for mobile augmented reality," in Proc. ACM Workshop Mobile Augment. Real. Robot. Technol. Syst., 2014, pp. 29–34.
42. GSMA Future Networks. Cloud AR/VR Whitepaper. Accessed: Aug. 2023. [Online]. Available: <https://www.gsma.com/futurenetworks/wiki/cloud-ar-vr-whitepaper/>
43. M. Schneider, J. Rambach, and D. Stricker, "Augmented reality based on edge computing using the example of remote live support," in Proc. IEEE Int. Conf. Ind. Technol. (ICIT), 2017, pp. 1277–1282.
44. J. Ren, Y. He, G. Huang, G. Yu, Y. Cai, and Z. Zhang, "An edgecomputing based architecture for mobile augmented reality," IEEE Netw., vol. 33, no. 4, pp. 162–169, Jul./Aug. 2019.
45. Amin, D., & Govilkar, S. (2015). Comparative study of augmented reality SDKs. International Journal on Computational Science & Applications, 5(1), 11-26.
46. Paul, P. S., Goon, S., & Bhattacharya, A. (2012). History and comparative study of modern game engines. International Journal of Advanced Computed and Mathematical Sciences, 3(2), 245-249.
47. Christophoulou, E., & Xinogalos, S. (2017). Overview and comparative analysis of game engines for desktop and mobile devices.
48. Mishra, P., & Shrawankar, U. (2016). Comparison between famous game engines and eminent games.
49. Hanafí, A., Elaachak, L., & Bouhorma, M. (2019, March). A comparative study of augmented reality SDKs to develop an educational application in chemical field. In Proceedings of the 2nd International Conference on Networking, Information Systems & Security (pp. 1-8).
50. Ibañez-Sánchez, S., Orús, C., & Flavián, C. Augmented reality filters on social media. Analyzing the drivers of playability based on uses and gratifications theory. Psychology & Marketing 2022
51. Schmidt, J., Reichstein, C., & Harting, R. C. Influence of Augmented Reality on Consumer Behaviour in Online Retailing. In International Conference on Business Information Systems (pp. 131-143). Springer, Cham. 2022
52. Alkhamisi, A. O., Arabia, S., & Monowar, M. M. Rise of augmented reality: Current and future application areas. International journal of internet and distributed systems, 2013
53. Umeda, R., Seif, M. A., Higa, H., & Kuniyoshi, Y. A medical training system using augmented reality. In 2017 International Conference on Intelligent Informatics and Biomedical Sciences 2017

54. Aguilar-Salinas, P., Gutierrez-Aguirre, S. F., Avila, M. J., & Nakaji, P. (2022). Current status of augmented reality in cerebrovascular surgery: a systematic review. *Neurosurgical Review*, 2022
55. Ali, F. Augmented reality enhanced experiences in restaurants: Scale development and validation. *International Journal of Hospitality Management*, 2022
56. Birlo, M., Edwards, P. E., Clarkson, M., & Stoyanov, D. Utility of Optical See-Through Head Mounted Displays in Augmented Reality Assisted Surgery: A systematic review. *Medical Image Analysis*, 2022.
57. Jha, G., Singh, P., & Sharma, L. Recent advancements of augmented reality in real time applications. *International Journal of Recent Technology and Engineering*, 2019
58. Yoon, S., & Oh, J. A theory-based approach to the usability of augmented reality technology: A cost-benefit perspective. *Technology in Society*, 2022