**ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ
ТЕХНОЛОГІЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ
ІНСТИТУТ
ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА КОМП'ЮТЕРНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ**

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: «Доповнена реальність для навчальних симуляцій у технічних спеціальностях»

на здобуття освітнього ступеня бакалавра
зі спеціальності 123 Комп'ютерна інженерія
освітньо-професійної програми «Комп'ютерна інженерія»

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ Єгор ШИТЕНКО
(підпис)

Виконав: здобувач вищої освіти групи КІД-41
Єгор ШИТЕНКО

Керівник: А.С. ВЄЧЕРКОВСЬКА
к.т.н., доцент

Рецензент: Віктор ВИШНІВСЬКИЙ
к.ф.-м.н., доцент *Ім'я, ПРІЗВИЩЕ*

Київ 2025

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
Навчально-науковий інститут інформаційних технологій

Кафедра Комп'ютерна інженерія

Ступінь вищої освіти Бакалавра

Спеціальність 123 Комп'ютерна інженерія

Освітньо-професійна програма «Комп'ютерна інженерія»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
Комп'ютерної
інженерії
_____Наталія ЛАЩЕВСЬКА
«_____» _____2025 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Шитенко Єгор Станіславович

1. Тема кваліфікаційної роботи: «Доповнена реальність для навчальних симуляцій у технічних спеціальностях»

керівник кваліфікаційної роботи А.С. ВЄЧЕРКОВСЬКА, доцент, к.т.н,

затверджені наказом Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій від «15» травня 2025 р. № 320.
2. Строк подання кваліфікаційної роботи «17» травня 2025 р.
3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи: науково-технічна література, метод удосконалення параметрів, вимоги до якості друку.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)
1. Огляд літератури та аналіз предметної області.
2. Огляд та аналіз існуючих AR-рішень у сфері технічної освіти.
3. І
технологіях.

4. Система візуального позиціонування (VPS) та її застосування в AR-освіті.

1. Потенціал Deep Location у створенні інноваційних освітніх симуляторів.
2. Аналіз продуктивності AR-додатків та перспективи їх розвитку.

2. Перелік ілюстративного матеріалу: *презентація*
    1. Аналіз технологій доповненої реальності у навчальних симуляціях.
    2. Проблематика впровадження AR-рішень у технічну освіту.
    3. Методи інтеграції AR у навчальний процес.
    4. Типологія AR-систем та їх можливості в освіті.
    5. Архітектура розробленого AR-додатка для навчальних симуляцій.
    6. Використання ARKit та ARCore для реалізації навчальних сценаріїв.
    7. Система візуального позиціонування (VPS) та внутрішня AR-навігація.
    8. Експериментальні результати тестування.

3. Дата видачі завдання «16» лютого 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз наявної науково-технічної літератури	16.02-23.02.2025	
2	Вивчення матеріалів для аналізу технологій AR та їх застосування у технічній освіті	23.02-02.03.2025	
3	Дослідження існуючих платформ та інструментів для створення AR-симуляцій	02.03-09.03.2025	
4	Розробка методу інтеграції AR-навчання у симуляційні середовища	09.03-19.03.2025	
5	Постановка експерименту: тестування розробленого AR-рішення	19.03-29.03.2025	
6	Оформлення роботи: вступ, висновки, реферат	29.03-30.03.2025	
7	Розробка демонстраційних матеріалів	30.03-31.03.2025	
8	Попередній захист роботи	01.04.2025	

Здобувач вищої освіти _____ Єгор ШИТЕНКО
(підпис)

Керівник
кваліфікаційної роботи _____
А.С. ВЄЧЕРКОВСЬКА
(підпис)

РЕФЕРАТ

Текстова частина кваліфікаційної роботи на здобуття освітнього ступеня магістра: 66 с., 26 рис., 2 табл., 35 джерел.

Об'єкт дослідження – інформаційна система доповненої реальності (AR) для створення навчальних симуляцій у технічних спеціальностях.

Предмет дослідження – методи розробки та впровадження технологій доповненої реальності (AR) для моделювання навчальних процесів та покращення засвоєння матеріалу студентами технічних спеціальностей.

Мета роботи – розробка та реалізація програмного продукту на основі доповненої реальності, який дозволяє створювати інтерактивні навчальні симуляції для технічної освіти з використанням технологій ARKit, ARCore, VPS та Deep Location.

Методи дослідження:

1. Аналіз літературних джерел та нормативних документів – дослідження сучасних технологій доповненої реальності, методів навчального моделювання та їх використання в освітніх закладах.
2. Методи якісного та кількісного аналізу – оцінка ефективності використання AR-симуляцій у технічному навчанні, порівняння різних підходів до створення інтерактивних навчальних середовищ.
3. Емпіричні методи – аналіз існуючих AR-застосунків та навчальних платформ, які використовують доповнену реальність у технічній освіті.
4. Методи моделювання – розробка концептуальної, логічної та програмної архітектури AR-додатка, його тестування на працездатність та ефективність у навчальному процесі.
5. Порівняльний аналіз – оцінка можливостей та функціональності різних платформ для розробки AR-додатків, таких як ARKit (для iOS), ARCore (для Android), система візуального позиціонування (VPS) та технологія Deep Location.

Галузь використання – навчальні заклади, технічні університети, інженерні кафедри.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ДОПОВНЕНА РЕАЛЬНІСТЬ, НАВЧАЛЬНІ СИМУЛЯЦІЇ, ARKit, ARCore, VPS, DEEP LOCATION, ТЕХНІЧНА ОСВІТА,

ІНТЕРАКТИВНЕ НАВЧАННЯ, INFOPOP

ABSTRACT

Textual Part of the Master's Qualification Thesis: 66 pages, 26 figures, 2 table, 35 references.

Object of research: An augmented reality (AR) information system for creating educational simulations in technical specialties.

Subject of research: Methods for developing and implementing augmented reality (AR) technologies for modeling educational processes and enhancing students' understanding in technical fields.

Purpose of the thesis: To develop and implement a software product based on augmented reality that enables the creation of interactive educational simulations for technical education using ARKit, ARCore, VPS, and Deep Location technologies.

Research Methods:

1. Analysis of literary sources and regulatory documents – investigation of modern AR technologies, educational modeling methods, and their application in educational institutions.
2. Qualitative and quantitative analysis methods – assessment of the effectiveness of using AR simulations in technical education, and comparison of different approaches to creating interactive learning environments.
3. Empirical methods – analysis of existing AR applications and educational platforms utilizing augmented reality in technical training.
4. Modeling methods – development of conceptual, logical, and software architecture for the AR application, along with its testing for performance and educational effectiveness.
5. Comparative analysis – evaluation of capabilities and functionalities of various platforms for AR application development, such as ARKit (for iOS), ARCore (for Android), Visual Positioning System (VPS), and Deep Location technology.

Field of application: Educational institutions, technical universities, engineering departments.

KEYWORDS: AUGMENTED REALITY, EDUCATIONAL SIMULATIONS, ARKit, ARCore, VPS, DEEP LOCATION, TECHNICAL EDUCATION, INTERACTIVE LEARNING, INFOPOP

ЗМІСТ

ВСТУП.....8
1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ.....10
1.1 Дослідження застосування доповненої реальності у навчальних симуляціях.....10
1.2 Огляд та аналіз існуючих AR-рішень у сфері технічної освіти.....14
1.3 Основні концепції доповненої реальності та її можливості в навчальному процесі.....19
Висновок до розділу 1.....22
2 ДОСЛІДЖЕННЯ НАВІГАЦІЙНИХ СИСТЕМ З ДОПОВНЕНОЮ РЕАЛЬНІСТЮ.....23
2.1 Порівняльний аналіз доповненої та віртуальної реальності в освітніх технологіях.....23
2.2 Типологія систем доповненої реальності та їх функціональні особливості.....27
2.3 Система візуального позиціонування (VPS) та її застосування в AR-освіті.....30
2.4 Використання технології внутрішньої AR-навігації у навчальних закладах.....34
Висновок до розділу 2.....38
3 РОЗРОБКА AR-ЗАСТОСУНКУ ДЛЯ НАВЧАЛЬНИХ СИМУЛЯЦІЙ: МЕТОДИ ТА ІНСТРУМЕНТИ.....39
3.1 Вибір технологічного стеку та програмного забезпечення для AR-додатків.....39
3.2 Використання ARKit для інтеграції AR-симуляцій у середовище iOS.....47
3.3 Реалізація AR-навчання на пристроях Android за допомогою ARCore.....50
3.4 Створення та тестування прототипу навчального застосунку InfoPop.....53
ВИСНОВКИ.....65
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....66
ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ.....70

ВСТУП

Сучасний розвиток цифрових технологій стимулює активне впровадження доповненої реальності (AR) в освітній процес, зокрема у навчальні симуляції для технічних спеціальностей. Традиційні методи підготовки фахівців у технічних галузях часто потребують використання дорогого обладнання, лабораторій та складного програмного забезпечення, що обмежує можливості ефективного навчання.

Доповнена реальність дозволяє створювати інтерактивні навчальні середовища, які сприяють глибшому засвоєнню матеріалу, підвищенню рівня практичних навичок і зниженню витрат на підготовку фахівців. Вона забезпечує візуалізацію складних технічних процесів, імітацію роботи з механізмами та електронними системами, що особливо актуально для навчання в таких сферах, як інженерія, медицина, будівництво, авіація та IT.

Актуальність даного дослідження полягає у розробці AR-застосунку для навчальних симуляцій, що дозволить значно покращити якість навчання в технічних спеціальностях, забезпечуючи більш ефективну взаємодію студентів з цифровими моделями реальних об’єктів. Це сприятиме підвищенню рівня професійної підготовки, скороченню часу на освоєння практичних навичок та покращенню доступності сучасних освітніх технологій.

Метою даного дослідження є розробка та реалізація програмного продукту на основі доповненої реальності, який дозволяє створювати інтерактивні навчальні симуляції для технічної освіти з використанням технологій ARKit, ARCore, VPS та Deep Location.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- проаналізувати існуючі AR-рішення у сфері технічної освіти та визначити їхні переваги й недоліки;

- дослідити основні концепції доповненої реальності та її можливості у навчальному процесі;
- розробити прототип AR-застосунку для навчальних симуляцій у технічних спеціальностях;
- провести тестування та оцінку ефективності розробленого AR-рішення у навчальному процесі.

Об’єкт дослідження – інформаційна система доповненої реальності (AR) для створення навчальних симуляцій у технічних спеціальностях.

Предмет дослідження – методи розробки та впровадження технологій доповненої реальності (AR) для моделювання навчальних процесів та покращення засвоєння матеріалу студентами технічних спеціальностей.

Методологія дослідження включає аналіз та узагальнення літературних джерел з тематики доповненої реальності (AR) та її застосування у навчальних симуляціях, дослідження існуючих AR-рішень, а також моделювання процесів взаємодії користувачів із AR-об’єктами в освітньому середовищі. Дослідження передбачає розробку прототипу AR-застосунку, що дозволяє інтегрувати навчальні симуляції в доповнену реальність, а також тестування його ефективності. У процесі дослідження застосовуються методи математичного моделювання, інструменти розробки AR (ARKit, ARCore), алгоритми візуального позиціонування (VPS).

Практична значущість роботи полягає у створенні AR-застосунку для навчальних симуляцій, що дозволить підвищити якість технічної освіти за рахунок інтерактивного навчання, зниження витрат на обладнання та покращення практичної підготовки студентів. Використання доповненої реальності у навчальних процесах сприятиме більш глибокому засвоєнню матеріалу, розширенню можливостей дистанційного навчання та впровадженню інноваційних методик підготовки фахівців у технічних спеціальностях.

1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

1.1 Дослідження застосування доповненої реальності у навчальних симуляціях

Навчальні симуляції – це спеціально створені моделі або середовища, що імітують реальні або гіпотетичні ситуації, з метою формування практичних навичок, закріплення теоретичних знань та підвищення ефективності навчального процесу. Вони дозволяють здобувачам освіти безпечно взаємодіяти з віртуальними об’єктами та процесами, які в реальному житті можуть бути дорогими, складними або небезпечними для безпосереднього вивчення.

У навчальних симуляціях створюється наближене до реальності середовище, в якому студент може виконувати дії, що імітують роботу з технічними приладами, механізмами, програмами чи фізичними процесами. Це сприяє кращому засвоєнню матеріалу, розвитку критичного мислення, а також формуванню професійних компетентностей [1].

Інтеграція доповненої реальності (AR) у такі симуляції відкриває нові можливості: вона дозволяє накладати віртуальні об'єкти та підказки на реальне середовище, забезпечуючи глибший рівень занурення в навчальний процес, інтерактивність та візуалізацію складних технічних явищ.

Доповнена реальність (AR) суттєво розширює можливості навчальних симуляцій, створюючи умови для більш ефективного та доступного засвоєння знань. Вона дозволяє поєднувати фізичний світ з комп’ютерно згенерованими об’єктами, що виводяться на екран мобільного пристрою або планшета в реальному часі. Завдяки цьому студенти можуть бачити та взаємодіяти з тривимірними моделями, інструкціями, анотаціями та динамічними процесами без потреби у дорогому обладнанні або спеціальних лабораторіях.

У контексті технічних спеціальностей AR виконує такі ключові функції:

– Візуалізація складних об'єктів – наприклад, внутрішньої будови механізмів, електричних схем, потоків рідин тощо.

– Інтерактивне навчання – студент може обертати 3D-модель, натискати на її частини, викликати анотації або запускати симуляцію роботи.

– Покрокове керування процесом – у вигляді віртуального інструктора або інтерфейсу з підказками.

– Миттєвий зворотний зв'язок – наприклад, система може підказати помилку в дії користувача або запропонувати правильний варіант.

– Мобільність та доступність – AR-сценарії можна запускати на звичайних смартфонах і планшетах, без потреби у спеціальних окулярах або тренажерах [1].

Таким чином, AR у навчальних симуляціях не просто візуалізує теоретичні знання, а перетворює навчання на активну діяльність, у якій студент стає учасником процесу, а не лише пасивним спостерігачем. Це особливо важливо для майбутніх інженерів, техніків, айтішників, які повинні вміти не лише "знати", а й "розуміти, бачити й робити".

Технології доповненої реальності (AR) все активніше впроваджуються в навчальний процес різних галузей, створюючи симуляції, які максимально наближені до реального робочого середовища. Їх застосування дозволяє майбутнім фахівцям не лише побачити процес, але й взаємодіяти з ним у безпечному та зручному форматі.

У медицині AR застосовується для тренування хірургів, візуалізації внутрішніх органів, навчання процедур першої допомоги. Студенти можуть проводити умовні операції на віртуальних пацієнтах, не ризикуючи життям реальної людини [4].

В авіації – пілоти та авіатехніки проходять навчання в симуляторах, де AR використовується для моделювання ситуацій в кабіні, обслуговування двигунів, навігаційних систем та аварійних сценаріїв (рис. 1.1).

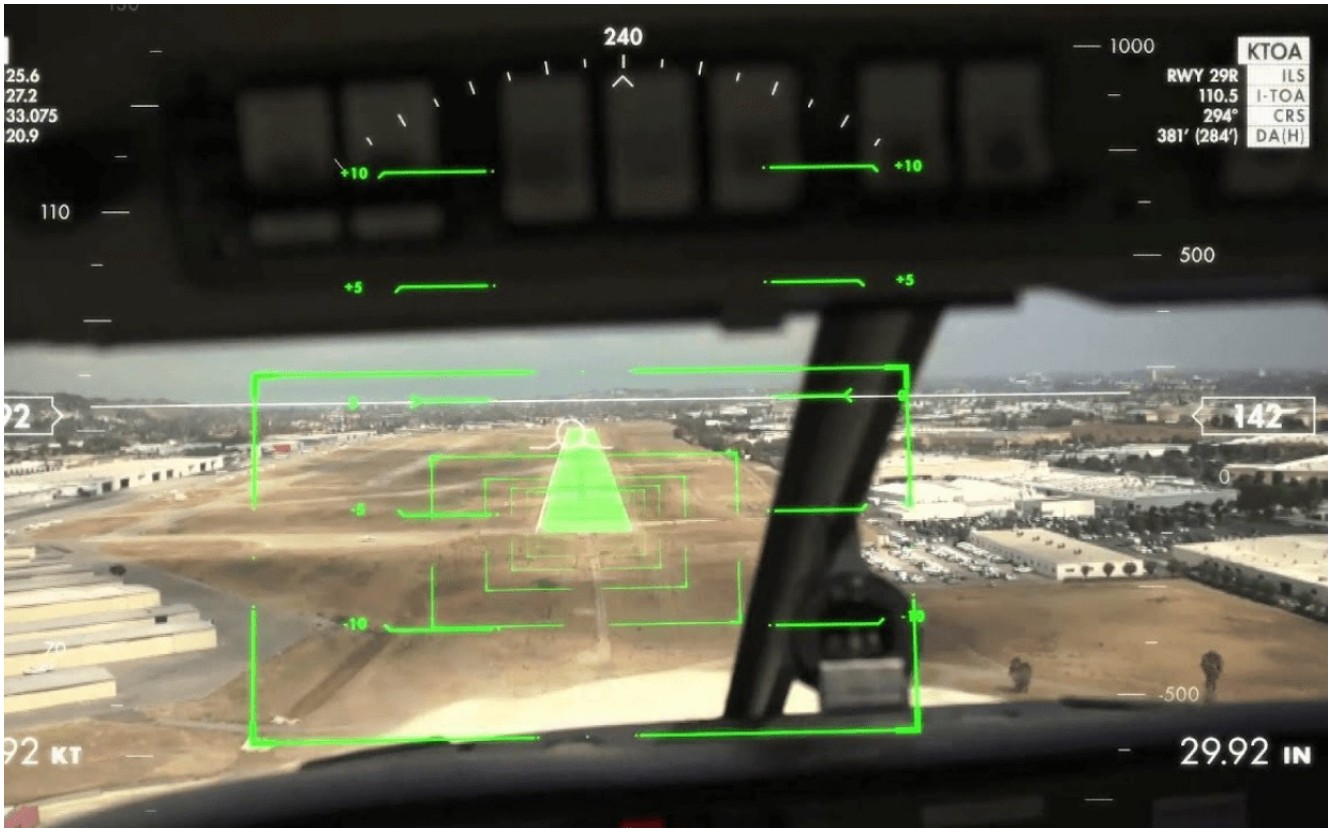


Рисунок 1.1 – Приклад застосування AR в авіації

У машинобудуванні – AR допомагає моделювати збірку механізмів, працювати з інструкціями у реальному масштабі, досліджувати структуру складних пристроїв, аналізувати помилки на етапі конструювання (рис. 1.2).

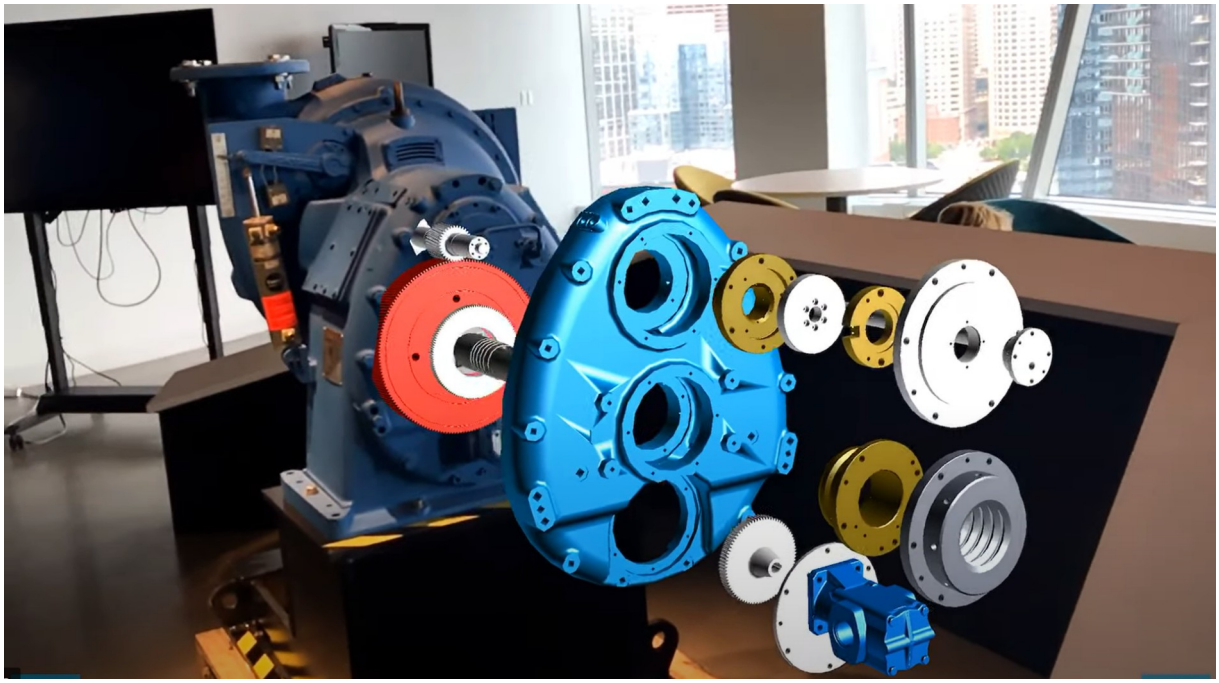


Рисунок 1.2 – Приклад використання AR в машинобудуванні

У військовій сфері навчальні симуляції з використанням доповненої реальності (AR) відіграють критично важливу роль, оскільки дозволяють ефективно тренувати бійців у умовах, наближених до бойових, без ризику для життя та без значних витрат на обладнання або виїзні навчання (рис. 1.3).

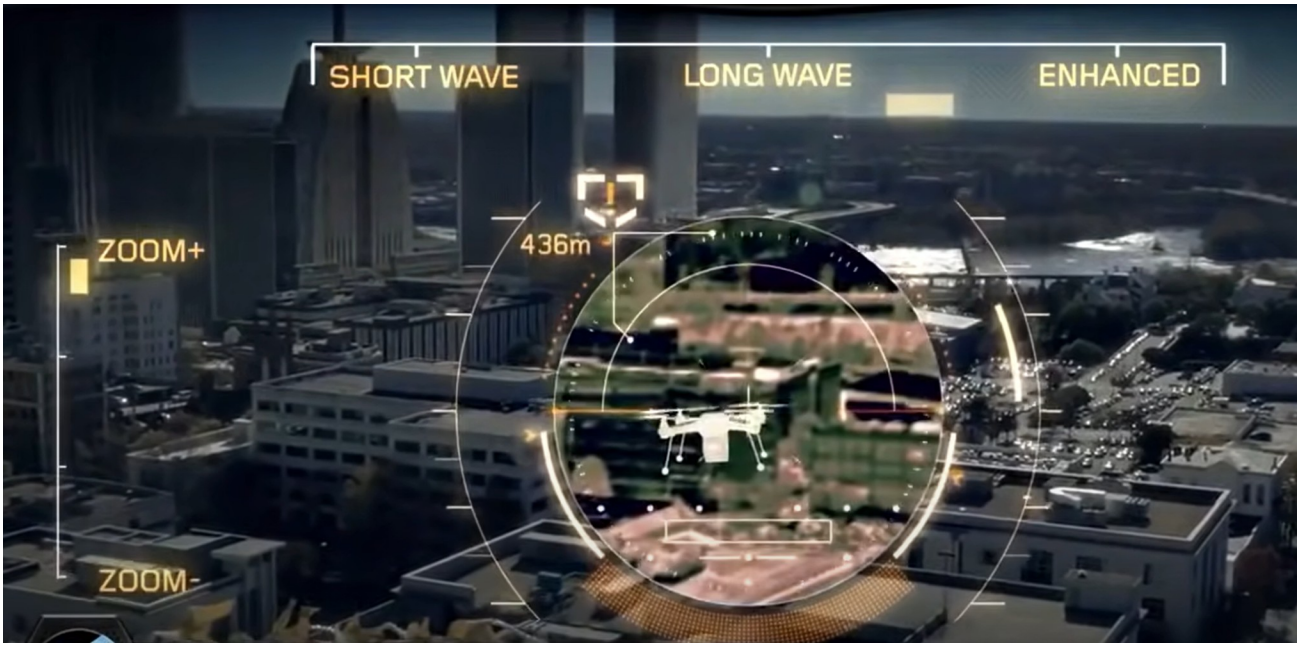


Рисунок 1.3 – Приклад використання AR в військовій сфері

У сфері IT та комп’ютерної інженерії, де AR використовується для:

– навчання мережевих технологій та архітектури: за допомогою AR-симуляцій студенти можуть візуально будувати мережу, підключати сервери, маршрутизатори, переглядати потоки даних у реальному часі.

– вивчення роботи комп’ютерного обладнання: AR дозволяє «розібрати» віртуальний комп’ютер або плату, подивитися, як працює процесор, пам’ять, системи охолодження, що значно полегшує розуміння апаратної частини.

– програмування інтерактивних об'єктів: студенти можуть створювати власні AR-об’єкти, тестувати логіку програмування на практиці, наприклад, писати код для взаємодії об'єкта з користувачем або середовищем.

– вивчення алгоритмів: AR дозволяє «оживити» структури даних, наприклад, візуалізувати сортування масивів, побудову дерев, пошук шляхів у графах, що значно спрощує засвоєння абстрактних понять [2].

1.2 Огляд та аналіз існуючих AR-рішень у сфері технічної освіти

Доповнена реальність (AR) поступово перетворюється на невід'ємний компонент сучасного освітнього середовища, особливо у сфері технічної підготовки. На ринку існує низка програмних рішень, орієнтованих на візуалізацію складних понять, практичне моделювання процесів та розвиток прикладних навичок через імітаційні навчальні середовища. У даному підрозділі розглянуто найпоширеніші AR-додатки, що знайшли своє застосування у навчальних закладах різного профілю [4].

Одним із популярних засобів є Merge Cube – платформа, що дозволяє відображати тривимірні навчальні моделі за допомогою маркерного об'єкта у формі куба. З її допомогою студенти можуть досліджувати структуру механізмів, біологічних органів чи астрономічних тіл у віртуальному просторі з можливістю інтерактивної взаємодії.

Merge EDU — освітня платформа, розроблена компанією Merge Labs (США), орієнтована на середню та технічну освіту. Основна функція — інтерактивна візуалізація навчального контенту за допомогою Merge Cube. Додаток підтримує платформи iOS та Android, а також має інтеграцію з веб-версією для демонстрацій на великих екранах.

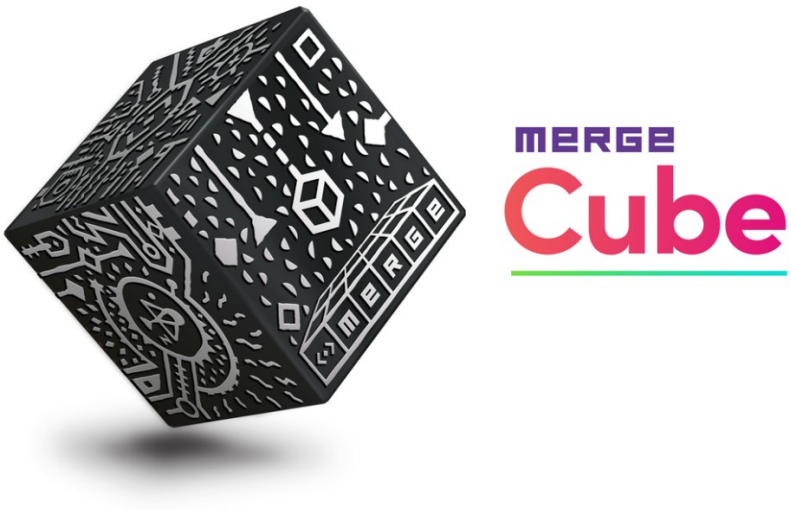


Рисунок 1.4 – Платформа Merge Cube

Assemblr EDU – орієнтована на створення та перегляд навчального контенту в доповненій реальності. Вона надає викладачам інструменти для формування власних AR-сценаріїв, що дозволяє адаптувати візуальні моделі до конкретної дисципліни чи тематики [5].

Assemblr EDU, розроблений індонезійською компанією Assemblr, надає користувачам інтуїтивний інтерфейс для створення власного AR-контенту без необхідності програмування. Серед ключових функцій — створення презентацій, візуалізація фізичних і біологічних процесів, підтримка гіперпосилань та анімацій. Платформа доступна для iOS, Android і має веб-редактор.



Рисунок 1.4 – Платформа Assemblr EDU

Додаток JigSpace, який спеціалізується на демонстрації технічних і наукових процесів. Він дає змогу користувачам ознайомлюватися зі складними механізмами, інженерними об’єктами та принципами їх дії у форматі покрокових

AR-презентацій.

JigSpace, створений австралійським стартапом JigSpace Pty Ltd, дозволяє вивчати технічні об’єкти у форматі покрокових AR-інструкцій. Основний акцент зроблено на інженерних та механічних симуляціях. Платформа підтримує iOS, має сумісність із Apple Vision Pro та орієнтована на ринок технічної освіти та корпоративного навчання.



Рисунок 1.4 – Платформа Assemblr EDU

Платформа Zappar (ZapWorks) дозволяє створювати кастомізовані AR-рішення, які широко використовуються в освітньому процесі для візуалізації технічної інформації, інтерактивного подання інструкцій, проведення міні-лабораторій та тестувань. Серед інших універсальних рішень можна відзначити CoSpaces Edu, ARLOOPA, SketchAR, які мають гнучкі інструменти для створення AR-контенту з педагогічною метою.

Zappar (ZapWorks) — британська компанія, що спеціалізується на AR/VR-

технологіях. Запропонована платформа ZapWorks надає інструменти для створення кастомізованих AR-додатків із гнучким програмуванням, що робить її популярною серед розробників освітнього контенту. Платформа сумісна з iOS, Android та WebAR (підтримка у браузері без встановлення додатку).



Рисунок 1.4 – Платформа Zappar

Крім того, для розробки спеціалізованих AR-симуляцій у технічній освіті активно використовуються інструменти Unity у поєднанні з Vuforia або AR Foundation, а також програмні платформи ARKit (для iOS) та ARCore (для Android). Ці засоби забезпечують розробникам можливість створювати повноцінні мобільні AR-додатки з широким функціоналом – від трекінгу об’єктів до взаємодії з користувачем у реальному часі. Спектр наявних AR-додатків для освіти є досить широким і різноманітним, а їх функціональні можливості дозволяють ефективно реалізовувати завдання з візуалізації, моделювання та взаємодії в навчальному процесі, особливо у галузі технічної підготовки. Вибір

конкретного рішення залежить від цілей навчання, рівня технічної підготовки здобувачів освіти, а також від інфраструктурних можливостей навчального закладу [6].

Для розробки повнофункціональних AR-застосунків у вищій технічній освіті використовуються Unity (ігровий рушій) у поєднанні з бібліотеками Vuforia, AR Foundation, ARKit (розробка для iOS, компанія Apple) та ARCore (для Android, компанія Google). Ці засоби орієнтовані на професійне створення програмних продуктів із підтримкою 3D-моделей, трекінгу поверхонь, взаємодії з об’єктами в реальному середовищі, візуального позиціонування та хмарних сервісів.

У табл. 1.1 наведено порівняльну характеристику найпоширеніших AR-додатків, що застосовуються в освітньому процесі. Оцінка здійснювалася за низкою критеріїв, зокрема інтерактивністю, можливістю створення власного контенту, технічною складністю впровадження, підтримкою тривимірних моделей та придатністю для використання у сфері технічної освіти. Результати свідчать, що найбільш ефективними з точки зору повнофункціональності є платформи, розроблені на базі ARKit та ARCore у середовищі Unity [6].

Таблиця 1.1 – Порівняльна характеристика AR-додатків для навчання у технічних спеціальностях

Назва додатку	**Цільова аудиторія**	**Інтерактивність**	**Можливість створення власного контенту**	**Технічна складність впровадження**	**Платформи**	**Підтримка 3D-моделей**	**Підходить для технічних спеціальностей**
Merge EDU	Школа, коледж	Середня	Обмежена	Низька	iOS, Android	Так	Частково
Assemblr EDU	Школа, ВНЗ	Висока	Так	Середня	iOS, Android, Web	Так	Так
JigSpace	ВНЗ, корпоративне	Висока	Ні	Низька	iOS	Так	Так

	навчання						
ZapWorks	Універсальна	Висока	Так	Середня	iOS, Android, WebAR	Так	Так
Unity + ARKit	ВНЗ, професійна підготовка	Висока	Так (повна свобода)	Висока	iOS	Так	Так
Unity + ARCore	ВНЗ, професійна підготовка	Висока	Так (повна свобода)	Висока	Android	Так	Так

1.3 Основні концепції доповненої реальності та її можливості в навчальному процесі

Доповнена реальність (Augmented Reality, AR) – це технологія, яка поєднує віртуальні об’єкти з реальним середовищем у режимі реального часу. Відмінною рисою AR є те, що цифрові елементи не замінюють фізичний світ, як у віртуальній реальності (VR), а доповнюють його, накладаючись на зображення з камери мобільного пристрою, планшета або спеціалізованих AR-окулярів. У результаті користувач має змогу одночасно взаємодіяти з реальними об’єктами та віртуальними елементами, що відкриває широкі можливості для навчання, моделювання, візуалізації та експериментів [7].

Одним із ключових компонентів реалізації AR є маркери – це зазвичай спеціальні візуальні зображення (QR-коди, чорно-білі фігури, зображення об’єктів), які камера розпізнає як орієнтир для розміщення віртуального контенту у просторі. У маркерних AR-системах розташування віртуального об’єкта визначається відносно положення маркера у кадрі. Цей підхід простий в реалізації, але має обмеження щодо гнучкості та стабільності при змінах освітлення або кута огляду.

Більш досконалим є використання технології трекінгу (tracking), яка забезпечує відстеження позиції та орієнтації пристрою в просторі. У контексті AR

трекінг дозволяє точно «прив'язати» віртуальний об'єкт до фізичного простору, навіть без маркерів. Існують різні види трекінгу: візуальний, інерційний, гібридний. Наприклад, SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) дозволяє пристрою одночасно будувати карту навколишнього середовища та визначати своє положення в ньому, що робить можливим створення стабільної та реалістичної доповненої реальності [7].

3D-візуалізація – процес створення та відображення тривимірних об'єктів, які накладаються на реальний світ. Ці об'єкти можуть мати деталізовану геометрію, текстури, анімацію та логіку взаємодії. Завдяки 3D-візуалізації користувачі можуть оглядати навчальні моделі з усіх боків, «розбирати» складні механізми, спостерігати за процесами, що відбуваються всередині об'єктів, тощо. У поєднанні з AR це створює ефект присутності та залучення, що суттєво підвищує ефективність навчання.

У педагогіці доповнена реальність (AR) розглядається як інноваційний інструмент для активного, візуального та дослідницького навчання, що відповідає принципам сучасних освітніх парадигм – таких як особистісно орієнтоване, компетентнісне та змішане навчання. Інтеграція AR у навчальні дисципліни дозволяє реалізувати конструктивістський підхід, згідно з яким знання формуються через активну взаємодію учня із середовищем, експерименти та рефлексію.

AR-технології відкривають нові горизонти для візуального мислення, просторового сприйняття та розвитку когнітивних навичок. У педагогічному процесі це дає можливість студентам не просто спостерігати за процесом, а повноцінно брати в ньому участь, експериментуючи з інформацією у реальному часі.

До ключових переваг використання AR в освітньому процесі можна віднести:

– Інтерактивність навчання – студенти не є пасивними спостерігачами, а активно взаємодіють з навчальним контентом, що сприяє глибшому розумінню

матеріалу. Вони можуть змінювати параметри об'єктів, спостерігати за реакціями, моделювати ситуації.

– Залучення до навчального процесу – візуальна привабливість і новизна AR-моделей підвищують мотивацію до навчання, особливо у студентів технічних спеціальностей, де складність абстрактних понять часто ускладнює їх засвоєння. AR сприяє створенню ефекту присутності, що підвищує інтерес до предмета.

– Покращення засвоєння знань – дослідження показують, що візуалізація у поєднанні з активною дією значно покращує запам’ятовування інформації. У випадку з технічними дисциплінами AR дозволяє поєднати теоретичні знання з умовною практикою, зменшуючи розрив між навчанням і реальною професійною діяльністю.

– Індивідуалізація навчання – AR-додатки можуть адаптуватися до темпу та рівня підготовки конкретного користувача, пропонуючи диференційовані завдання, підказки або додаткові ресурси.

– Безпечне та ресурсозберігаюче середовище для практики – використання AR дозволяє імітувати роботу зі складними або дорогими об’єктами без потреби у фізичному доступі до них, що особливо актуально в умовах обмежених ресурсів навчальних закладів [8].

Таким чином, доповнена реальність виконує не лише технологічну, але й педагогічну функцію – вона формує активне освітнє середовище, яке сприяє розвитку ключових компетентностей майбутніх фахівців та модернізації змісту навчання відповідно до потреб цифрового суспільства.

Висновок до розділу 1

З’ясовано, що технології доповненої реальності (AR) мають значний потенціал для впровадження у навчальні симуляції, особливо у сфері технічної освіти. AR-додатки дозволяють моделювати складні інженерні процеси, візуалізувати будову технічних об'єктів та реалізовувати інтерактивні сценарії навчання, що істотно підвищує ефективність засвоєння матеріалу студентами.

Проведений огляд існуючих AR-рішень засвідчив наявність широкого спектра програмних продуктів з різним функціоналом, рівнем технічної складності та цільовою аудиторією. Найбільш перспективними у контексті технічної підготовки є платформи, які підтримують створення кастомізованого навчального контенту та забезпечують глибоку інтерактивність.

Розглянуті базові поняття доповненої реальності: маркери, трекінг, 3D-візуалізація – є фундаментальними компонентами для реалізації повноцінних AR-систем. У педагогічному контексті доповнена реальність виступає ефективним засобом активізації навчального процесу, формування практичних компетентностей та індивідуалізації освітнього контенту.

2 ДОСЛІДЖЕННЯ НАВІГАЦІЙНИХ СИСТЕМ З ДОПОВНЕНОЮ РЕАЛЬНІСТЮ

2.1 Порівняльний аналіз доповненої та віртуальної реальності в освітніх технологіях

Доповнена реальність (AR, Augmented Reality) та віртуальна реальність (VR, Virtual Reality) – це дві різні, хоча й взаємопов’язані технології візуалізації цифрового контенту, які знаходять дедалі ширше застосування в освітньому процесі (рис. 2.1). Обидві технології мають потенціал для трансформації традиційного навчання, проте відрізняються за своїми принципами роботи, рівнем занурення користувача, технічними вимогами та педагогічними можливостями [9].

Віртуальна реальність (VR) створює повністю штучне, змодельоване цифрове середовище, яке ізолює користувача від фізичного світу. Взаємодія з віртуальним простором здійснюється через VR-окуляри або шоломи, що занурюють людину в симульовану реальність, де всі об’єкти є віртуальними. У контексті навчання VR дозволяє створювати повноцінні тренажери, лабораторії чи експедиції, які імітують реальні або вигадані ситуації.

Доповнена реальність (AR), на відміну від VR, не замінює реальність, а накладає цифрові елементи (зображення, 3D-моделі, текст, відео) на реальне середовище в режимі реального часу. Взаємодія з AR здійснюється через камеру смартфона, планшета або AR-окуляри, при цьому користувач залишається зануреним у реальне фізичне оточення. AR дозволяє інтегрувати навчальний контент безпосередньо в простір аудиторії, лабораторії чи виробничого цеху [10].



Рисунок 2.1 – Візуальний приклад VR та AR

Тааблиця 2.1 – Порівняльна характеристика AR і VR:

Критерій	**AR (Доповнена реальність)**	**VR (Віртуальна реальність)**
Ступінь занурення	Часткове занурення, реальний світ з доповненнями	Повне занурення у віртуальне середовище
Пристрій	Смартфон, планшет, AR-окуляри	VR-шолом (Oculus, HTC Vive, тощо)
Вартість впровадження	Порівняно низька	Вища, через потребу в спеціальному обладнанні
Інтерактивність	Інтерактивність з реальним та віртуальним світом	Інтерактивність лише з віртуальним контентом
Можливості для навчання	Додавання інформації до реального контексту	Повна імітація середовища, включаючи критичні ситуації
Використання в технічній освіті	Моделювання об'єктів у реальному просторі	Тренажери, симулятори повного циклу дій

Технології доповненої (AR) та віртуальної (VR) реальності відкривають нові педагогічні можливості, сприяючи трансформації традиційних методів

навчання. Водночас кожна з цих технологій має свої переваги та обмеження, які впливають на доцільність їх використання в різних навчальних ситуаціях.

Переваги AR у навчанні:

– Поєднання цифрового контенту з реальним середовищем, що забезпечує контекстну наочність.

– Доступність – більшість AR-додатків працюють на звичайних мобільних пристроях.

– Можливість використання в аудиторіях і лабораторіях без потреби змінювати фізичне середовище.

– Підвищення залучення студентів за рахунок інтерактивності й ефекту присутності.

– Гнучкість застосування – AR можна інтегрувати в будь-який етап навчального процесу: від пояснення нового матеріалу до перевірки знань [11].

Недоліки AR:

– Обмеження функціоналу в порівнянні з VR: неможливо повністю змоделювати ситуацію, якщо вона не існує в реальному світі.

– Залежність від умов середовища (освітлення, якість камер).

– Менш глибоке занурення, що може бути критичним для тренувань у кризових або спеціалізованих сценаріях.

Переваги VR у навчанні:

– Повне занурення в навчальне середовище, що дозволяє імітувати будь-які ситуації, включаючи небезпечні або недоступні в реальності.

– Можливість опрацювання сценаріїв дій, які вимагають точного дотримання інструкцій або командної взаємодії (напр., евакуація, операція).

– Інтенсивне формування навичок через практику у безпечному симульованому середовищі.

Недоліки VR:

– Висока вартість обладнання та програмного забезпечення, що обмежує масове впровадження.

– Потреба у спеціально облаштованих приміщеннях для проведення занять.

– Психофізіологічні обмеження – тривале перебування у VR-середовищі може викликати дезорієнтацію, втому, головний біль.

– Можливе зниження зв’язку з реальним професійним контекстом, що особливо важливо для інженерних спеціальностей [12].

Доповнена реальність (AR) та віртуальна реальність (VR) успішно інтегровані у навчальні програми різних освітніх закладів по всьому світу, особливо в сферах, які потребують візуалізації складних об’єктів або моделювання небезпечних чи недоступних умов. Нижче наведено приклади практичного використання обох технологій у контексті технічної та міждисциплінарної освіти [13].

Приклади застосування AR:

– Електроніка та схемотехніка: за допомогою AR-додатків, таких як *InfoPop* чи *JigSpace*, студенти можуть вивчати принцип роботи електронних компонентів, спостерігати віртуальні сигнали в електричних колах, «розбирати» віртуальні плати.

– Інженерна графіка: AR дозволяє відображати тривимірні моделі деталей або конструкцій безпосередньо на кресленнях або робочих столах, що значно спрощує сприйняття просторових об’єктів.

– Навчання технічному обслуговуванню обладнання: інтерактивні інструкції у доповненій реальності (наприклад, через ARKit/ARCore) дозволяють поетапно навчати ремонту або діагностиці механізмів без фізичного втручання.

– Архітектура та будівництво: виведення тривимірних моделей будівель або елементів конструкції у реальному масштабі допомагає студентам краще уявити кінцевий результат проєктування.

– Програмування і розробка ПЗ: студенти можуть створювати власні AR-об’єкти та керувати їх поведінкою через написаний код, що сприяє міждисциплінарному підходу до навчання [14].

Приклади застосування VR:

– Симуляція складних технологічних процесів: у віртуальному середовищі можливо моделювати роботу заводських установок, виробничих ліній, гідравлічних систем тощо, що є надзвичайно ефективним у професійній підготовці інженерів.

– Навчання безпеці праці: VR-сценарії дають змогу тренувати дії у небезпечних ситуаціях (пожежа, витік газу, обвал) без ризику для здоров'я.

– Авіаційні та транспортні тренажери: пілоти, водії спецтехніки та диспетчери проходять підготовку у віртуальних кабінах з реалістичною поведінкою систем і середовища.

– Навчання в умовах, недоступних у реальності: VR дозволяє відвідати атомну станцію, зайти всередину космічного апарату або зануритися в океанську глибину – все це важко або неможливо реалізувати на практиці [15].

AR, так і VR мають широку сферу застосування в освітніх технологіях. Вибір між ними залежить від цілей навчання: AR доцільніше використовувати у випадках, коли потрібно інтегрувати цифрову інформацію з реальним об'єктом, тоді як VR оптимально підходить для повного занурення у змодельоване середовище.

2.2 Типологія систем доповненої реальності та їх функціональні особливості

Системи доповненої реальності (AR) класифікуються за принципами взаємодії віртуального контенту з реальним світом. Основу такої класифікації становлять механізми розпізнавання та прив'язки цифрових об'єктів до фізичного простору. У сучасній практиці виділяють чотири основні типи AR-систем: marker-based, markerless, location-based, projection-based. Кожен з них має свої технічні особливості, сценарії використання та вимоги до середовища [16].

1. Marker-based AR (AR на основі маркерів)

Принцип роботи:

Цей тип систем використовує заздалегідь визначені маркери — спеціальні візуальні зображення (наприклад, QR-коди, чорно-білі фігури, логотипи), які

камера пристрою розпізнає як орієнтири. Після ідентифікації маркера система накладає на нього віртуальний об’єкт.

Технічні характеристики:

– Висока точність розміщення віртуального контенту.

– Необхідність наявності маркерів у кадрі.

– Чутливість до освітлення та кута огляду.

Приклади використання:

– AR Flashcards – додаток для вивчення англійських слів з виведенням 3D-моделей на маркери-картки.

– Unity + Vuforia – популярна комбінація для створення додатків з маркерним розпізнаванням в інженерній освіті.

2. Markerless AR (безмаркерна AR / AR на основі трекінгу поверхні)

Принцип роботи:

У markerless-системах використовуються дані з камери, гіроскопа, акселерометра та GPS для визначення положення пристрою у просторі. Замість маркерів система аналізує особливості поверхонь, світла, тіней та просторових структур.

Технічні характеристики:

– Висока гнучкість і мобільність.

– Працює у будь-якому середовищі без підготовки простору.

– Вимагає потужного пристрою та стабільного освітлення.

Приклади використання:

– ARKit (Apple) та ARCore (Google) – найбільш розповсюджені платформи для markerless-реалізацій.

– IKEA Place – додаток, що дозволяє віртуально розміщувати меблі у кімнаті.

3. Location-based AR (геолокаційна доповнена реальність)

Принцип роботи:

Цей тип AR прив’язує віртуальний контент до конкретних географічних координат за допомогою GPS, компаса та мобільного інтернету. Віртуальні об'єкти з’являються лише тоді, коли користувач перебуває у визначеній точці простору.

Технічні характеристики:

– Висока актуальність для зовнішнього використання.

– Потребує точних геоданих і стабільного зв’язку.

– Обмежена точність у приміщеннях.

Приклади використання:

– Pokémon GO – найвідоміший приклад location-based AR, де об’єкти «з’являються» у реальному місті.

– Google Maps Live View – навігація з доповненою реальністю, яка використовує положення користувача для орієнтації в просторі.

4. Projection-based AR (AR на основі проєкцій)

Принцип роботи:

Цей тип AR створює віртуальні об’єкти безпосередньо на фізичних поверхнях за допомогою проєкторів. У деяких випадках використовується інтерактивна проєкція – система фіксує рухи користувача або дотики до проєктованого зображення.

Технічні характеристики:

– Не потребує екранів або носимих пристроїв.

– Може бути використаний у спільному просторі для кількох користувачів.

– Вимагає точної калібровки та спеціального обладнання.

Приклади використання:

– Interactive tables у музеях – для демонстрації історичних подій чи інженерних схем.

– Touchless AR-дисплеї в медичних закладах – де важлива стерильність та мінімізація фізичного контакту.

Кожен тип AR-систем має свої сильні сторони, які визначають їх застосування в різних сферах освіти. У контексті технічних спеціальностей найбільш поширеними та доцільними є markerless та marker-based системи, оскільки вони дозволяють інтерактивно взаємодіяти з навчальними моделями у просторі аудиторій та лабораторій. У свою чергу, location-based AR є ефективною у задачах навігації або польового навчання, а projection-based – у презентаціях та групових заняттях [17].

2.3 Система візуального позиціонування (VPS) та її застосування в AR-освіті

Система візуального позиціонування (VPS, Visual Positioning System) – це технологія, яка дозволяє точно визначати просторове положення пристрою в реальному середовищі за допомогою аналізу зображень з камери, а не лише GPS, гіроскопа чи акселерометра. На відміну від супутникового позиціонування, VPS забезпечує високу точність (до кількох сантиметрів) навіть у закритих приміщеннях або урбанізованих просторах, де традиційні методи локалізації втрачають ефективність.

VPS використовує алгоритми комп’ютерного зору та просторового аналізу (зокрема технології SLAM – Simultaneous Localization and Mapping) для порівняння зображення, отриманого з камери пристрою, з попередньо збереженою картою навколишнього середовища. Ця карта складається з великої кількості візуальних орієнтирів – характерних елементів, таких як контури будівель, текстури поверхонь, розміщення об’єктів, тощо.

Основні етапи роботи VPS:

1. Збір візуальних даних з камери пристрою.
2. Розпізнавання ключових особливостей середовища.
3. Зіставлення з хмарною або локальною картою орієнтирів.
4. Розрахунок точного положення та орієнтації пристрою у просторі.

Завдяки цьому AR-додаток може «закріпити» віртуальні об’єкти у фізичному середовищі, незалежно від положення або руху користувача.

В освітньому процесі VPS відкриває нові можливості для створення стабільних та масштабних AR-сценаріїв, які залишаються прив’язаними до конкретного простору. Це особливо корисно у навчальних закладах, лабораторіях, музеях, інженерних центрах тощо [18].

Основні напрямки використання VPS у навчанні:

AR-навігація в кампусах та лабораторіях – системи можуть виводити маршрут до потрібного кабінету, лабораторії або обладнання з вказівками та підказками у доповненій реальності (рис. 2.2).



Рисунок 2.2 – AR-навігація в кампусі

Закріплення AR-об’єктів у навчальному середовищі – наприклад, віртуальна модель електричної схеми завжди з’являється на певному столі, незалежно від того, хто її переглядає (рис. 2.3).

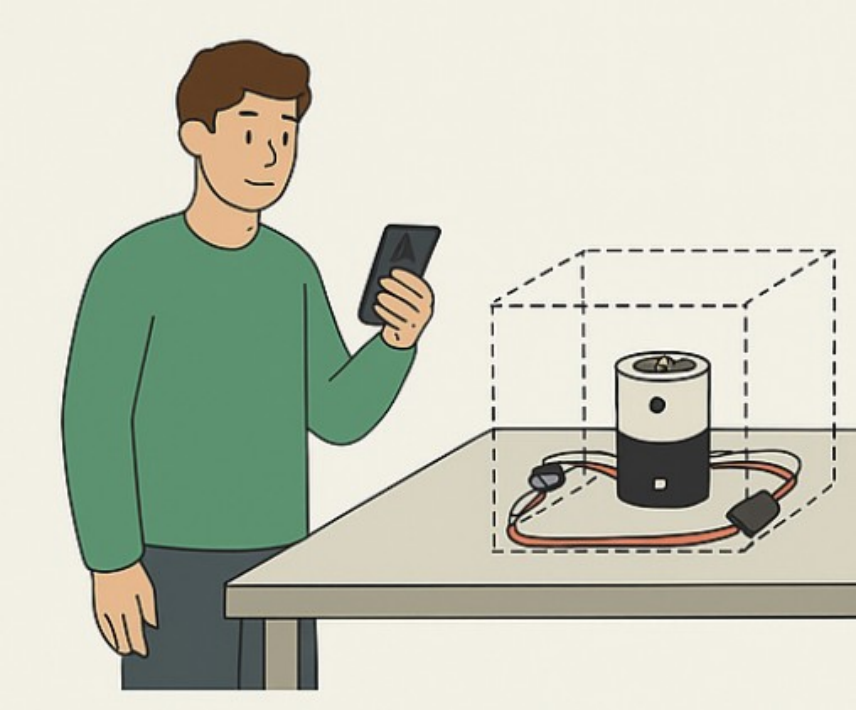


Рисунок 2.3 – Закріплення AR-об’єктів

Групова взаємодія з AR-контентом – кілька студентів можуть одночасно бачити та працювати з одним і тим самим віртуальним об'єктом, синхронізованим через VPS (рис. 2.4).



Рисунок 2.4 – Групова взаємодія з AR-контентом

Освітній туризм і контекстне навчання – відтворення історичних реконструкцій, технічних об'єктів або експозицій у музеях з прив’язкою до конкретного місця (рис. 2.5).

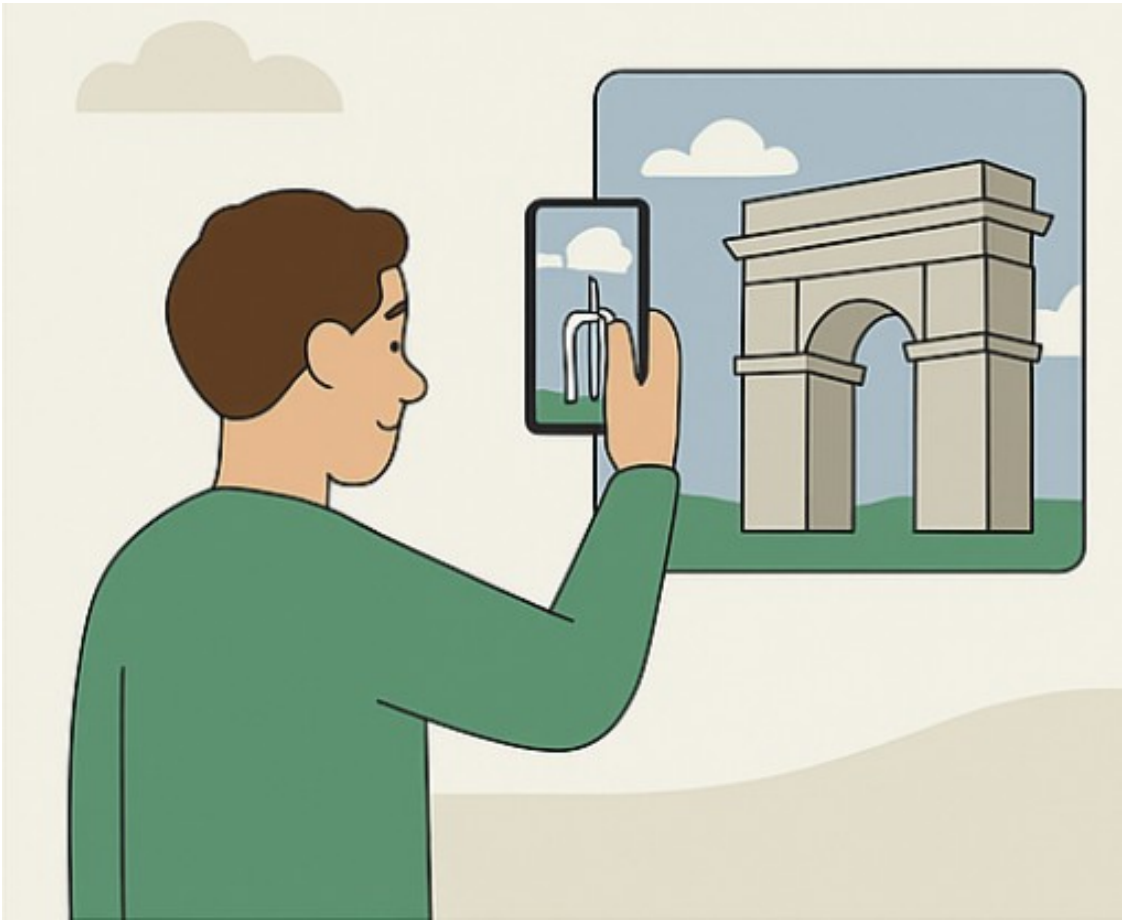


Рисунок 2.5 – Контекстне навчання

Реальні приклади:

– Google VPS у складі *AR Live View* у Google Maps – орієнтування в міських умовах з накладанням інструкцій.

– Niantic Lightship VPS – використовується для ігрових та освітніх AR-додатків з точним позиціонуванням у просторі.

– Snap AR Cloud – технологія для створення спільного AR-досвіду в навчальних центрах або університетських аудиторіях.

2.4 Використання технології внутрішньої AR-навігації у навчальних закладах

Внутрішня AR-навігація (Indoor AR Navigation) – це технологічне рішення, що дозволяє здійснювати навігацію всередині будівель із використанням доповненої реальності. На відміну від традиційних навігаційних систем, які працюють на базі супутникових GPS-сигналів, внутрішня навігація використовує альтернативні методи позиціонування, оскільки супутникові сигнали не проникають у приміщення з належною точністю.

Принципи роботи Indoor AR-навігації

Для реалізації точного визначення позиції користувача у приміщенні застосовуються такі технології:

– VPS (Visual Positioning System) – розпізнає простір за допомогою камери та візуальних орієнтирів (наприклад, вікон, меблів, текстур стін).

– Bluetooth-маяки (BLE Beacons) – невеликі пристрої, що передають сигнал на обмеженій відстані для визначення локації пристрою.

– Wi-Fi-триангуляція – визначає положення користувача за рівнем сигналу від кількох точок доступу Wi-Fi.

– SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) – одночасна побудова карти приміщення та позиціонування в ньому [18].

Після визначення місцезнаходження, система накладає AR-інтерфейс – віртуальні стрілки, позначки, інформаційні вікна або маршрут на зображення реального середовища, яке бачить користувач через камеру смартфона або AR-окуляри.

Для ефективної реалізації внутрішньої AR-навігації в навчальних приміщеннях необхідна надійна система визначення місцезнаходження пристрою. Оскільки традиційна GPS-навігація не забезпечує необхідної точності всередині будівель, використовуються альтернативні технології, які дозволяють забезпечити просторову прив’язку доповненої реальності до фізичного середовища.

Найпоширенішими з них є Bluetooth-маяки (beacons), Wi-Fi-триангуляція та SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) [20].

1. Bluetooth-маяки (BLE Beacons)

Суть технології:

BLE-маяки (Bluetooth Low Energy) — це малі радіопередавачі, які періодично надсилають сигнали з унікальним ідентифікатором. Смартфон або інший пристрій приймає ці сигнали і, залежно від їх потужності та інтенсивності, оцінює відстань до маяка.

Переваги:

– Простота встановлення.

– Низьке енергоспоживання.

– Можливість зонування простору з точністю до 1–2 метрів.

Недоліки:

– Обмежена точність для складних маршрутів.

– Необхідність регулярного обслуговування (заміна батарей).

Освітнє застосування:

– Навігація між корпусами або поверхами.

– Автоматичне виведення контенту AR при наближенні до навчального об’єкта.

2. Wi-Fi-триангуляція

Суть технології:

Wi-Fi-позиціонування ґрунтується на аналізі сили сигналу (RSSI) з кількох точок доступу. Пристрій розраховує своє місцезнаходження, використовуючи метод триангуляції за відстанями до щонайменше трьох Wi-Fi-джерел.

Переваги:

– Використання вже наявної інфраструктури (точок доступу).

– Не потребує додаткового обладнання.

Недоліки:

– Низька точність у багатоповерхових і складних будівлях (від 3 до 10 м).

– Схильність до перешкод (стіни, люди, меблі).

Освітнє застосування:

– Загальна орієнтація у кампусі.

– Активація тематичних AR-сценаріїв у зоні дії певної аудиторії або лабораторії.

3. SLAM (Simultaneous Localization and Mapping)

Суть технології:

SLAM — це алгоритм, що дозволяє пристрою одночасно будувати карту простору та визначати власну позицію в ньому. Система аналізує відеопотік з камери, виділяє ключові особливості (текстури, контури, об’єкти) і використовує їх для навігації.

Переваги:

– Висока точність позиціонування (до сантиметрів).

– Не потребує зовнішніх джерел (маяків чи Wi-Fi).

– Добре працює у складних приміщеннях.

Недоліки:

– Велике навантаження на процесор.

– Потребує потужного пристрою з камерою високої якості.

Освітнє застосування:

– Стабільне розміщення AR-об’єктів у просторі аудиторії.

– Створення багатокористувацьких AR-сценаріїв (наприклад, лабораторні практикуми з віртуальним обладнанням).

Для забезпечення точного та надійного позиціонування в AR-навігації доцільним є використання гібридного підходу, який комбінує переваги кількох технологій (наприклад, SLAM + BLE або Wi-Fi + VPS) [19]. У контексті навчальних закладів та технічної освіти такі системи дозволяють реалізувати

інноваційні методи навігації, автоматичного доступу до навчальних ресурсів та просторової взаємодії з AR-контентом (табл. 2.1).

Таблиця 2.1 – Порівняльна характеристика технологій внутрішнього позиціонування для AR-навігації

Технологія	Принцип роботи	Переваги	Недоліки	Освітнє застосування
Bluetooth Beacons	Оцінка відстані до маяків за силою Bluetooth-сигналу	Простота, низьке енергоспоживання, точність 1–2 м	Потребує встановлення маяків і заміни батарей	Орієнтація між аудиторіями, запуск AR-контенту поблизу
Wi-Fi тріангуляція	Визначення місцезнаходження за рівнем сигналу від кількох Wi-Fi точок	Використання наявної Wi-Fi-мережі, мінімальні витрати	Низька точність, вплив перешкод	Автоматичне завантаження навчального матеріалу у зонах покриття
SLAM	Одночасне створення карти простору та визначення позиції на її основі з відеопотоку	Висока точність, не потребує зовнішньої інфраструктури	Потребує потужного пристрою та ресурсомісткий	AR-лабораторії, віртуальні інструкції, точна фіксація моделей

Висновок до розділу 2

Досліджено навігаційних систем, що використовуються в технологіях доповненої реальності (AR), з акцентом на їхню роль у побудові інтерактивного освітнього середовища. На основі порівняльного аналізу доповненої та віртуальної реальності встановлено, що AR має значну перевагу для використання в технічній освіті завдяки можливості поєднання реального контексту із віртуальними елементами, меншій вартості впровадження та вищій доступності.

Проаналізовано основні типи AR-систем — marker-based, markerless, location-based та projection-based, — кожен з яких має свої переваги та доцільність застосування в різних освітніх сценаріях. Особливу увагу приділено системі візуального позиціонування (VPS), яка є критично важливою для точного та стабільного розміщення віртуальних об'єктів у просторі. Застосування VPS в освіті дозволяє реалізовувати адаптивні, контекстні та групові AR-сценарії з високою точністю позиціонування.

Розглянуто можливості внутрішньої AR-навігації, яка базується на сучасних технологіях локалізації, зокрема Bluetooth-маяках, Wi-Fi-триангуляції та SLAM-алгоритмах. Ці технології дають змогу реалізувати персоналізовану навігацію в межах навчальних закладів, автоматизовану доставку навчального контенту, а також інклюзивні рішення для студентів з особливими потребами.

3 РОЗРОБКА AR-ЗАСТОСУНКУ ДЛЯ НАВЧАЛЬНИХ СИМУЛЯЦІЙ: МЕТОДИ ТА ІНСТРУМЕНТИ

3.1 Вибір технологічного стеку та програмного забезпечення для AR-додатків

Одним із популярних підходів до реалізації внутрішньої AR-навігації є використання маяків Bluetooth Low Energy (BLE), які періодично передають сигнали, що дозволяють визначити приблизне місцезнаходження користувача. Ця технологія набула широкого застосування завдяки своїй простоті впровадження та відносно невисокій вартості. Відомим прикладом її використання є система навігації в аеропорту Гатвік (Велика Британія), де було встановлено понад 2000 BLE-маяків. Система заявляє про досягнення точності позиціонування на рівні ±3 метри.

Проте попри перспективність, підхід має низку суттєвих обмежень:

1. Обмежена точність – гідно з офіційною документацією Apple, сигнали маяків забезпечують лише орієнтовне визначення відстані. Для коректної тріангуляції потрібна наявність принаймні трьох активних маяків у полі дії, і навіть у такому випадку похибка може бути значною, що унеможливлює використання такого рішення в середовищах, де необхідна висока точність.

2. **Інфраструктурні витрати** – Вартість одного BLE-маяка коливається в межах 10–20 доларів США. Окрім того, пристрої потребують періодичної заміни батарей (у середньому раз на 1–2 роки), що створює додаткове навантаження на обслуговування системи.

3. Обмежений робочий діапазон – Залежно від конфігурації, маяки можуть працювати на відстані від 10 до 100 метрів, що вимагає ретельного планування їхнього розташування в приміщенні [21].

Таким чином, використання BLE-маяків і технології Wi-Fi RTT може бути доцільним лише в умовах, де є можливість забезпечити щільне розміщення

датчиків, а також наявні ресурси для їх регулярного обслуговування. В інших випадках ефективність цього рішення може бути обмеженою.

Внутрішня навігація на основі вбудованих мобільних датчиків

Ще одним підходом до реалізації внутрішньої навігації є використання вбудованих датчиків мобільних пристроїв (акселерометри, гіроскопи, магнітометри). Цей метод базується на аналізі електромагнітного поля в оточенні користувача та побудові так званої «магнітної карти» приміщення.

Основні недоліки цього підходу:

- *Нестабільність магнітного поля.* Електромагнітне середовище в приміщеннях може змінюватися внаслідок зовнішніх факторів (електроніка, металеві конструкції, тощо), що знижує точність позиціонування.
- *Необхідність регулярного оновлення карти.* Для збереження точності навігації потрібне періодичне повторне сканування приміщень і оновлення даних. Через нестабільність магнітного фону та потребу в повторній калібровці цей підхід не підходить для динамічних або масштабних середовищ.

AR-навігація з використанням хмарного збереження візуального середовища

Інноваційним рішенням є використання хмарних сервісів для збереження візуальних прив’язок до фізичного середовища. Наприклад, Google пропонує інструменти для створення спільних AR-просторів, у яких кілька користувачів можуть бачити і взаємодіяти з одними й тими ж віртуальними об’єктами. Сцена формується на основі зображень із камери пристрою, а її положення зберігається в хмарі [22].

Однак даний підхід має обмеження:

- На момент написання роботи хмарні прив’язки автоматично видаляються через 24 години після створення. Хоча Google працює над впровадженням довготривалих прив’язок, ця функція ще перебуває в розробці.
- Без надійного мережевого доступу AR-сцена може не завантажитися або втратити точність.
- Уніфіковані або схожі візуальні простори (наприклад, офісні

коридори) можуть призвести до помилок позиціонування, оскільки система не завжди точно ідентифікує локацію.

Попри сучасність і потенціал, це рішення ефективне переважно у стабільному мережевому середовищі з чітко структурованими, візуально унікальними об’єктами.

Найбільш ефективним підходом, який ми обрали для реалізації внутрішньої навігації в AR-додатку, є використання візуальних маркерів (AR markers або ARReferenceImage). Цей метод базується на обробці зображень, зафіксованих камерою мобільного пристрою, і дозволяє точно визначати положення об'єктів у просторі за рахунок їх візуальної ідентифікації [21-22].

Суть технології полягає в тому, що камера розпізнає заздалегідь визначене зображення (маркер), після чого система доповненої реальності, така як Apple ARKit, Google ARCore чи інші AR SDK, використовує цю прив'язку для розміщення віртуального контенту у фізичному середовищі. Цей метод не потребує додаткової апаратної інфраструктури — достатньо лише камери смартфона.

Переваги підходу:

- Використання візуальних маркерів дозволяє досягти стабільного позиціонування в межах видимості камери.
- Метод сумісний із провідними платформами мобільної AR.
- Не потрібні додаткові датчики чи пристрої, окрім вбудованої камери.

Особливості реалізації на мобільних пристроях:

Мобільні пристрої є зручною платформою для реалізації AR через наявність потужних камер і вбудованих сенсорів — акселерометрів, магнітометрів, гіроскопів, GPS. Вони дозволяють точно відслідковувати положення пристрою у просторі, доповнюючи обчислення положення маркерів.

У рамках мобільної доповненої реальності користувач спостерігає реальний світ через екран пристрою, а віртуальні об’єкти накладаються на відеопотік у реальному часі. При цьому, якщо об'єкти мають бути інтегровані з реальними фізичними координатами (наприклад, віртуальна будівля на реальному пустирі),

потрібне додаткове калібрування — або через маркери, або за допомогою технологій розпізнавання навколишнього середовища.

Таким чином, використання візуальних маркерів забезпечує баланс між точністю, простотою впровадження та апаратною доступністю, що робить цей підхід оптимальним для мобільних AR-рішень внутрішньої навігації.



Рисунок 3.1 – Візуалізація елементів AR на мобільному пристрої

Візуальні маркери можуть бути представлені у вигляді заздалегідь підготовлених зображень, простих тривимірних геометричних фігур або реальних об'єктів, розпізнавання яких здійснюється за допомогою алгоритмів комп’ютерного зору. Для досягнення реалістичної інтеграції віртуальних об’єктів у реальне середовище AR-системам необхідне точне та стабільне відстеження просторового положення користувача [23].

Найпоширенішим підходом у мобільних AR-рішеннях є поєднання даних з кількох джерел: візуального потоку з камери та інформації з вбудованих сенсорів (акселерометра, гіроскопа, магнітометра, GPS). На відкритому просторі широко використовуються GPS-технології — попри обмежену точність, вони дозволяють

приблизно визначити координати користувача. Для підвищення точності орієнтації GPS комбінується з інерційними датчиками, що дозволяє ефективно звужувати область інтересу для обробки зображення.

У приміщеннях, де GPS працює ненадійно або зовсім не працює, застосовуються гібридні рішення, що поєднують візуальне та інерційне відстеження.

Ці методи мають комплементарні властивості [24]:

1) Візуальне відстеження працює ефективно при повільному русі, але втрачає стабільність при динамічних змінах сцени.

2) Інерційні методи демонструють високу продуктивність при швидкому переміщенні, але можуть страждати від накопичення помилок (дрейфу) при повільному русі.

Тому в сучасних AR-системах часто використовується спільна обробка даних з камери та сенсорів, що дозволяє досягти стабільного результату незалежно від умов використання.

Окрему нішу займають системи, що працюють виключно на основі комп'ютерного зору. Вони демонструють добрі результати в контрольованих середовищах (наприклад, виставкових просторах), але у відкритому середовищі зі змінним освітленням, відблисками чи перешкодами точність може суттєво знижуватись.

Прикладом високотехнологічної системи є Google Goggles — рішення, здатне розпізнавати прості форми (штрих-коди, книги), а також орієнтуватися в просторі завдяки синхронному використанню GPS та акселерометрів, що дозволяє визначати напрямок погляду та зону інтересу користувача.

Крім практичного застосування у навігації, технології доповненої реальності дедалі активніше впроваджуються в освітній процес. Зокрема, проєкт Magic Book, розроблений Марком Біллінгхерстом (Mark Billinghurst), є прикладом AR-книги, сторінки якої містять маркери, що активують віртуальні елементи, перетворюючи читання на інтерактивний досвід.

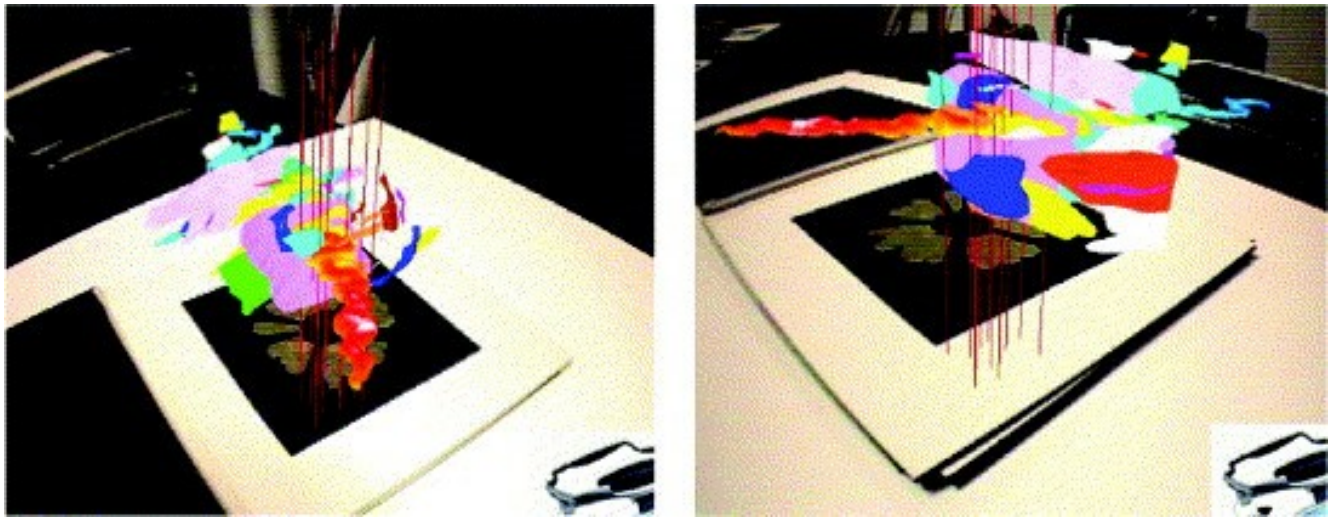


Рисунок 3.2 – Приклад використання доповненої реальності в інтерактивному навчанні

Доповнена реальність відкриває нові можливості в розробці інтерактивних ігрових програм, забезпечуючи глибше занурення користувача у віртуальний контент. Завдяки використанню анімації, мультимедійних елементів та взаємодії з фізичним простором, AR-ігри не лише підвищують інтерес до ігрового процесу, а й можуть виконувати освітні або тренувальні функції [25].

У сфері геоінформаційних систем (ГІС) та картографії AR також набуває значного поширення. Сучасні мобільні пристрої, оснащені датчиками положення, камерами та GPS-модулями, дозволяють створювати рішення, які ідентифікують об’єкти навколо користувача в реальному часі. Це значно полегшує орієнтацію в незнайомому середовищі та забезпечує контекстно-залежну інформацію.

Прикладом такого застосування є сервіс Nokia City Lens, який, використовуючи камеру смартфона, дозволяє отримувати візуалізовану інформацію про об’єкти поблизу — кафе, готелі, ресторани, визначні місця тощо. Дані накладаються поверх реального зображення на екрані пристрою, створюючи зручну AR-навігацію (рис. 3.3).



Рисунок 3.3 – Застосування доповненої реальності для геолокаційної навігації в міському середовищі

OpenCV (Open Source Computer Vision Library) — це потужна бібліотека з відкритим кодом, яка надає широкі можливості для реалізації алгоритмів комп'ютерного зору та обробки зображень. Вона написана на мовах C/C++ і підтримує обгортки для Python, Java, Ruby, MATLAB, Lua та інших мов програмування. OpenCV активно застосовується як в академічних дослідженнях, так і в комерційних розробках завдяки відкритій BSD-ліцензії. Основні функції бібліотеки включають розпізнавання об'єктів, трекінг, аналіз відеопотоку, обробку зображень та інші чисельні алгоритми [23-26].

Vuforia SDK — це популярне програмне рішення для створення мобільних AR-додатків, яке використовує методи комп'ютерного зору для розпізнавання та відстеження двовимірних зображень і простих тривимірних об'єктів у реальному часі. Основна функціональність Vuforia полягає в реєстрації зображень та точному визначенні положення й орієнтації віртуальних об'єктів у реальному світі.

При спостереженні через камеру мобільного пристрою, віртуальні 3D-

моделі, прив’язані до розпізнаних маркерів, виглядають інтегрованими в реальне середовище, зберігаючи правильну перспективу при зміні положення користувача. Завдяки цій властивості Vuforia дозволяє створювати переконливі AR-сцени з високою точністю візуального суміщення.

Можливості та сумісність Vuforia SDK

Однією з ключових переваг Vuforia SDK є підтримка широкого спектра цільових об’єктів — як двовимірних (2D), так і тривимірних (3D), включаючи безмаркерні (markerless) цілі. Крім базового розпізнавання, SDK надає інструменти для реалізації розширеної взаємодії, зокрема [26]:

- виявлення оклюзій через "віртуальні кнопки",
- динамічне створення та оновлення цільових об’єктів під час виконання,
- використання зображень для вибору або активації цільових елементів.

Vuforia забезпечує кросплатформену підтримку завдяки API для C++, Java, Objective-C та .NET, а також має повноцінне розширення для ігрового рушія Unity. Це дає змогу створювати AR-додатки, які легко адаптуються як для Android, так і для iOS, без необхідності суттєвих змін у коді.

Розроблені на базі Vuforia додатки підтримуються широким спектром мобільних пристроїв — від iPhone та iPad до Android-смартфонів і планшетів з версією ОС Android 2.2 або вище, а також процесорами ARMv6 / ARMv7 з підтримкою FPU.

ARToolKit та Metaio SDK: огляд інструментів для створення AR-додатків ARToolKit — це одна з перших бібліотек для створення застосунків з доповненою реальністю, яка реалізує комп’ютерне відстеження за допомогою маркерів. Основна функціональність ARToolKit полягає у визначенні положення та орієнтації камери відносно фізичного квадратного маркера в режимі реального часу. Як тільки реальна позиція камери стає відомою, віртуальна камера може бути синхронізована з нею, і на маркер накладається відповідна 3D-модель.

Таким чином, ARToolKit вирішує дві ключові задачі доповненої реальності:

- відстеження положення (трекінг),
- суміщення віртуального та реального контенту з високою точністю.

ARToolKit був розроблений у 1999 році Хіроказу Като в Інституті науки і технологій префектури Нара (Японія) та вперше випущений у Лабораторії HIT при Вашингтонському університеті. Сьогодні він доступний як проєкт з відкритим кодом на платформі SourceForge, з можливістю придбання комерційної ліцензії через ARToolWorks. Завдяки простоті та гнучкості, бібліотека набула великої популярності — з 2004 року вона була завантажена понад 160 000 разів.

Metaio SDK — це ще одне середовище для розробки AR-додатків, орієнтоване переважно на мобільні пристрої. Бібліотека побудована на базі OpenGL та використовує методи SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) для підвищення точності позиціонування об’єктів у просторі без потреби у маркерах.

На момент активного розвитку Metaio SDK була потужним інструментом для створення AR-рішень у промисловості, маркетингу та освіті. Варто зазначити, що в 2015 році компанію Metaio придбала Apple, після чого технології SDK були частково інтегровані в екосистему ARKit для iOS-пристроїв [26].

3.2 Використання ARKit для інтеграції AR-симуляцій у середовище iOS

Попри те, що ARKit від Apple та ARCore від Google реалізують схожі методи комп’ютерного зору для побудови AR-сцени, зокрема аналіз площин, трекінг руху та виявлення глибини, ARKit часто вважається технологічно перевагливішим рішенням, особливо у сфері навігаційних AR-додатків.

Ключова перевага ARKit полягає в глибокій інтеграції апаратного та програмного забезпечення. Apple має повний контроль над виробництвом iPhone і iPad, а також над розробкою операційної системи iOS. Це дозволяє створювати високий рівень оптимізації та стабільності, оскільки розробники працюють у суворо визначеному середовищі з мінімальними варіаціями в продуктивності пристроїв [27].

Ще однією важливою відмінністю між ARKit та ARCore є рівень взаємодії з апаратним забезпеченням та наявність підтримки глибини сцени. ARKit інтегрує

LiDAR-сканер, що дозволяє значно покращити точність аналізу простору, тоді як більшість Android-пристроїв із ARCore не мають відповідних сенсорів. Архітектурні відмінності між платформами докладно представлені на рисунку 3.4.

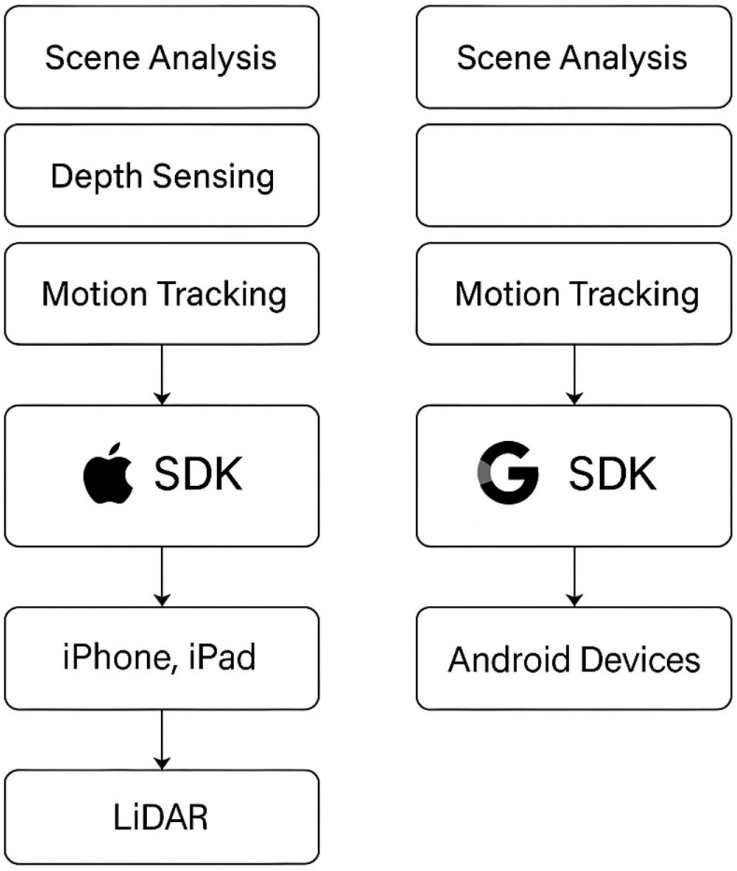


Рисунок 3.4 – Архітектурне порівняння мобільних платформ доповненої реальності ARKit та ARCore

У порівнянні з цим, ARCore функціонує в екосистемі Android, яка характеризується широким розмаїттям пристроїв від різних виробників з різними технічними характеристиками. Через це забезпечити однакову якість AR-досвіду на всіх пристроях значно складніше [28].

Ще однією значущою перевагою ARKit є використання LiDAR-сканера, який присутній у деяких моделях iPhone та iPad Pro. LiDAR забезпечує точне вимірювання глибини сцени, що дозволяє ARKit швидко й точно ідентифікувати об’єкти, оцінювати відстань до них та будувати просторову карту середовища. Це значно покращує стабільність і швидкодію AR-навігації, особливо в складних або

слабоосвітлених умовах.

Таким чином, хоча обидві платформи використовують подібні технічні підходи, інтеграція LiDAR, однорідність апаратного забезпечення та оптимізоване середовище розробки надають ARKit відчутну перевагу в реалізації точних і стабільних навігаційних AR-рішень. Фрагмент коду демонструє створення базової AR-сцени з виявленням горизонтальних площин у середовищі за допомогою ARKit.

```swift
import ARKit
import SceneKit

class ViewController: UIViewController, ARSCNViewDelegate {
    @IBOutlet var sceneView: ARSCNView!

    override func viewDidLoad() {
        super.viewDidLoad()
        let scene = SCNScene()
        sceneView.scene = scene
    }

    override func viewWillAppear(_ animated: Bool) {
        super.viewWillAppear(animated)
        let configuration = ARWorldTrackingConfiguration()
        configuration.planeDetection = .horizontal
        sceneView.session.run(configuration)
    }
}
```

Рисунок 3.5 – Приклад ініціалізації AR-сесії з горизонтальним трекінгом у ARKit (Swift)

На рисунку 3.6 продемонстровано фрагмент коду, що реалізує оновлення AR-сцени та обробку виявлених площин у середовищі ARCore на мові Kotlin [29].

```kotlin
override fun onUpdate(frameTime: FrameTime) {
    val frame = arFragment.arSceneView.arFrame ?: return
    val updatedPlanes = frame.getUpdatedTrackables(Plane::class.java)
    for (plane in updatedPlanes) {
        if (plane.trackingState == TrackingState.TRACKING) {
            // Реакція на виявлену площину
        }
    }
}
```

Рисунок 3.6 – Виявлення площини у ARCore (Kotlin)

3.3 Реалізація AR-навчання на пристроях Android за допомогою ARCore

ARCore — це набір інструментів доповненої реальності від компанії Google, створений для забезпечення широкої підтримки AR на мобільних пристроях з операційною системою Android версії 7.0 Nougat і вище. Мета цієї технології полягає у забезпеченні масштабованої, кросплатформеної екосистеми, що дозволяє розробляти AR-додатки без потреби у спеціальному апаратному забезпеченні, як це було у попередньому проєкті Google — Project Tango [30].

Подібно до ARKit, ARCore забезпечує три ключові функціональні можливості:

1. Відстеження руху (Motion Tracking): використовуючи дані з камери та IMU-датчиків (інерційних вимірювальних модулів), ARCore визначає положення пристрою в просторі.
2. Виявлення площин (Plane Detection): система виявляє горизонтальні поверхні (наприклад, підлогу чи стіл), що дозволяє точно розміщувати віртуальні об’єкти.
3. Оцінка освітлення (Light Estimation): ARCore аналізує рівень освітлення у середовищі та адаптує віртуальні об’єкти відповідно до реальних світлових умов.

Ключовими функціональними модулями ARCore є трекінг руху, виявлення площин та оцінка рівня освітлення. Вони працюють у тісному зв’язку з даними, що надходять із камери та сенсорів мобільного пристрою. Архітектурна структура

взаємодії цих компонентів представлена на рисунку 3.7.

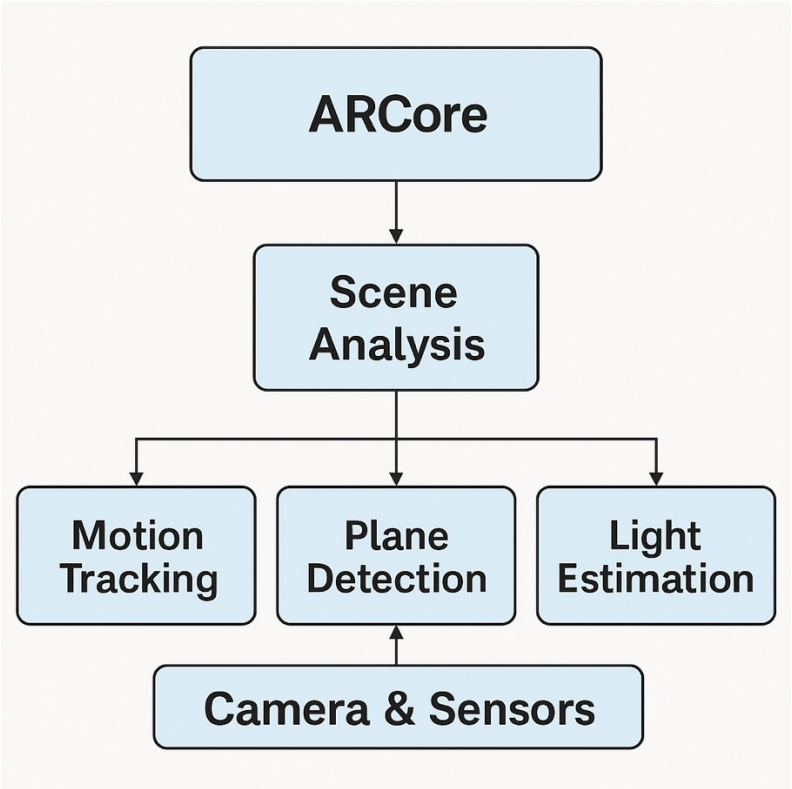


Рисунок 3.7 – Основні компоненти системи ARCore

ARCore дозволяє створювати стійкі AR-сцени, в яких віртуальні об’єкти зберігають своє положення навіть після переміщення або повторного входу користувача в ту ж кімнату. Це досягається завдяки створенню внутрішньої карти простору та використанню технологій SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) [31].

```kotlin
// Оновлення AR-сцени та збереження позиції об’єкта
override fun onUpdate(frameTime: FrameTime) {
    val frame = arFragment.arSceneView.arFrame ?: return
    val updatedPlanes = frame.getUpdatedTrackables(Plane::class.java)
    for (plane in updatedPlanes) {
        if (plane.trackingState == TrackingState.TRACKING) {
            // Площина доступна для розміщення об’єктів
        }
    }
}
```

Рисунок 3.8 – Виявлення площини та оновлення просторових координат у ARCore (Kotlin)

На рисунку продемонстровано базовий фрагмент коду, що відповідає за трекінг площин та оновлення AR-сцени в реальному часі.

ARCore та доповнена реальність у вебсередовищі

Окремим напрямом розвитку ARCore є впровадження можливостей доповненої реальності у веб-браузери. Google розглядає веб як критичну платформу для розвитку AR-досвіду, оскільки вона дозволяє створювати кросплатформені рішення, доступні з будь-якого пристрою без встановлення окремих додатків [31-32].

У рамках цього підходу Google розробила експериментальний веб-браузер із підтримкою WebAR, що дозволяє веб-розробникам використовувати ARCore безпосередньо у браузері. Це відкриває перспективи створення інтерактивних веб-сайтів з AR-функціональністю, які будуть сумісні як з Android/ARCore, так і з iOS/ARKit.

Сучасний напрям розвитку доповненої реальності включає підтримку WebAR — використання AR-технологій безпосередньо у веб-браузерах. Це дозволяє розробникам створювати платформонезалежні додатки, які не потребують встановлення окремого ПЗ. Принцип взаємодії WebAR-додатків із системою ARCore подано на рисунку 3.9.

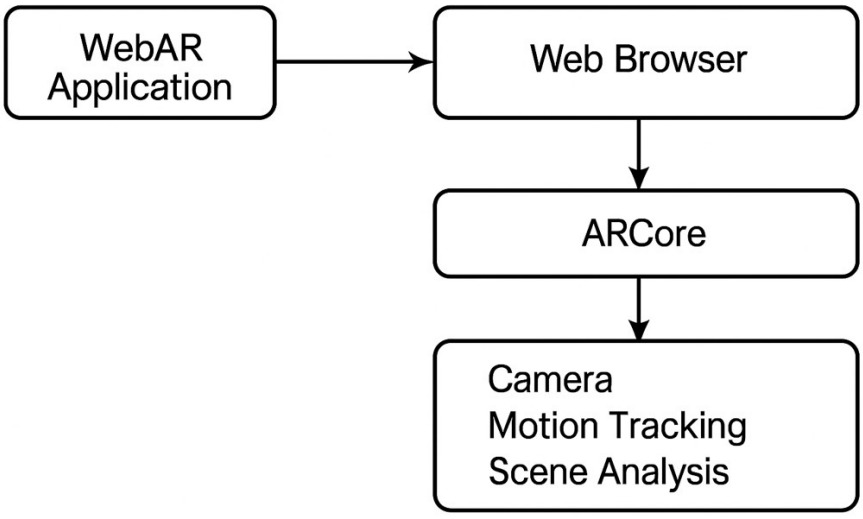


Рисунок 3.9 – WebAR: доповнена реальність у браузері

3.4 Створення та тестування прототипу навчального застосунку InfoPop

Візуальні маркери можуть допомогти покращити точність позиціонування всередині приміщення, особливо там, де GPS працює слабко. Принцип простий: кожен маркер має свій унікальний код, і коли камера його "бачить", система порівнює цей код з усім списком маркерів у базі. Проблема виникає тоді, коли таких маркерів занадто багато — це сповільнює пошук і загальну роботу додатку.

Це особливо помітно в масштабних об'єктах, наприклад, в університетах або великих торговельних мережах, де маркерів можуть бути тисячі, а додаток один — спільний для всіх локацій. У такій ситуації кожне розпізнавання займає більше часу, і навігація починає "гальмувати" [33].

Щоб цього уникнути, можна підключити GPS — не для точного позиціонування, а щоб визначити, в якому саме місці зараз користувач. Тоді додаток буде шукати лише серед маркерів, що стосуються конкретного магазину чи корпусу університету. Це значно пришвидшує роботу системи.

Ще одна проблема — зовнішній вигляд. Не всі бізнеси готові розміщувати маркери на стінах або полицях, бо це може псувати інтер’єр. У багатьох компаніях є строгі вимоги до дизайну, і зайві "наклейки" чи коди просто не впишуться у стиль.

У випадку магазинів електроніки використання візуальних маркерів також дозволяє швидко зорієнтуватися у просторі та знайти потрібний товар. На рисунку 4.2 представлено приклад спрощеної структури навігації до категорій техніки в комп’ютерному магазині.

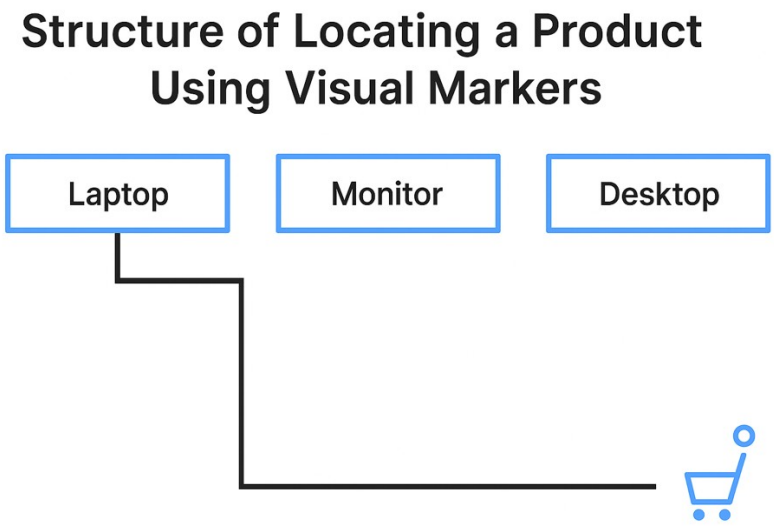


Рисунок 3.10 – Структура навігації до товарів у комп'ютерному магазині з використанням AR-маркерів

Схема демонструє приклад категоризації товарів (ноутбуки, монітори, комп'ютери) в AR-системі навігації з прив'язкою до візуальних маркерів, що допомагає користувачеві швидко знайти потрібний пристрій.

Wi-Fi RTT як альтернатива візуальним маркерам

Однією з потужних альтернатив візуальним маркерам для навігації в приміщенні є технологія Wi-Fi RTT (Round-Trip Time). Вона працює подібно до Bluetooth-маяків, але замість додаткових пристроїв використовує вже встановлені Wi-Fi маршрутизатори, які є в більшості будівель [34].

Основна перевага Wi-Fi RTT — це вища точність. Якщо традиційні системи Wi-Fi позиціонування дають точність у межах 5–15 метрів, то Wi-Fi RTT може зменшити цю похибку до 1–2 метрів, особливо якщо в зоні дії є щонайменше три маршрутизатори. Така точність досягається завдяки алгоритму багатолатерації, який аналізує час, за який сигнал доходить до точки доступу і повертається назад.

На відміну від візуальних маркерів, які вимагають постійно активної камери, Wi-Fi RTT працює у фоновому режимі. Це зручно, оскільки користувачеві не потрібно весь час тримати телефон перед собою, що особливо важливо при тривалих сеансах навігації.

Крім того, технологія інтегрується з Wi-Fi RTT API, що дозволяє додатку визначати відстань до точок доступу з підтримкою RTT або до інших пристроїв у мережі. Це дає змогу реалізувати гнучку та масштабовану AR-навігацію без встановлення додаткових сенсорів чи маяків.

Якщо пристрій може виміряти відстань щонайменше до трьох точок доступу Wi-Fi, система може визначити його положення в приміщенні за допомогою алгоритму мультилатерації. Це метод, який дозволяє обчислити координати пристрою, виходячи з різниці у відстанях до кожної з точок. При достатній кількості вимірювань точність такого визначення може досягати 1–2 метрів.

Завдяки цьому відкриваються нові можливості для створення точних сервісів на основі місцезнаходження, наприклад [34]:

- навігація всередині будівель;
- контекстні голосові команди (наприклад, “Увімкни це світло” — залежно від того, біля якої кімнати перебуває користувач);
- локальні маркетингові повідомлення (наприклад, “На цей товар є знижка”).

Важливо, що для вимірювання відстані пристрій не має підключатися до точки доступу. Достатньо просто знаходитися поруч — RTT працює на основі обміну службовими пакетами, що фіксують час їх проходження. Водночас, для збереження приватності даних, лише пристрій, який ініціює запит, отримує інформацію про відстань — сама точка доступу не зберігає жодних координат.

Робота Wi-Fi RTT ґрунтується на точних вимірюваннях часу, що забезпечуються технологією FTM (Fine Timing Measurement), яка стандартизована у IEEE 802.11-2016. Вимірюється час, за який пакет передається від пристрою до точки доступу і назад, а потім множиться на швидкість світла — саме так розраховується відстань.

Використання Wi-Fi RTT можливе лише в програмах, що працюють у передньому плані, оскільки Android обмежує доступ до цих функцій для програм у фоні — це зроблено з міркувань безпеки та енергозбереження.

UWB (Ultra-Wideband) — це перспективна технологія, яка може суттєво покращити точність позиціонування всередині будівель. Вона передає дані на дуже великій ширині частот, але з низькою потужністю, що дозволяє досягати високої точності без суттєвого енергоспоживання.

UWB працює за принципом **вимірювання часу прибуття сигналу (TDoA)**. Наприклад, якщо передавач UWB прикріплений до певного об'єкта (наприклад, посилки або смартфона), система може визначити його точне положення в просторі з точністю **до 10–30 см**.

Це значно краще, ніж у випадку Bluetooth-маяків (1–3 м) або Wi-Fi (5–15 м). До того ж, UWB дозволяє робити запити на визначення позиції **до 100 разів на секунду**, що робить його ідеальним для динамічних систем відстеження.

Цю технологію вже активно застосовують на складах і в логістиці — наприклад, для точного відстеження розміщення товарів. Але її потенціал не обмежується лише промисловістю. UWB може бути дуже корисною й у сфері **доповненої реальності**, зокрема для внутрішньої навігації в торгових центрах, аеропортах або великих будівлях.

Однак UWB має і свої обмеження:

- Сигнал **не проходить крізь стіни та перешкоди**, тому потрібно більше передавачів для стабільного покриття;
- Для її використання потрібні **спеціальні апаратні компоненти**, які ще не стали стандартом у більшості смартфонів;
- **API для розробників поки що обмежені**, але очікується, що в майбутньому вони стануть загальнодоступними.

UWB — це не універсальне рішення для всіх сфер, але **там, де потрібна максимальна точність і стабільність**, ця технологія має великі переваги. Її потенціал особливо великий у промислових умовах або для професійного використання всередині великих будівель [35].

Практичне тестування можливостей застосунку InfoPop у реальних умовах

InfoPop спочатку був розроблений для магазинів. Він допомагає показувати, де знаходяться товари, скільки вони коштують і як до них дістатися. Все для того, щоб покупець швидше знайшов потрібне.

Але з часом стало ясно — додаток можна використовувати не тільки в торгівлі. Його можна застосовувати в університетах, офісах, лікарнях — у будь-якому приміщенні, де важливо зорієнтуватися.

Найбільший плюс — він безкоштовний. Це рідкість, бо більшість подібних додатків коштують грошей. Але є і мінуси. Працює InfoPop тільки на айфонах і айпадах, починаючи з версії 14.

Інша проблема — він погано справляється з переміщенням між поверхами. Наприклад, якщо піднятися сходами, маршрут може "збитися". Щоб це виправити, можна розмістити QR-коди на кожному поверсі.

Людина сканує код — і додаток розуміє, де вона зараз. Тоді він може побудувати маршрут з урахуванням нового місця.

Також варто додати повідомлення типу: “Якщо не знайшли кабінет — можливо, він на іншому поверсі” [35].

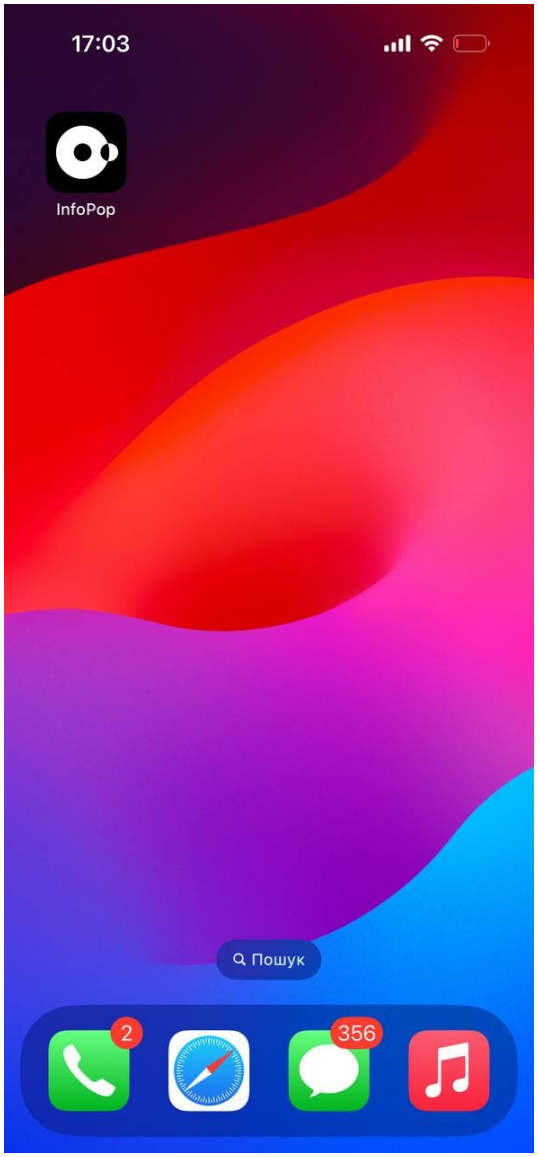


Рисунок 3.11 – Встановлений додаток InfoPoP

Щоб розпочати створення власної карти маршрутів у додатку InfoPop, спочатку потрібно зареєструватися. Для цього необхідно натиснути на іконку профілю у верхній частині екрана. Після цього відкриється форма входу або реєстрації, де користувач вводить свої дані — електронну пошту та пароль, або використовує наявний Apple ID.

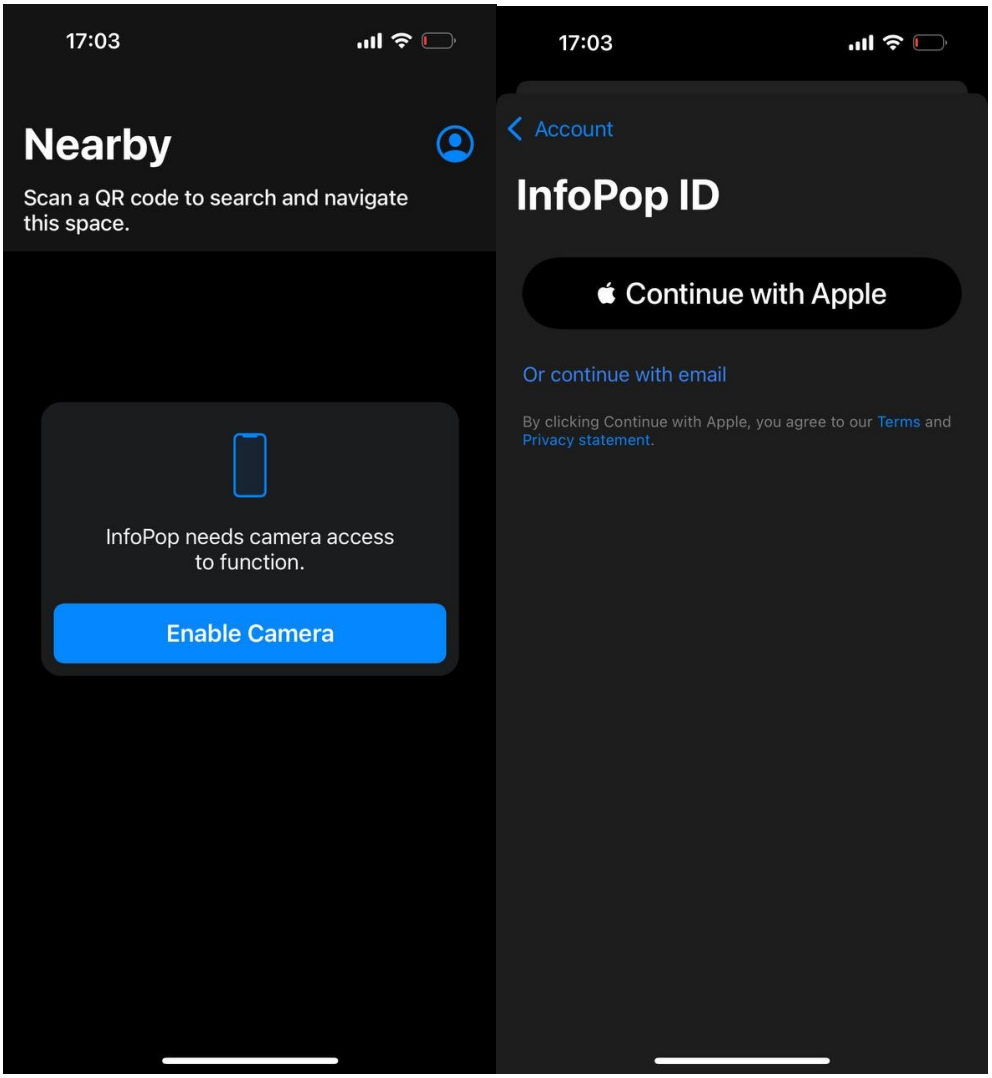


Рисунок 3.12 – Інтерфейс та вікно входу до облікового запису InfoPop ID

Після успішної реєстрації одним із двох доступних способів, наступним кроком є введення назви майбутньої карти маршрутів. Це може бути назва об’єкта або території, в якій буде здійснюватися навігація. Після того як користувач зареєструвався одним із двох способів, необхідно ввести назву нової карти. Назва повинна чітко відображати місце або об'єкт, для якого створюється навігація. Це може бути, наприклад, назва корпусу, поверху або окремої будівлі.

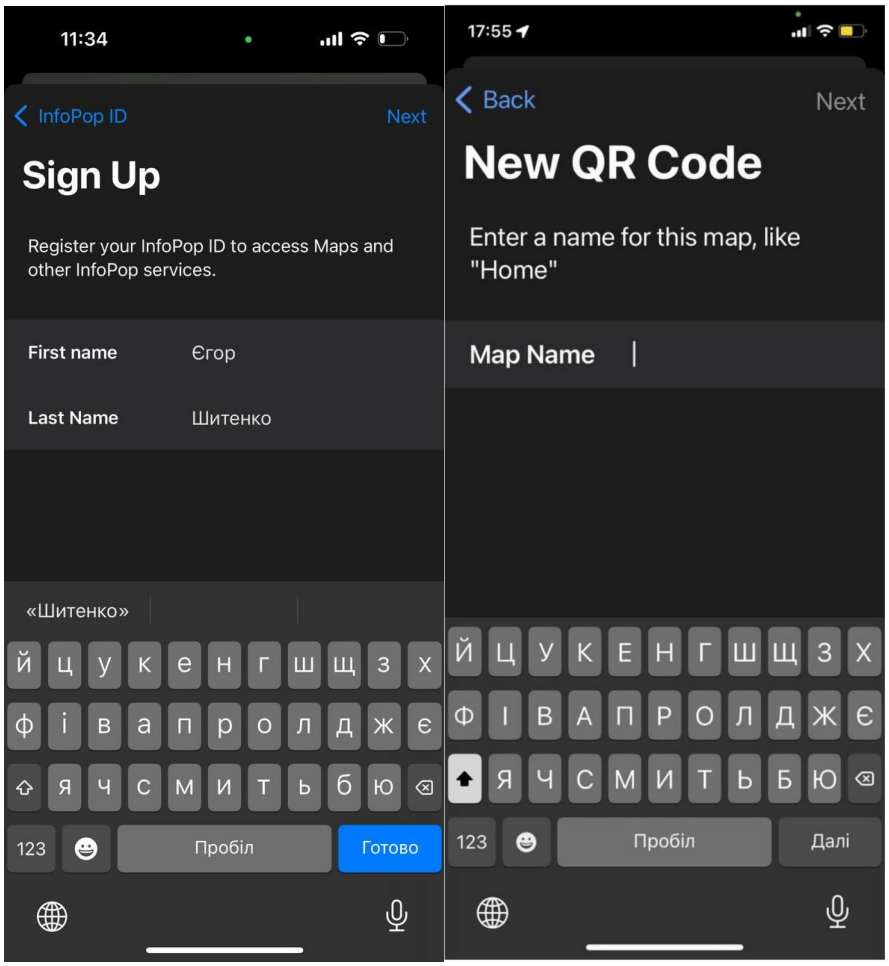


Рисунок 3.13 – Введення назви карти перед створенням маршруту

Після того як задано назву карти, важливо звернути увагу на налаштування доступу до редагування міток. Рекомендується відразу обмежити доступ, щоб тільки адміністратор міг змінювати або додавати мітки. Це допоможе уникнути випадкових або небажаних змін з боку інших користувачів.

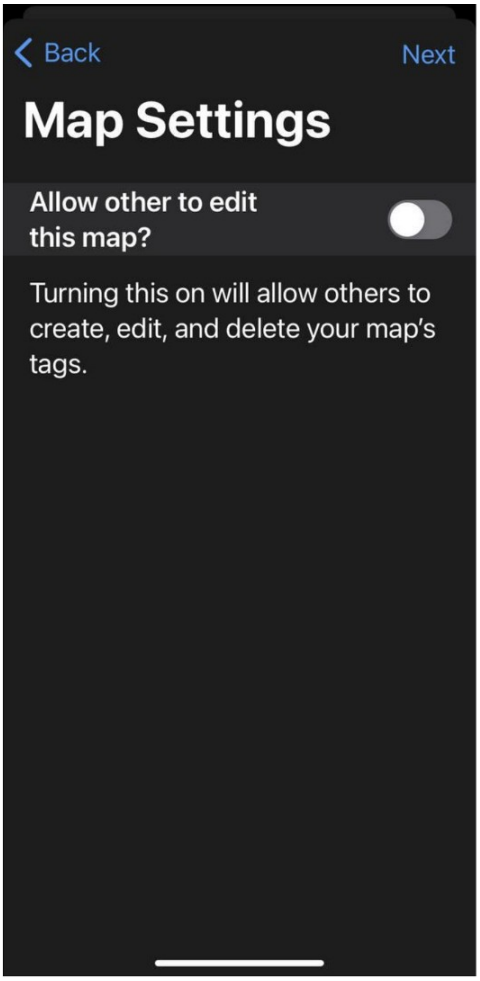


Рисунок 3.14 – Обмеження доступу до редагування міток

Щоб почати створювати маршрут, спочатку потрібно надрукувати QR-код і прикріпити його в тому місці, де буде починатися шлях. Саме з цієї точки додаток почне будувати маршрут. Після сканування QR-коду програма запам’ятає позицію, до якої будуть прив’язані всі наступні мітки.

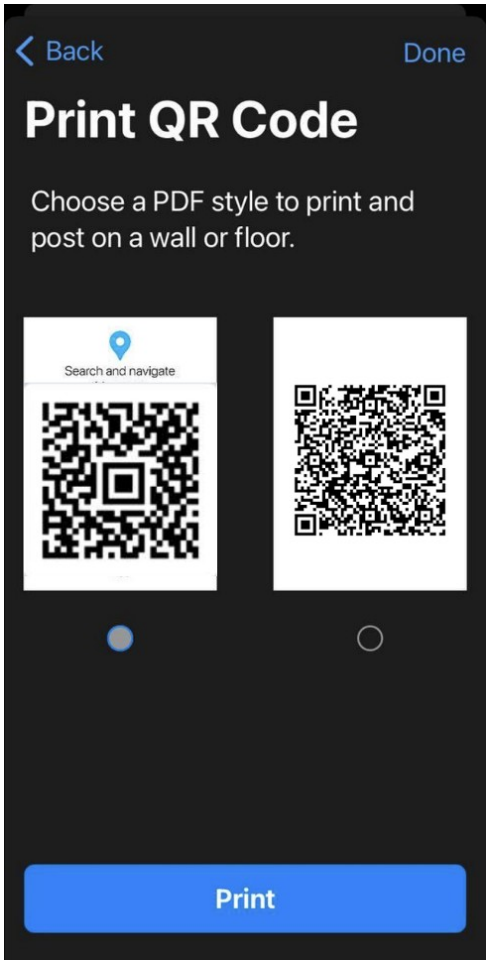


Рисунок 3.15 – Інтерфейс генерації та друку QR-кодів у додатку InfoPop

Після того як початкова точка вже зафіксована, потрібно відкрити камеру в додатку та навести її на роздрукований QR-код. Це дозволить системі розпізнати місце старту. Після цього можна починати прокладати маршрут, додаючи мітки відповідно до бажаного шляху.

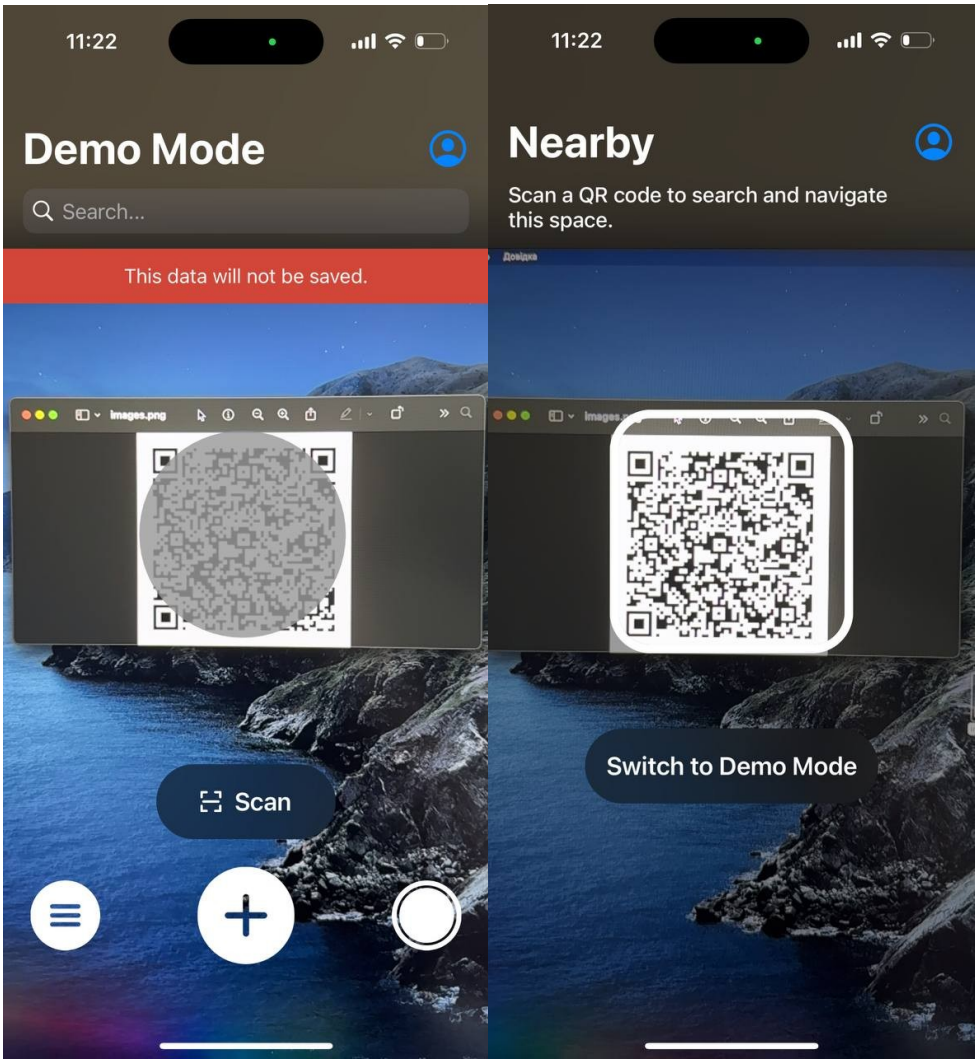


Рисунок 3.16 – Визначення початкової позиції міток за допомогою QR-коду

Після завершення налаштування маршрутів можна переходити до перевірки, як працює навігація. Для цього в рядку пошуку потрібно вибрати кінцевий пункт призначення.

Після цього на екрані з’являється навігаційна стрілка, яка показує напрямок і веде користувача до потрібного місця.

Також можна просто навести камеру смартфона в різні сторони, щоб побачити, де саме знаходяться позначки, що вказують на пункт призначення.

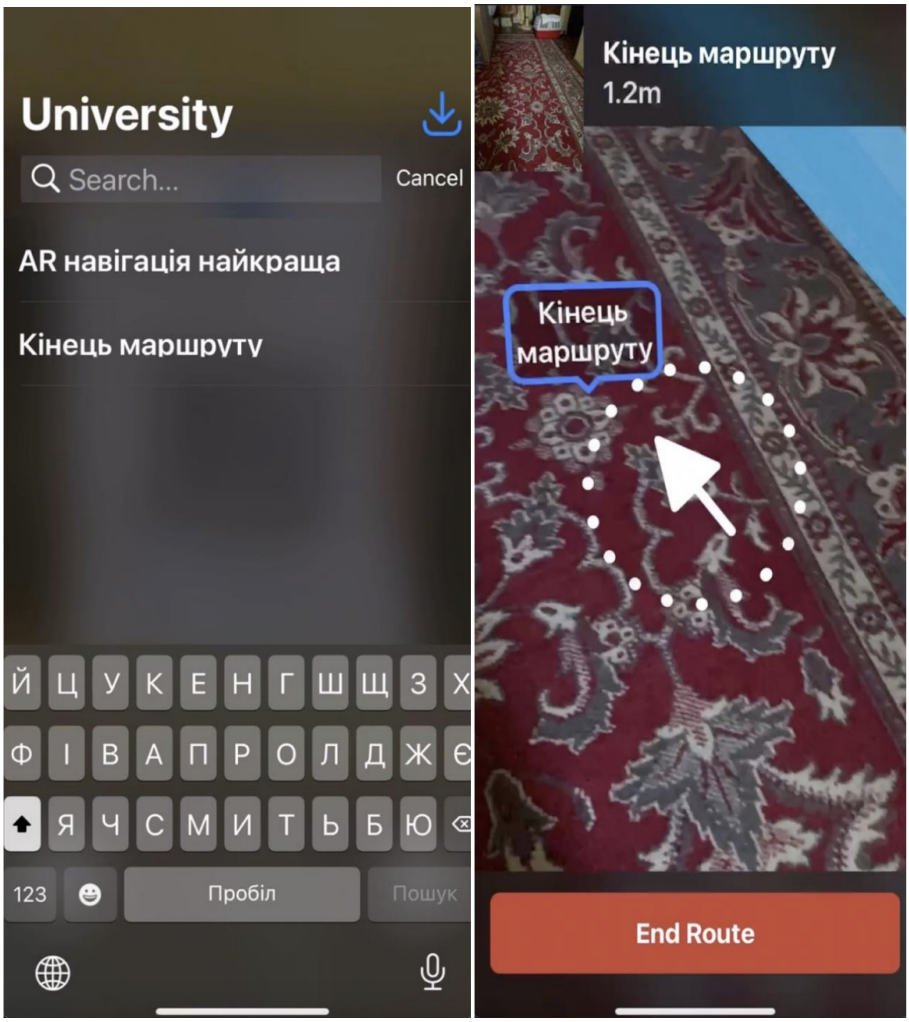


Рисунок 3.17 – Візуалізація маршруту до пункту призначення через AR-інтерфейс

ВИСНОВКИ

З’ясовано, що технології доповненої реальності (AR) мають значний потенціал для впровадження у навчальні симуляції, особливо у сфері технічної освіти. AR-додатки дозволяють моделювати складні інженерні процеси, візуалізувати будову технічних об'єктів та реалізовувати інтерактивні сценарії навчання, що істотно підвищує ефективність засвоєння матеріалу студентами.

Проведений огляд існуючих AR-рішень засвідчив наявність широкого спектра програмних продуктів з різним функціоналом, рівнем технічної складності та цільовою аудиторією. Найбільш перспективними у контексті технічної підготовки є платформи, які підтримують створення кастомізованого навчального контенту та забезпечують глибоку інтерактивність.

Розглянуті базові поняття доповненої реальності: маркери, трекінг, 3D-візуалізація – є фундаментальними компонентами для реалізації повноцінних AR-систем. У педагогічному контексті доповнена реальність виступає ефективним засобом активізації навчального процесу, формування практичних компетентностей та індивідуалізації освітнього контенту.

Досліджено навігаційних систем, що використовуються в технологіях доповненої реальності (AR), з акцентом на їхню роль у побудові інтерактивного освітнього середовища. На основі порівняльного аналізу доповненої та віртуальної реальності встановлено, що AR має значну перевагу для використання в технічній освіті завдяки можливості поєднання реального контексту із віртуальними елементами, меншій вартості впровадження та вищій доступності.

Проаналізовано основні типи AR-систем — marker-based, markerless, location-based та projection-based, — кожен з яких має свої переваги та доцільність застосування в різних освітніх сценаріях. Особливу увагу приділено системі візуального позиціонування (VPS), яка є критично важливою для точного та стабільного розміщення віртуальних об'єктів у просторі. Застосування VPS в освіті дозволяє реалізовувати адаптивні, контекстні та групові AR-сценарії з високою точністю позиціонування.

Розглянуто можливості внутрішньої AR-навігації, яка базується на сучасних технологіях локалізації, зокрема Bluetooth-маяках, Wi-Fi-триангуляції та SLAM-алгоритмах. Ці технології дають змогу реалізувати персоналізовану навігацію в межах навчальних закладів, автоматизовану доставку навчального контенту, а також інклюзивні рішення для студентів з особливими потребами.

Розглянуто сучасні інструменти та підходи до створення застосунків доповненої реальності для мобільних платформ. Проаналізовано технологічні рішення, зокрема ARKit та ARCore, а також методи позиціонування в приміщенні: візуальні маркери, Wi-Fi RTT та UWB. Було вивчено їхні переваги, недоліки та можливості застосування у сфері навчальних симуляцій.

Розроблено прототип навчального AR-застосунку InfoPop, що реалізує функціональність навігації всередині будівель. У рамках розробки було створено карту маршрутів, реалізовано фіксацію стартових точок за допомогою QR-кодів, налаштовано доступ до редагування та впроваджено зручний інтерфейс пошуку пункту призначення.

Продемонстровано практичну роботу додатку на прикладі побудови маршруту в навчальному корпусі. Навігація працює у режимі доповненої реальності, дозволяючи користувачеві бачити напрям руху та кінцеву точку через камеру смартфона. Це підтверджує ефективність використання AR-технологій у навчальному середовищі.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Kato H., Billinghurst M. Marker Tracking and HMD Calibrationfor a Video-based Augmented Reality Conferencing System. Proceedings of the 2nd IEEE and ACM International Workshop on Augmented Reality, (1999). С.85-94.

2. Azuma R.T. A Survey of Augmented Reality. In Presence: Teleoperators and Virtual Environments, 6(4), 1997. С. 355-385.

3. Гнедко Н.М. Технології віртуальної та доповненої реальності в освітньому середовищі ВНЗ. Оновлення змісту, форм та методів навчання і виховання в закладах освіти. 2017. № 17. С. 44–48.

4. Скрипник МІ, Маслова ГС, Приходько НП, Гопко ОФ. Використання дистанційних методів навчання в медичній освіті. Медична освіта.2020;3(39):29–32.

5. Єрмілова Н.М. Сучасні інформаційні технології та інноваційні методики навчання у підготовці фахівців: методологія, теорія, досвід, проблеми. Київ ; Вінниця, 2018. 465 с.

6. Климнюк В.Є. Віртуальна реальність в освітньому процесі. Збірник наукових праць ХНУПС. 2018. № 2. С. 207–212.

7. Ханюков, О. О., Смольянова, О. В. Симуляційне навчання як засіб оволодіння фаховими компетентностями студентами 6 курсу (обґрунтування, методика проведення заняття, аналіз). SWorldJournal. 2020. № 4. С. 121–127.

8. Концева Г.М., Концевий М.П. Віртуальне освітнє середовище в професійній підготовці фахівця. Педагогіка безпеки. 2017. № 1. С. 28–34.

9. Скуратівська М.О., Попадюк С.С. Віртуальне освітнє середовище як інноваційна складова навчального процесу у вищій школі. Збірник наукових праць ХДУ. Педагогічні науки. 2017. № 80(2). С. 251–255.

10. H. Kato, M. Billinghurst. (1999) Marker Tracking and HMD Calibrationfor a Video-based Augmented Reality Conferencing System. Proceedings of the 2nd IEEE and ACM International Workshop on Augmented Reality, P. 85-94.

11. Ghnedko N.M. (2017) Tekhnologhiji virtualjnoji ta dopovnenoji realjnosti

v osvitnjomu seredovyshhi vyshhogho navchaljnogho zakladu [Technology virtual and augmented reality in the educational environment of a higher educational institution]. Onovlennja zmistu, form ta metodiv navchannja i vykhovannja v zakladakh osvity, no. 17. pp. 44-48.

12. Jermilova N.M. (2018) Suchasni informacijni tekhnologhiji ta innovacijni metodyky navchannja u pidghotovci fakhivciv: metodologhija, teorija, dosvid, problemy [Modern information technologies and innovative teaching methods in training: methodology, theory, experience]. Zb. nauk. Kyjiv; Vinnycja, 465 p.

13. Kontseva H.M., Kontsevyi M.P. (2017) Virtualne osvitnie seredovyshche v profesiinii pidhotovtsi fakhivtsia [Virtual educational environment in professional training]. Pedahohika bezpeky. Vol. 1. pp. 28-34.

14. Martynets L.A. (2015) Suchasni modeli osvity: navch.-metod. posibnyk [Modern models of education: teaching method manual]. Donetsk, 102 p.

15. Mahoney, B., Minehart, R. D., Pian-Smith, M. C. Comprehensive healthcare simulation: anesthesiology: Springer, 2020. 348 p.

16. Pankratova O.P., Konopko E.A., Katkov K.A. (2016) Opyt primeneniya oblachnykh tekhnologiy v sozdanii informatsionnoy obrazovatel'noy sredy vuza [The experience of using cloud technologies in the creation of an information educational environment of a university]. Problemy sovremennogo pedagogicheskogo obrazovaniya. Vol. 53-2. pp. 143-149.

17. Skurativska M.O., Popadiuk S.S. (2017) Virtualne osvitnie seredovyshche yak innovatsiina skladova navchalnoho protsesu u vyshchii shkoli [Virtual educational middle-class is the basis for the innovation of the warehouse during the beginning of the school process]. Zbirnyk naukovykh prats KhDU. Pedahohichni nauky. Vol. 80(2), pp. 251-255.

18. Ataei M., Hamedani S.S., Zameni F. (2020). Effective methods in medical education: from giving lecture to simulation. Journal of Advanced Pharmacy Education & Research, 10 (S1), 36- 42.

19. Mach, F., Baigent, C., Catapano, A. L., et al. 2019 ESC/EAS Guidelines for the management of dyslipidaemias: lipid modification to reduce cardiovascular risk:

The Task Force for the management of dyslipidaemias of the European Society of Cardiology (ESC) and European Atherosclerosis Society (EAS). European Heart Journal. 2020. Vol. 41, № 1. P. 111–188.

20. Valiev T, Morgan MH.Simulation-based learning of invasive procedures skills: A critical appraisal of its organization in undergraduate medical education. Inter J of Healthc Manag. 2019 April 13(2):1–8.

21. The State of Mobile Gaming Industry – Statistics and Trends [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://www.go-globe.com/mobilegaming-industry/.

22. What is the Mixed Reality Toolkit URL: https://github.com/microsoft/MixedRealityToolkit-Unity.

23. ARToolKit URL: https://en.wikipedia.org/wiki/ARToolKit.

24. Vuforia: Market-Leading Enterprise AR URL: https://www.ptc.com/en/products/augmentedreality/vuforia#.

25. ARToolKit URL: https://github.com/artoolkit/ARToolKit5.

26. ARKit URL: https://developer.apple.com/documentation/arkit/.

27. Linowes J. Augmented Reality for Developers / J. Linowes, K. Babilinski // Augmented Reality for Developers / J. Linowes, K. Babilinski., 2017. – С. 14– 40.

28. Бернатович А. О. Методи та програмні засоби позиціонування об’єктів доповненої реальності : 121 / Бернатович Анатолій Олександрович – Київ, 2019. – 82 с.

29. Реальність URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A0%D0%B5%D0%B0%D0%BB%D1%8C %D0%B D%D1%96%D1%81%D1%82%D1%8C

30. Ulrich Lampe, Qiong Wu, Sheip Dargutev, Ronny Hans, André Miede, Ralf Steinmetz: Assessing Latency in Cloud Gaming. In: Markus Helfert, Frédéric Desprez, Donald Ferguson, Frank Leymann: Cloud Computing and Services Science, vol. CCNS, 453, chap. 4, p. 52-68, Springer International Publishing, September 2014.

31. Карпенко Д.І., Дослідження технології доповненої реальності та розробка інтерактивного музейного AR-додатку // Харківський національний

університет радіоелектроніки URL: https://openarchive.nure.ua/bitstream/document/11967/1/Karpenko_DI_2019.pdf

32. Augmented reality overview. Unreal Engine. URL: https://docs.unrealengine.com/4.26/enUS/SharingAndReleasing/XRDevelopment/AR/HandheldAR/AROverview/#:~:text =Augmented%20reality%20(AR)%20is%20a,iOS%20and%20Android%20handhel d%20platforms

33. Susic P. 56+ mobile gaming statistics (2023). HeadphonesAddict. URL: https://headphonesaddict.com/mobile-gaming-statistics

34. Wohlgenannt I., Simons A., Stieglitz S. Virtual reality. Business & information systems engineering. 2020. URL: https://link.springer.com/article/10.1007/s12599- 020-00658-9

35. Billinghurst M. Augmented reality in education. New horizons for learning. 2002.

36.

ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
Кафедра Комп'ютерної інженерії

Доповнена реальність для навчальних симуляцій у технічних спеціальностях

Виконав:
Шитенко Єгор Станіславович
Науковий керівник:
Вечерковська А.С.

Київ 2025

Мета, об’єкт, предмет

- **Метою роботи** розробка та реалізація програмного продукту на основі доповненої реальності, який дозволяє створювати інтерактивні навчальні симуляції для технічної освіти з використанням технологій ARKit, ARCore, VPS та Deep Location.
- **Об’єктом дослідження** методи розробки та впровадження технологій доповненої реальності (AR) для моделювання навчальних процесів та покращення засвоєння матеріалу студентами технічних спеціальностей
- **Предметом дослідження є** методи та алгоритми перерозподілу задач у системах енергетичного навантаження, їх ефективність, адаптивність до змінних умов та можливості оптимізації.



Актуальність теми

Сучасний розвиток цифрових технологій стимулює активне впровадження доповненої реальності (AR) в освітній процес, зокрема у навчальні симуляції для технічних спеціальностей.

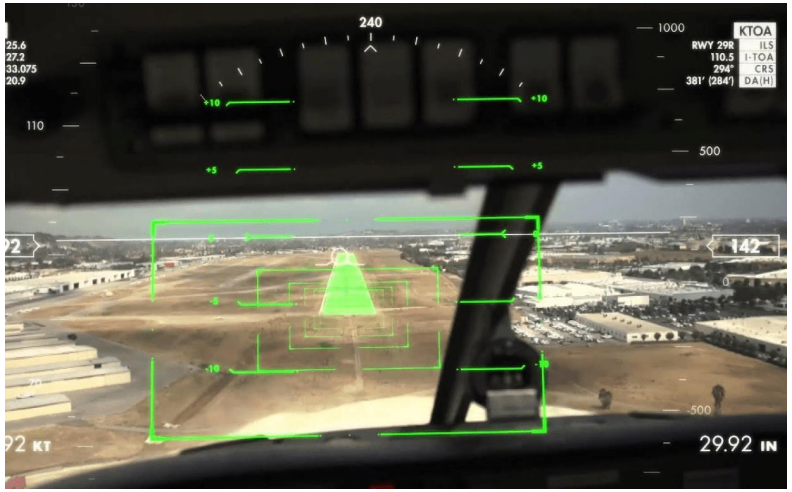
Доповнена реальність дозволяє створювати інтерактивні навчальні середовища, які сприяють глибшому засвоєнню матеріалу, підвищенню рівня практичних навичок і зниженню витрат на підготовку фахівців.

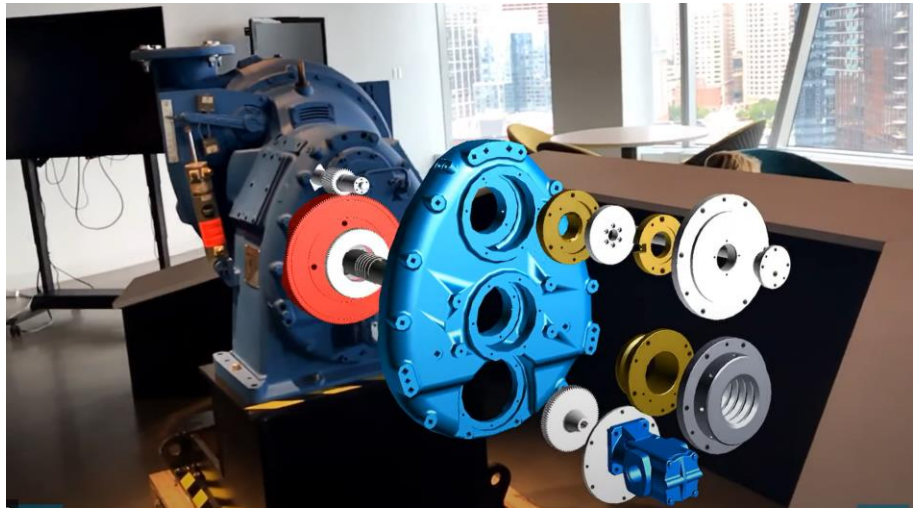
Актуальність даного дослідження полягає у розробці AR-застосунку для навчальних симуляцій, що дозволить значно покращити якість навчання в технічних спеціальностях, забезпечуючи більш ефективну взаємодію студентів з цифровими моделями реальних об’єктів.

Дослідження застосування доповненої реальності у навчальних симуляціях

- У контексті технічних спеціальностей AR виконує такі ключові функції:
- Візуалізація складних об'єктів – наприклад, внутрішньої будови механізмів, електричних схем, потоків рідин тощо.
- Інтерактивне навчання – студент може обертати 3D-модель, натискати на її частини, викликати анотації або запускати симуляцію роботи.
- Покрокове керування процесом – у вигляді віртуального інструктора або інтерфейсу з підказками.
- Миттєвий зворотний зв'язок – наприклад, система може підказати помилку в дії користувача або запропонувати правильний варіант.
- Мобільність та доступність – AR-сценарії можна запускати на звичайних смартфонах і планшетах, без потреби у спеціальних окулярах або тренажерах

Дослідження застосування доповненої реальності у навчальних симуляціях







Огляд та аналіз існуючих AR-рішень у сфері технічної освіти



MERGE Cube



zappar



Огляд та аналіз існуючих AR-рішень у сфері технічної освіти

Назва додатку	Цільова аудиторія	Інтерактивність	Можливість створення власного контенту	Технічна складність впровадження	Платформи	Підтримка 3D-моделей	Підходить для технічних спеціальностей
Merge EDU	Школа, коледж	Середня	Обмежена	Низька	iOS, Android	Так	Частково
Assemblr EDU	Школа, ВНЗ	Висока	Так	Середня	iOS, Android, Web	Так	Так
JigSpace	ВНЗ, корпоративне навчання	Висока	Ні	Низька	iOS	Так	Так
ZapWorks	Універсальна	Висока	Так	Середня	iOS, Android, WebAR	Так	Так
Unity + ARKit	ВНЗ, професійна підготовка	Висока	Так (повна свобода)	Висока	iOS	Так	Так
Unity + ARCore	ВНЗ, професійна підготовка	Висока	Так (повна свобода)	Висока	Android	Так	Так

Основні концепції доповненої реальності та її можливості в навчальному процесі

Доповнена реальність (AR) у педагогіці

🔹 **Що таке AR:**

AR поєднує реальне середовище з віртуальними об'єктами в режимі реального часу через камеру мобільного пристрою або AR-окуляри.

🔹 **Технології реалізації:**

– Маркерні системи (QR-коди, фігури);
– Безмаркерний трекінг (SLAM, візуальний та інерційний трекінг);
– 3D-візуалізація інтерактивних об’єктів.

🔹 **Переваги AR в освіті:**

– Інтерактивність та залучення студентів до навчання;
– Візуалізація складних понять і процесів;
– Індивідуалізація навчання;
– Безпечне моделювання реальних ситуацій.

🔹 **Освітній ефект:**

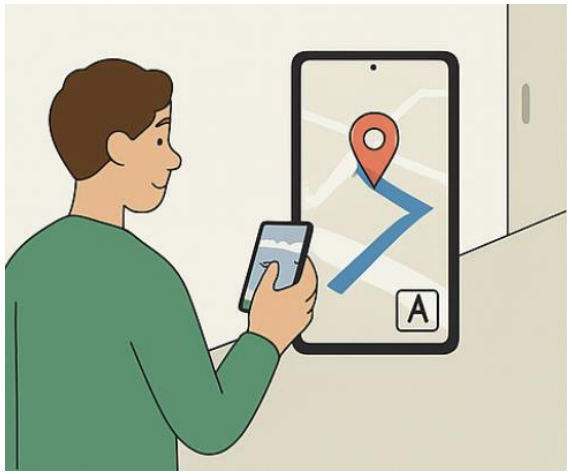
AR активізує пізнавальну діяльність, підтримує змішане та компетентнісне навчання, розвиває візуальне й просторове мислення.

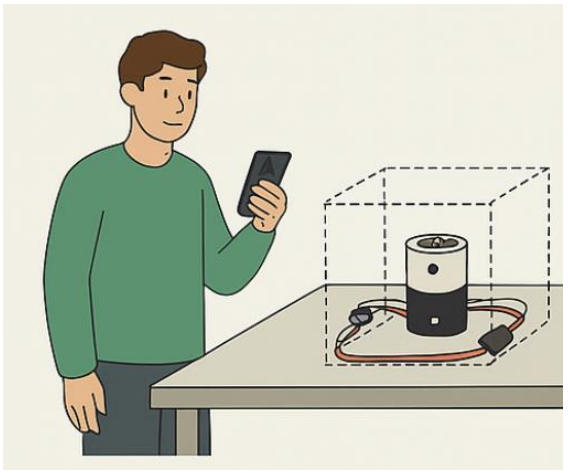
Порівняльний аналіз доповненої та віртуальної реальності в освітніх технологіях



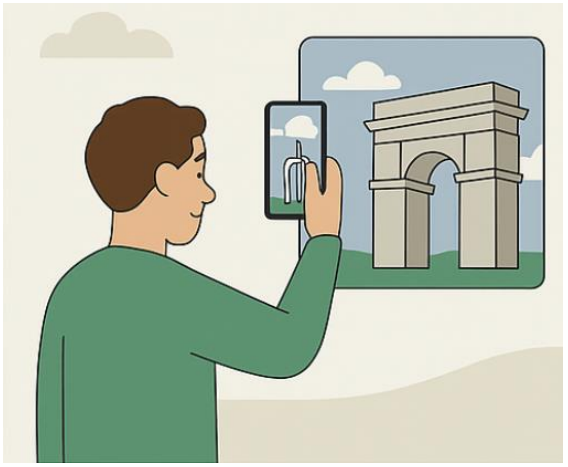
Критерій	AR (Доповнена реальність)	VR (Віртуальна реальність)
Ступінь занурення	Часткове занурення, реальний світ з доповненнями	Повне занурення у віртуальне середовище
Пристрій	Смартфон, планшет, AR-окуляри	VR-шолом (Oculus, HTC Vive, тощо)
Вартість впровадження	Порівняно низька	Вища, через потребу в спеціальному обладнанні
Інтерактивність	Інтерактивність з реальним та віртуальним світом	Інтерактивність лише з віртуальним контентом
Можливості для навчання	Додавання інформації до реального контексту	Повна імітація середовища, включаючи критичні ситуації
Використання в технічній освіті	Моделювання об'єктів у реальному просторі	Тренажери, симулятори повного циклу дій

Система візуального позиціонування (VPS) та її застосування в AR-освіті





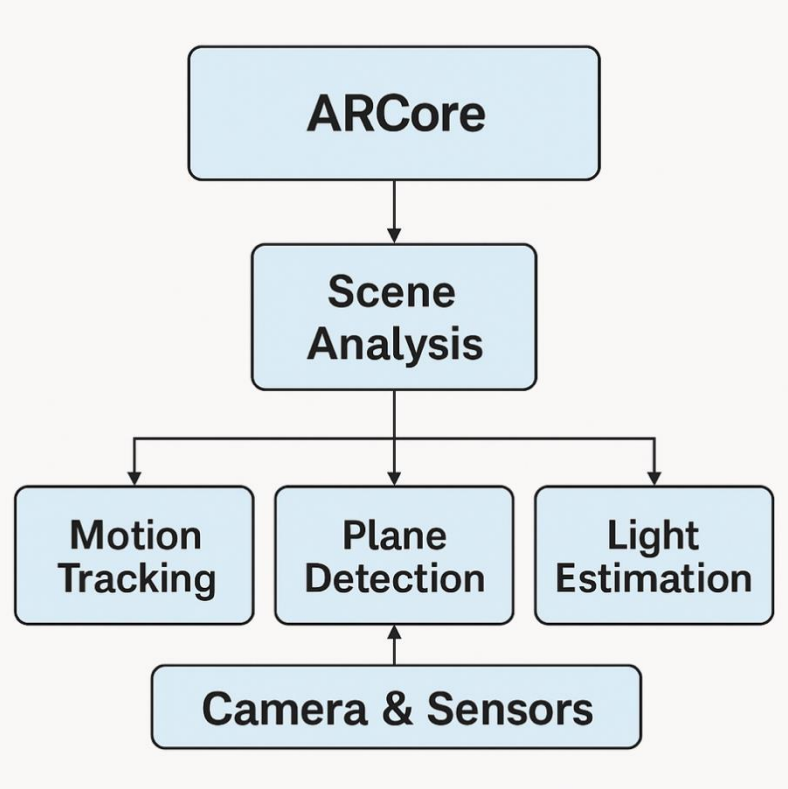




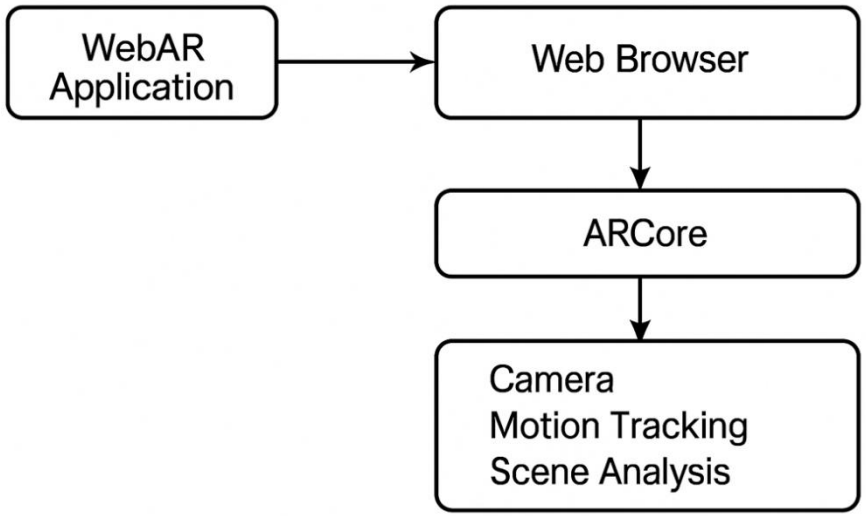
Використання технології внутрішньої AR-навігації у навчальних закладах

Технологія	Принцип роботи	Переваги	Недоліки	Освітнє застосування
Bluetooth Beacons	Оцінка відстані до маяків за силою Bluetooth-сигналу	Простота, низьке енергоспоживання, точність 1–2 м	Потребує встановлення маяків і заміни батарей	Орієнтація між аудиторіями, запуск AR-контенту поблизу
Wi-Fi триангуляція	Визначення місцезнаходження за рівнем сигналу від кількох Wi-Fi точок	Використання наявної Wi-Fi-мережі, мінімальні витрати	Низька точність, вплив перешкод	Автоматичне завантаження навчального матеріалу у зонах покриття
SLAM	Одночасне створення карти простору та визначення позиції на її основі з відеопотоку	Висока точність, не потребує зовнішньої інфраструктури	Потребує потужного пристрою та ресурсомісткий	AR-лабораторії, віртуальні інструкції, точна фіксація моделей

Реалізація AR-навчання на пристроях Android за допомогою ARCore

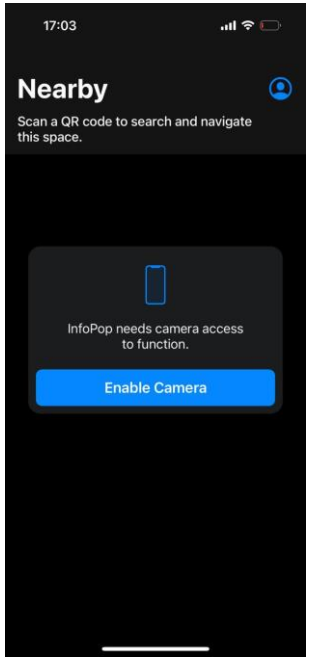


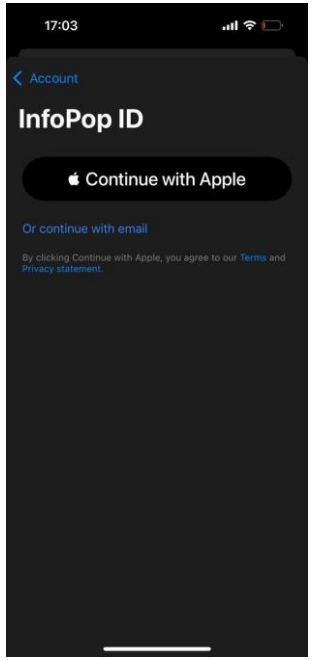

```
// Оновлення AR-сцени та збереження позиції об’єкта
override fun onUpdate(frameTime: FrameTime) {
    val frame = arFragment.arSceneView.arFrame ?: return
    val updatedPlanes = frame.getUpdatedTrackables(Plane::class.java)
    for (plane in updatedPlanes) {
        if (plane.trackingState == TrackingState.TRACKING) {
            // Площина доступна для розміщення об’єктів
        }
    }
}
```

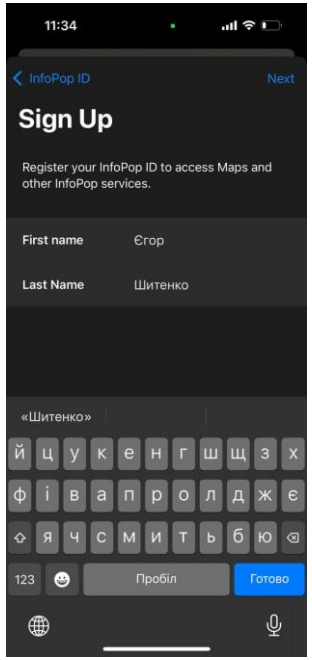


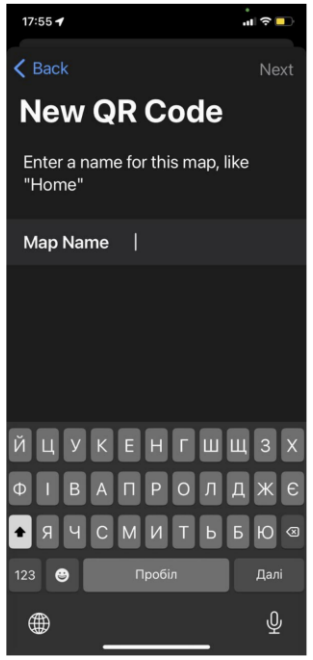
Створення та тестування прототипу навчального застосунку InfoPop

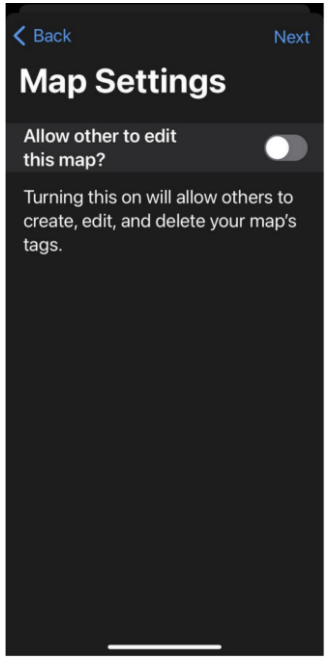






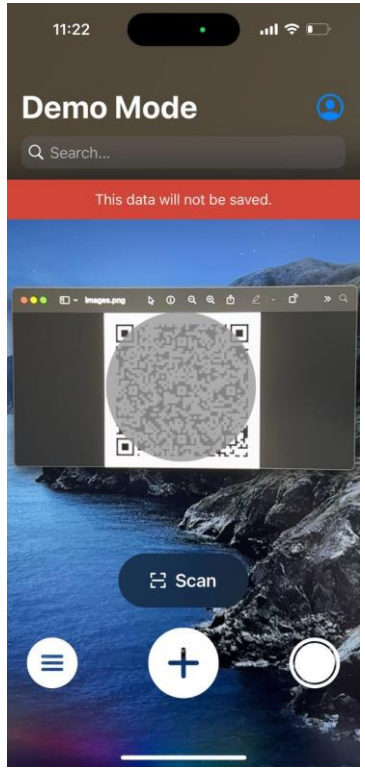


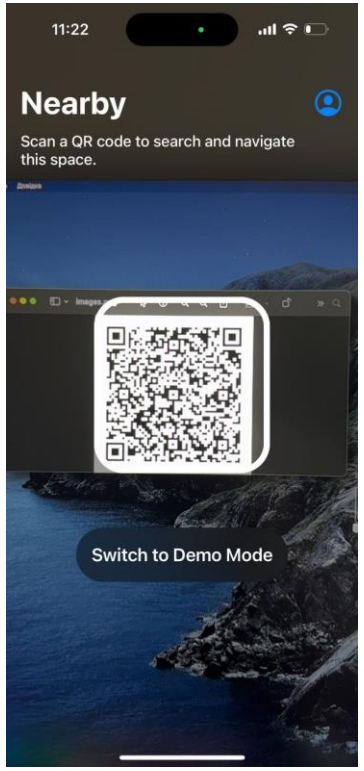




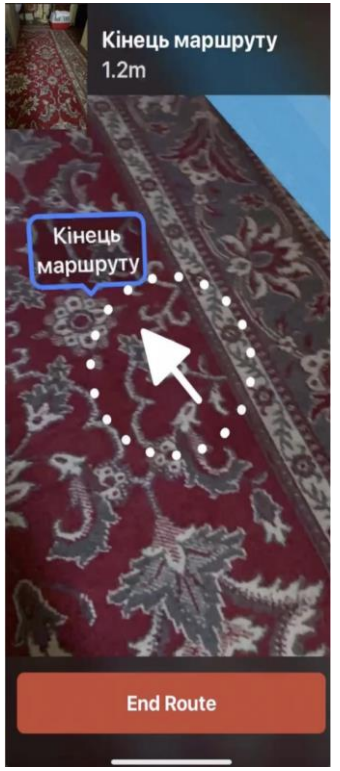


Створення та тестування прототипу навчального застосунку InfoPop









Висновки

- AR-технології мають високий потенціал для моделювання технічних процесів, візуалізації складних об’єктів та підвищення ефективності навчання.
- Системи маркерного, безмаркерного та проєкційного типів дозволяють адаптувати AR-сценарії до різних освітніх умов і цілей.
- Візуальне позиціонування (VPS) забезпечує точне розміщення віртуальних об’єктів і відкриває можливості для контекстної взаємодії.
- AR-навігація всередині приміщень на основі QR-кодів, Wi-Fi та Bluetooth підвищує доступність і персоналізацію навчального контенту.
- Платформи ARKit та ARCore надають ефективні інструменти для створення мобільних навчальних застосунків.
- Розроблений прототип InfoPop підтвердив ефективність використання AR у навігації навчальними закладами, демонструючи практичну реалізацію теоретичних концепцій.