

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет _____ комп'ютерних наук _____
(повна назва)

Кафедра _____ програмної інженерії _____
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

рівень вищої освіти _____ другий (магістерський) _____

Дослідження технологій доповненої реальності для програмної реалізації
віртуальної примірочної аксесуарів за допомогою штучного інтелекту

Виконав:

студент (ка) 2 курсу, групи ІПЗм-22-4

_____ Меньшикова А.А. _____

(прізвище, ініціали)

Спеціальність 121 – Інженерія програмного
забезпечення

(код і повна назва спеціальності)

Тип програми _____ освітньо-наукова _____

Керівник _____ доц. Назаров О.С. _____

(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту
Зав. кафедри

_____ (підпис)

_____ 3.В.Дудар _____

(прізвище, ініціали)

2024 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет	комп'ютерних наук
Кафедра	програмної інженерії
Рівень вищої освіти	другий (магістерський)
Спеціальність	121 – Інженерія програмного забезпечення
Тип програми	освітньо-наукова програма
Освітня програма	Інженерія програмного забезпечення

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри

(підпис)

«___» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФАКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові _____ Меньшиковій Анні Андріївні

1. Тема роботи «Дослідження технологій доповненої реальності для програмної реалізації віртуальної примірконої аксесуарів за допомогою штучного інтелекту»
затверджена наказом університету від 29 березня 2024 р. № 250Ст
2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 12 червня 2024 р.
3. Вихідні дані до роботи дослідження та використання оптимальної технології доповненої реальності для програмної розробки віртуальної примірконої аксесуарів з використанням механізму штучного інтелекту розпізнавання маркерів, що покращить користувацький досвід та сприятиме безперешкодній онлайн-примірці, технології доповненої реальності Wikitude, ARKit, ARCore, Vuforia, Kudan та Unity AR Foundation, фреймворк доповненої реальності Vuforia Engine AR, мова програмування C#, середа розробки Unity.
4. Перелік питань, що потрібно опрацювати у роботі вступ, огляд літератури та аналіз проблеми, етапи розвитку технологій доповненої реальності, аналіз наукової та патентної літератури, проблеми та протиріччя у вирішенні завдань, обґрунтування методології дослідження, вибір напрямку дослідження, підходи до вирішення завдань, порівняльна оцінка технологій, програмна реалізація віртуальної примірконої, етапи розробки та особливості програмної системи, можливості та потенційні застосування розробленої програмної системи, проведення експериментальних досліджень та їх результати, аналіз результатів, сумарна оцінка результатів, перспективи подальших досліджень, висновки.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Огляд літератури, аналіз проблеми та постановка задачі дослідження	22.01.2024 – 12.02.2024	виконано
2	Обґрунтування методології дослідження	12.02.2024 – 26.02.2024	виконано
3	Дослідження існуючих технологій доповненої реальності та проведення порівняльної оцінки цих технологій	26.02.2024 – 25.03.2024	виконано
4	Програмна реалізація віртуальної примірочної	25.02.2024 – 18.05.2024	виконано
5	Проведення експериментальних досліджень та аналіз результатів	01.04.2024 – 29.04.2024	виконано
6	Підготовка пояснювальної записки	22.04.2024 – 20.05.2024	виконано
7	Перевірка на плагіат та нормоконтроль	29.05.2024	виконано
8	Підготовка презентації та доповіді	03.06.2024	виконано
9	Рецензування	06.06.2024	виконано
10	Попередній захист	07.06.2024	виконано
11	Занесення диплома в електронний архів	08.06.2024	виконано
12	Допуск до захисту у зав. кафедри	11.06.2024	виконано

Дата видачі завдання 22.01.2024 р.

Студент (ка)


(підпис)

Меньшикова А.А.

Керівник роботи

(підпис)

доц. Назаров О.С.

(посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ / ABSTRACT

Робота містить: 114 с., 20 рис., 4 табл., 23 джер.

АКСЕСУАР, ВІРТУАЛЬНА ПРИМІРОЧНА, МЕХАНІЗМ РОЗПІЗНАВАННЯ МАРКЕРІВ, ТЕХНОЛОГІЇ ДОПОВНЕНОЇ РЕАЛЬНОСТІ, ШТУЧНИЙ ІНТЕЛЕКТ, ANDROID, ARCORE, ARKIT, IOS, KUDAN, UNITY AR FOUNDATION, VUFORIA, WIKITUDE.

Об'єктом дослідження є процес інтеграції віртуальних аксесуарів із реальним середовищем за допомогою технології доповненої реальності.

Метою роботи є вирішення проблеми обмеженого доступу до фізичної примірки аксесуарів під час онлайн-покупки шляхом визначення оптимальної технології доповненої реальності та використання штучного інтелекту для розробки віртуальної приміркової, надаючи споживачам реалістичний та захоплюючий досвід примірки у віртуальному середовищі, що зробить їх більш впевненими у придбанні аксесуарів без необхідності фізичної взаємодії.

Методи розробки та проектування базуються на фреймворку доповненої реальності Vuforia Engine AR, мові програмування C#, середовищі розробки Unity та механізмі розпізнавання маркерів.

В результаті роботи було досліджено технології доповненої реальності, а саме Wikitude, ARKit, ARCore, Vuforia, Kudan та Unity AR Foundation, для програмної реалізації віртуальної приміркової аксесуарів за допомогою механізму штучного інтелекту розпізнавання маркерів, проведено ретельний аналіз та порівняння цих технологій доповненої реальності, щоб визначити, яка технологія найкраще підходить для розробки, а також програмно реалізовано віртуальну примірочну за допомогою технології доповненої реальності Vuforia та штучного інтелекту у якості мобільного додатку, яка сумісна з Android та iOS.

ACCESSORY, ANDROID, ARCORE, ARKIT, ARTIFICIAL INTELLIGENCE, AUGMENTED REALITY TECHNOLOGIES, IOS, KUDAN, MARKER

RECOGNITION ENGINE, UNITY AR FOUNDATION, VIRTUAL FITTING ROOM, VUFORIA, WIKITUDE.

The object of research is the process of integrating virtual accessories with the real environment using augmented reality technology.

The aim of the work is to solve the problem of limited access to physical accessory fitting during online shopping by identifying the optimal augmented reality technology and using artificial intelligence to develop a virtual fitting room, providing consumers with a realistic and immersive fitting experience in a virtual environment, which will make them more confident in purchasing accessories without the need for physical interaction.

Development and design methods are based on the Vuforia Engine AR augmented reality framework, C# programming language, Unity development environment and a marker recognition engine.

As a result of the work, augmented reality technologies, namely Wikitude, ARKit, ARCore, Vuforia, Kudan and Unity AR Foundation, were investigated for the software implementation of a virtual fitting room for accessories using the artificial intelligence mechanism of marker recognition, conducted a thorough analysis and comparison of these augmented reality technologies to determine which technology is best suited for development, and programmatically implemented the virtual fitting room using Vuforia augmented reality and artificial intelligence technology as a mobile application that is compatible with Android and iOS.

Умови публікації звіту: заява щодо самостійного виконання кваліфікаційної роботи та можливості її публікації в електронному архіві відкритого доступу EIArKhNURE.

Я, Меньшикова Анна Андріївна студентка групи ІПЗм-22-4 здобувач вищої освіти на другому (магістерському) рівні кафедра програмної інженерії, заявляю: моя кваліфікаційна робота на тему Дослідження технологій доповненої реальності для програмної реалізації віртуальної примірочної аксесуарів за

допомогою штучного інтелекту, що буде представлена в екзаменаційну комісію для публічного захисту, виконана самостійно, в ній не містяться елементи плагіату і вона може бути опублікована в електронному архіві відкритого доступу ElArKhNURE. Всі запозичення з друкованих та електронних джерел мають відповідні посилання.

Я ознайомлена з діючим положенням «Про протидію академічному плагіату в ХНУРЕ», згідно з яким виявлення плагіату є підставою для відмови в допуску кваліфікаційної роботи до захисту та застосування дисциплінарних заходів.

ЗМІСТ

Вступ	9
1 Огляд літератури та аналіз проблеми	12
1.1 Етапи розвитку технологій доповненої реальності	12
1.2 Аналіз наукової та патентної літератури	20
1.3 Проблеми та протиріччя у вирішенні завдань.....	27
1.4 Постановка задачі.....	28
2 Обґрунтування методології дослідження.....	30
2.1 Вибір напрямку дослідження	30
2.2 Підходи до вирішення завдань.....	31
2.3 Порівняльна оцінка технологій.....	46
3 Програмна реалізація віртуальної примірочної	55
3.1 Етапи розробки та особливості програмної системи.....	55
3.2 Можливості та потенційні застосування розробленої програмної системи	64
4 Проведення експериментальних досліджень та їх результати	69
5 Аналіз результатів	75
5.1 Сумарна оцінка результатів	75
5.2 Перспективи подальших досліджень	82
Висновки.....	85
Перелік джерел посилань.....	87
Додаток А Перелік джерел посилання за науковими напрямами керівника та науковців кафедри програмної інженерії.....	90
Додаток Б Звіт результатів перевірки кваліфікаційної роботи на унікальність тексту	91
Додаток В Відображення процесу програмної реалізації віртуальної примірочної ...	92
Додаток Г Скріншоти взаємодії користувача з віртуальною примірочною аксесуарів.....	100
Додаток Д Експертний висновок результатів перевірки кваліфікаційної роботи на відповідність оформлення вимогам ДСТУ 3008:2015	106
Додаток Е Апробація результатів роботи	107
Додаток Ж Слайди презентації	109

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

API – application programming interface;

AR – augmented reality;

SDK – software development kit;

ІІІ – штучний інтелект.

ВСТУП

Розвиток електронної комерції в індустрії моди спричинив значні трансформації, але водночас створив і проблеми, головною з яких є відсутність фізичних примірочних в онлайн-магазинах. Ця відсутність стала перешкодою для переходу споживачів з традиційних магазинів на цифрові платформи. Коли на початку 2000-х років почали зароджуватися онлайн-ринки, модні бренди скептично ставилися до продажу високоякісного одягу без можливості для клієнтів фізично приміряти їх. Основними причинами таких сумнівів були занепокоєння щодо ексклюзивності бренду та перспективи більшої кількості повернень через те, що одяг не підійшов, як очікувалося, за розміром. Однак онлайн-ринок перевершив очікування, вказуючи про помітний перехід споживчих уподобань у напрямку цифрових способів купівлі модного одягу, і стрімко зростав навіть під час глобальної фінансової кризи наприкінці 2000-х років.

У фундаментальній статті Роберта Кордеро "Can Technology Help Fashion Etailers Tackle 'Try Before You Buy?'" , опублікованій у виданні The Business of Fashion у 2010 році, для інтернет-магазинів модного одягу автором було підкреслено зростаючу потребу задовольнити наполегливе бажання споживачів "спробувати, перш ніж купувати" [1]. Коли такі інтернет-магазини, як Asos та Net-a-Porter, повідомили про раптове й швидке зростання такого бажання, стало очевидно, що надання гнучкої політики та відмінного обслуговування клієнтів не можуть самі по собі повністю компенсувати відсутність фізичної взаємодії з товарами.

Штучний інтелект та доповнена реальність є новими технологіями, які стають все більш важливими для подолання розриву між онлайн- та офлайн-шопінгом. Дослідники та інноватори використовують досягнення у розпізнаванні маркерів та алгоритмів штучного інтелекту для розробки віртуальних примірочних, які дозволяють споживачам переглядати та взаємодіяти з аксесуарами в режимі реального часу, тим самим сприяючи прийняттю обґрунтованих рішень про покупку.

Метою цього дослідження є вирішення проблеми обмеженого доступу до

фізичної примірки аксесуарів під час онлайн-покупки. Це передбачає визначення оптимальної технології доповненої реальності та використання штучного інтелекту для розробки віртуальної приміркової. Основна мета полягає в тому, щоб надати споживачам реалістичний та захоплюючий досвід примірки у віртуальному середовищі, що зробить їх більш впевненими у придбанні аксесуарів без необхідності фізичної взаємодії. Наступні завдання були визначені для того, щоб досягти цю мету:

- дослідити та проаналізувати сучасний стан технологій доповненої реальності у віртуальних примірочних, зосереджуючи увагу на досягненнях в області розпізнавання маркерів та алгоритмів штучного інтелекту;
- дослідити можливості та виклики, які пов'язані з реалізацією віртуальної приміркової аксесуарів у порівнянні з традиційними одяговими виробами;
- спроектувати та розробити додаток віртуальної приміркової аксесуарів за допомогою оптимальної технології доповненої реальності з використанням штучного інтелекту, зосередившись на користувацькому досвіді та безперешкодному використанні на різних платформах;
- оцінити ефективність механізму розпізнавання маркерів для точного розташування аксесуарів на людині у віртуальній примірочній за допомогою проведення експериментів, які передбачають маніпулювання такими факторами, як якість камери, умови освітлення та місцезнаходження людини, щоб оцінити їхній вплив на точність розташування.

Об'єктом дослідження є процес інтеграції із реальним середовищем віртуальних аксесуарів за рахунок використання технології доповненої реальності.

Предметом дослідження є технології доповненої реальності для програмної реалізації віртуальної приміркової аксесуарів за допомогою штучного інтелекту.

Це дослідження робить внесок в існуючий обсяг знань, з точки зору

наукової новизни, просуваючи в області віртуальної приміркової аксесуарів сучасні та новітні технології доповненої реальності. Використовуючи механізм розпізнавання маркерів та алгоритми штучного інтелекту, це дослідження пропонує рішення для підвищення точності, реалістичності та зручності віртуальної примірки. Також результати цього дослідження відкривають шлях для подальшого вивчення та вдосконалення технологій доповненої реальності у віртуальних примірочних в контексті онлайн-покупок.

У практичному значенні це дослідження здатне змінити досвід онлайн-покупок для споживачів, особливо в індустрії моди. Надаючи покупцям можливість віртуально приміряти аксесуари в інтерактивній та реалістичній формі, продавці можуть збільшити продажі та зменшити кількість повернень, а також підвищити рівень лояльності та задоволеності клієнтів.

Оскільки механізми штучного інтелекту та технології доповненої реальності продовжують удосконалювати свої можливості, потенціал для створення персоналізованого та зручного шопінгу для користувачів лише зростатиме, що сприятиме позитивним трансформаціям у сфері роздрібної торгівлі. Також це дослідження підкреслює суттєвий вплив технології доповненої реальності й механізму розпізнавання маркерів на зміну способу взаємодії користувачів із віртуальними об'єктами у реальному середовищі в цифрову епоху.

Отже, це дослідження спрямоване на вирішення критичних проблем, що стоять перед індустрією моди в електронній комерції, шляхом використання можливостей технології доповненої реальності зі штучним інтелектом для створення віртуальної приміркової аксесуарів. Завдяки ретельному дослідженню, експериментам та оцінці, це дослідження має на меті зробити внесок як в академічні знання, так і в практичне застосування у сфері онлайн-торгівлі.

1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ТА АНАЛІЗ ПРОБЛЕМИ

1.1 Етапи розвитку технологій доповненої реальності

Перевершивши поширені уявлення про їхню появу наприкінці 20-го століття, технології доповненої реальності пройшли вирішальний еволюційний етап. Хоча сучасні прояви доповненої реальності, такі як Pokemon Go та фільтри Snapchat, проникли в повсякденне життя, коріння цієї технології занурення сягає понад шість десятиліть, передуючи появі Інтернету, і кожна епоха зробила значний внесок у ті можливості занурення, якими користувачі насолоджуються сьогодні.

Доповнена реальність збагачує реальність, додаючи віртуальні елементи до фізичного світу за допомогою візуальних зображень, звуку, анімації та накладання інформації. Доповнена реальність спочатку була задумана як спосіб покращити людське сприйняття та взаємодію з навколишнім середовищем, перш за все за допомогою комп'ютерних зображень та наголовних дисплеїв.

Новаторська робота Івана Сазерленда в 1960-х роках заклала основу того, що ми знаємо сьогодні як доповнену реальність. Його робота, відома як "Sword of Damocles" (див. рис. 1.1), стала значним кроком вперед у взаємодії людини та комп'ютера.

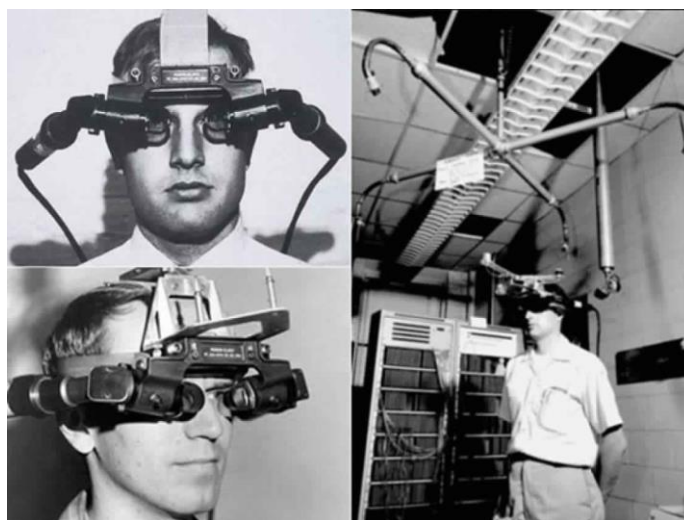


Рисунок 1.1 – Окуляри Sword of Damocles

Незважаючи на свою громіздку конструкцію, яка вимагала підвішування до

стелі, "Sword of Damocles" дозволив користувачам зазирнути у новий світ, сповнений можливостей. Ранні прототипи цих окулярів доповненої реальності пропонували користувачам тривимірний дисплей на голові, який накладав цифрові зображення на фізичне середовище. За сьогоднішніми мірками такий дизайн може здатися громіздким і непрактичним, але "Sword of Damocles" відкрив нову еру імерсивних технологій. Внесок Сазерленда продемонстрував потенціал інтеграції віртуального та реального середовищ і проклав шлях для подальших досліджень та інновацій у сфері доповненої реальності.

Том Кауделл і Девід Мізелл, дослідники з Boeing Computer Services, придумали термін "доповнена реальність" на початку 1990-х років, коли розробляли рішення для аерокосмічної галузі. Їх новаторська робота полягала в розробці системи, яка проектувала інструкції на дисплей, який встановлений на голові, пропонуючи робітникам миттєві вказівки протягом усієї роботи (див. рис. 1.2).

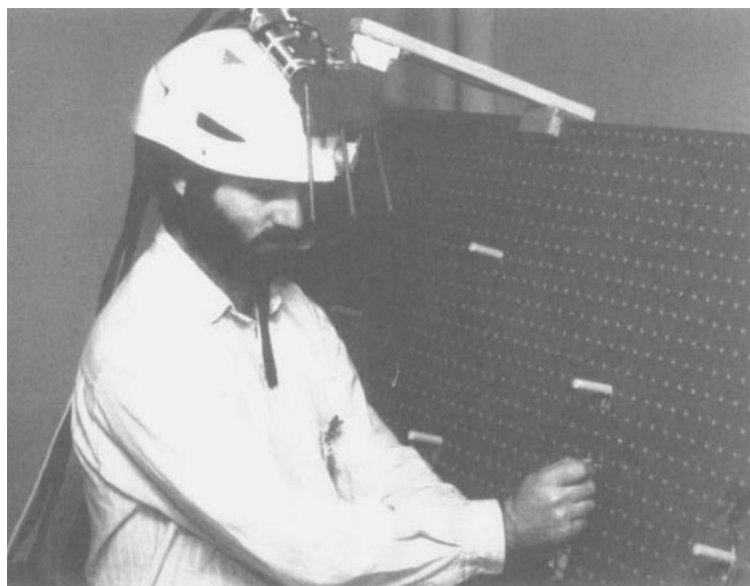


Рисунок 1.2 – Наголовний дисплей під назвою "Доповнена реальність" зі стерео електронно-променевою трубкою та магнітною системою стеження

Ця новаторська технологія не лише підвищила ефективність та точність виробництва літаків, але й продемонструвала трансформаційний потенціал доповненої реальності в цій галузі.

Луїс Розенберг у 1992 році розробив систему доповненої реальності Virtual

Fixture (див. рис. 1.3), яка призначена для навчання пілотів Військово-повітряних сил. Ця система дозволяла пілотам взаємодіяти з віртуальними об'єктами, розміщеними у фізичному середовищі, покращуючи симуляції навчання та навички пілотування. Virtual Fixtures продемонструвала потенціал доповненої реальності у військових цілях і підкреслила її здатність підвищувати ефективність та безпеку тренувань.



Рисунок 1.3 – Система Virtual Fixtures

Продюсер та письменниця Джулі Мартін у 1994 впровадила доповнену реальність у театральні вистави, зробивши своє шоу "Dancing in Cyberspace" одним з перших, в якому акробати взаємодіяли з віртуальними об'єктами на сцені. Це перше використання доповненої реальності у сфері розваг провістило її майбутнє впровадження в різні форми медіа та живі виступи.

Доповнена реальність вперше з'явилася у спортивному телебаченні в 1998 році із запровадженням графічної системи "1st & Ten" у прямих трансляціях Національної футбольної ліги. Ця система показувала на полі віртуальну жовту лінію (див. рис. 1.4), яка вказувала на позицію, необхідну для першого дауну, що зробило революцію в спортивному телебаченні, надаючи глядачам інформацію в реальному часі та покращуючи їхнє розуміння гри.



Рисунок 1.4 – Графічна система "1st & Ten"

"AR Quake" стала першою грою з доповненою реальністю, яка була випущена на початку 2000-х років (див. рис. 1.5), і заклала основу для інтерактивних ігор з доповненою реальністю. Ця гра дала змогу зазирнути в майбутнє розваг з ефектом присутності.



Рисунок 1.5 – Гра AR Quake

Компанія BMW у 2008 році впровадила доповнену реальність у комерційну друковану рекламу. Цей новаторський підхід дозволив споживачам взаємодіяти з друкованими матеріалами із віртуальними 3D-моделлями продуктів BMW (див. рис. 1.6). Взаємодіючи з рекламою через смартфон або планшет, користувачі могли досліджувати та взаємодіяти з віртуальною моделлю, що зробило революцію в традиційних рекламних технологіях.



Рисунок 1.6 – Реклама Mini Cooper: переміщення журналу синхронізує 3D-модель автомобілю, відображаючи його з різних ракурсів

У цей період доповнена реальність також з'явилася у видавничій індустрії: журнал Esquire у 2009 році першим запропонував обкладинку з доповненою реальністю (див. рис. 1.7).



Рисунок 1.7 – Обкладинка журналу Esquire з доповненою реальністю

Ця ініціатива включала інтерактивний цифровий контент, доступний через мобільні пристрої. Відсканувавши обкладинку журналу смартфоном або планшетом, читачі могли розблокувати додатковий мультимедійний контент, який по-новому оживляв сторінки журналу.

Випуск окулярів Google Glass (див. рис. 1.8) у 2014 році став поворотним моментом у впровадженні технології доповненої реальності на споживчому ринку. Цей інноваційний пристрій надав користувачам вільний доступ до

доповненої реальності та підключення до Інтернету та проклав шлях до нових застосувань у повсякденному житті.



Рисунок 1.8 – Окуляри Google Glass

У 2015 році такі соціальні медіа-платформи, як Snapchat, першими інтегрували фільтри доповненої реальності у свої інтерфейси (див. рис. 1.9), а Facebook та Instagram швидко пішли за ними, зробивши доповнений контент звичайною частиною онлайн-взаємодії.



Рисунок 1.9 – Фільтри Snapchat

Фільтри доповненої реальності стали для користувачів творчим інструментом для покращення їхніх фотографій та відео, підвищуючи залученість та взаємодію користувачів.

Ігри з доповненою реальністю, що базуються на місцезнаходженні, стали популярними у 2016 році із запуском Pokemon Go (див. рис. 1.10). Ця гра привернула увагу мільйонів гравців по всьому світу та продемонструвала широку привабливість доповненої реальності та її потенціал для змін в ігровій індустрії.



Рисунок 1.10 – Гра Pokemon Go

У 2016 році Microsoft випустила HoloLens – окуляри з розширеними можливостями змішаної реальності, які дозволяють користувачам створювати власний контент доповненої реальності (див. рис. 1.11).

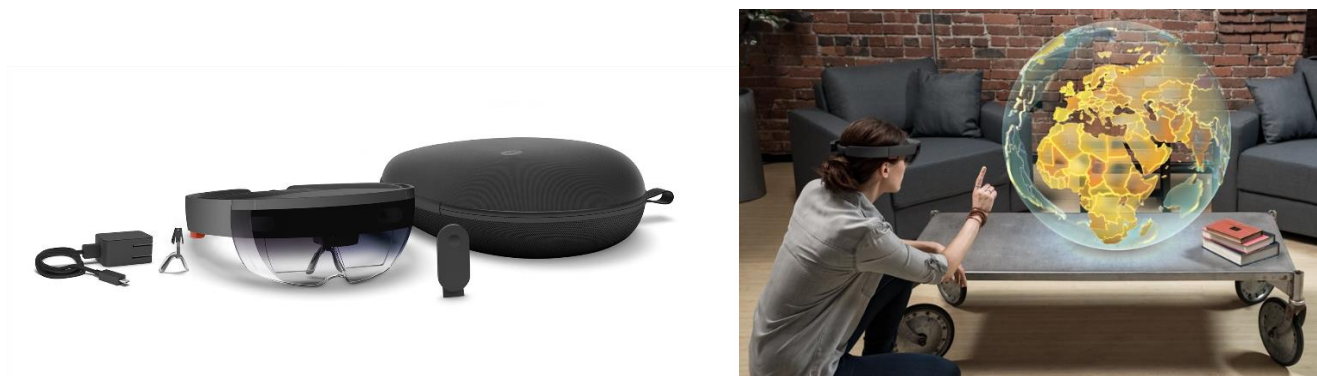


Рисунок 1.11 – Окуляри HoloLens

HoloLens дозволяє користувачам взаємодіяти з голографічними зображеннями, накладеними на навколишнє середовище, започатковуючи новий етап незабутніх вражень та можливостей розвитку бізнесу.

Щоб покращити для користувачів досвід покупок, у 2017 році ІКЕА впровадила на практиці технологію доповненої реальності (див. рис. 1.12). Доповнена реальність змінила процес купівлі меблів для дому, дозволивши покупцям попередньо переглянути їх у власній оселі перед покупкою, зменшивши невизначеність та підвищивши впевненість у виборі.

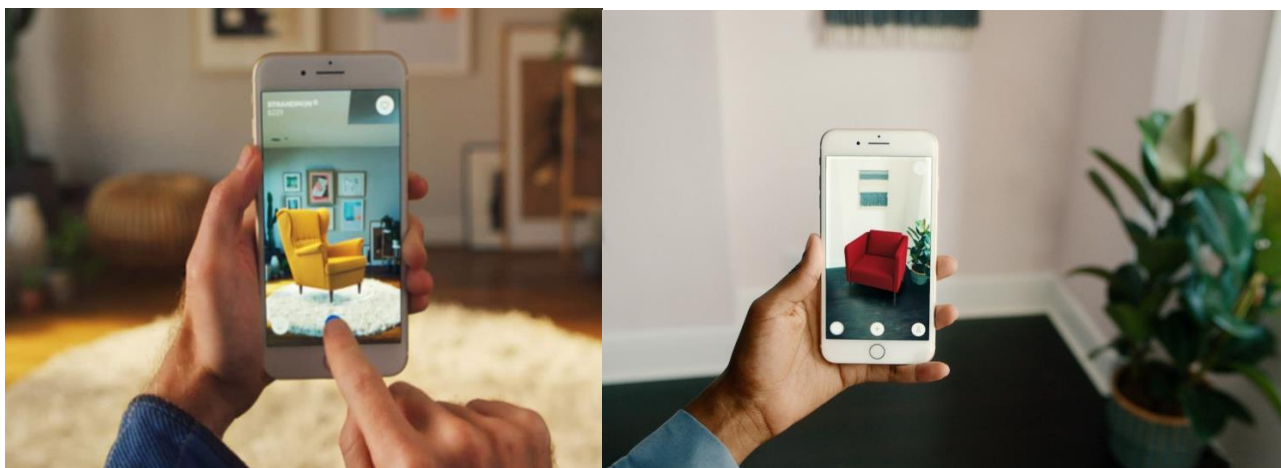


Рисунок 1.12 – Додаток IKEA Place

У 2017-2018 роках Google та Apple запустили ARCore SDK та ARKit відповідно, зробивши доповнену реальність доступною для розробників по всьому світу. Для створення AR-додатків на пристроях Android та iOS ці платформи пропонують ресурси та інструменти, сприяючи розвитку новаторських ідей та розвиваючи доповнену реальність.

У 2020-тих роках компанія svarmony стала першопрохідцем у створенні імерсивних просторових вражень. Вони розширили межі можливого за допомогою навігаційних систем та масштабованих рішень на основі доповненої реальності, а також відіграли ключову роль у розвитку цих інновацій.

У 2023 році компанія Apple презентувала передовий пристрій для просторових обчислень Apple Vision Pro, який поєднує 3D-камеру та гарнітуру віртуальної реальності (див. рис. 1.13), щоб безперешкодно поєднувати цифровий контент з фізичним середовищем та забезпечувати новий користувацький досвід. Переміщаючись по тривимірному інтерфейсу, користувачі можуть взаємодіяти з Apple Vision Pro за допомогою інтуїтивно зрозумілих засобів введення, таких як візуальний контроль, жести та голосові команди, а також досліджувати повністю імерсивний 3D-інтерфейс. Завдяки інноваційним функціям, таким як екран надвисокої роздільної здатності, вдосконаленим аудіофункціям та управлінню руками та очима, Apple Vision Pro переосмислює досвід роботи з комп'ютером, іграми та розвагами. Він також відкриває широкий спектр комерційних

можливостей, таких як дистанційна допомога, віртуальна співпраця, дослідження споживачів та професійний розвиток. Оскільки просторові обчислення продовжують розвиватися, Apple Vision Pro визначає напрямок майбутнього для взаємодії людини з комп'ютером та технологій.

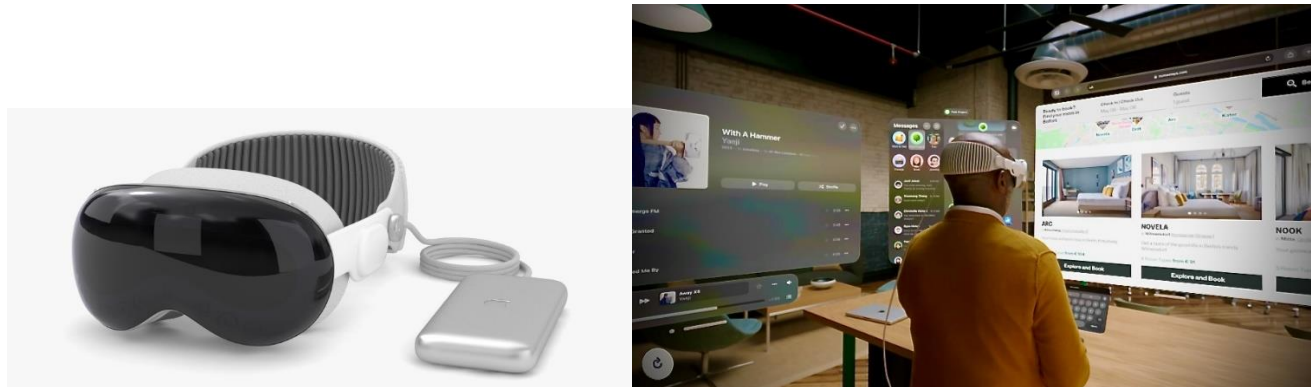


Рисунок 1.13 – Apple Vision Pro

Отже, розвиток технології доповненої реальності пройшов важливі етапи протягом десятиліть, від роботи Івана Сазерленда у 1960-х роках, до масового впровадження AR-ігор та додатків у 2010-х, кожен з яких зробив свій внесок у розвиток та диверсифікацію технології доповненої реальності. Поява інноваційних продуктів, таких як гарнітура Vision Pro від Apple у 2020-х роках, ознаменувала новий етап інновацій, а просторові обчислення стали трансформаційною силою в різних галузях. Розвиток технологій доповненої реальності ще далекий від завершення, а її подальший прогрес трансформує відносини між цифровим і фізичним світом у найближчі роки.

1.2 Аналіз наукової та патентної літератури

Поєднання доповненої реальності зі штучним інтелектом у додатках віртуальних примірок – це велике досягнення у сфері онлайн-покупок. Використовуючи ці передові технології, компанії прагнуть революціонізувати спосіб взаємодії клієнтів з продуктами у віртуальному середовищі, покращуючи досвід онлайн-покупок. Віртуальні примірки з доповненою реальністю дозволяють користувачам віртуально приміряти товари в режимі реального часу, пропонуючи більш захоплюючий та інтерактивний досвід, ніж традиційні онлайн-

покупки [2]. Перш ніж прийняти рішення про покупку, користувачі можуть побачити, як різні товари виглядатимуть на них при накладанні зображення обраних товарів в режимі реального часу на відеозаписи з пристрою користувача [3]. Алгоритми штучного інтелекту також використовуються для автоматизації різних аспектів процесу примірки та подальшого покращення досвіду віртуальної примірки. Додатки віртуальних примірочних на основі штучного інтелекту спрощують операції та надають користувачам більш персоналізований досвід від точної ідентифікації та сегментації модних товарів до динамічного підбору текстур і стилів.

Патент Каура Радждіпа "VIRTUAL FITTING ROOM" описує додаток віртуальної примірочної, який вирішує поширену проблему онлайн-покупців, а саме – неможливість фізично приміряти одяг перед покупкою [4]. Інновація надає рішення, яке дозволяє користувачам в цифровому форматі приміряти різні типи одягу на персоналізованій тривимірній графічній моделі перед здійсненням покупки. Додаток працює через користувацький інтерфейс, який підключений до комп'ютера із запущеною програмою віртуальної примірочної. Пристрій отримує значення різних параметрів, що характеризують розміри людського тіла. Ці параметри використовуються серверною системою для створення тривимірної графічної моделі тіла людини. Потім інтерфейс користувача отримує дані, які ідентифікують одяг з різних варіантів. При створенні 3D-моделі одягу серверна система накладає обраний одяг на тривимірну графічну модель та після цього відображає її користувачеві та надає можливість здійснити покупку. Ця інновація спрямована усунути суттєвий недолік онлайн-покупок, а саме невпевненість щодо того, чи підійде конкретний одяг до фігури покупця. Метою є запобігання поверненню товару через різницю в розмірах, заощадження часу та зменшення розчарування клієнтів, дозволивши їм приміряти одяг в цифровому форматі перед покупкою. Додаток також імітує реальний досвід шопінгу, показуючи одяг у графічному гардеробі, подібному до фізичного середовища магазину. Покращений досвід покупок у поєднанні зі зручністю віртуальної примірки може підвищити лояльність клієнтів, що може призвести до збільшення доходів

онлайн-продавців [5]. Ключовими особливостями додатку віртуальної приміркової є можливості отримувати широкий спектр параметрів тіла, генерувати уточнені тривимірні моделі на основі цих параметрів і проводити такі інтерактивні маніпуляції з одягненою тривимірною моделлю, як обертання та масштабування. Додаток також може створювати скульптуру обличчя на основі наданих користувачем фотографій, що підвищує реалістичність віртуальної примірки. Отже, цей патент описує інноваційне рішення, яке використовує доповнену реальність та штучний інтелект, дозволяє користувачам приміряти одяг у цифровому форматі за допомогою 3D-моделі, адаптованої до їхнього розміру, а також вирішує поширену проблему в онлайн-шопінгу: невідомість того, чи підійде одяг за розміром.

Патент "VIRTUAL FITTING ROOM SYSTEM AND METHOD USING 3D AVATAR" представляє систему приміркової та спосіб покращення досвіду онлайн-покупок, зокрема одягу, за допомогою тривимірних аватарів [6]. Основними компонентами системи є термінали користувачів, оснащені датчиками зображення, сервер віртуальної приміркової і, в деяких випадках, сервер фізичного магазину. Термінал користувача – пристрій, що використовується клієнтом для взаємодії з системою віртуальної приміркової. Він затоплює двовимірні зображення тіла та виробів і передає їх на сервер віртуальної приміркової. Сервер віртуальної приміркової обробляє 2D-зображення, отримані з терміналу користувача, для генерації 3D-аватарів і відповідних зображень товарів. Він виконує примірку зображень товару на аватар і надсилає відповідну інформацію про 3D-примірку на користувацький термінал. Опціонально система може включати сервери, які пов'язані з фізичними магазинами. Такий сервер може запросити генерацію 3D-зображення всього тіла покупця за допомогою дзеркал доповненої реальності. Також для спрощення процесу передачі 2D-зображень одягу, який покупець хоче придбати, система може використовувати QR-коди. Отже, патент пропонує інноваційний підхід до віртуальної приміркової, яка використовує 3D-аватари, щоб забезпечити більш точне та реалістичне представлення товарів для покупців. Використання 3D-аватарів також може бути

ефективним маркетинговим інструментом для роздрібних торговців одягом, оскільки зацікавлює споживачів і зменшує потребу у фізичних зразках під час виробництва одягу.

Патент Марго Осмундсен-Репп "SYSTEM AND METHOD FOR PROVIDING A PLATFORM FOR VIRTUAL AUGMENTED REALITY FITTING OF AN ITEM" описує систему та спосіб для забезпечення віртуальної примірки товару у доповненій реальності, сприяючи з використанням технології доповненої реальності покращенню досвіду онлайн-покупок [7]. Система містить один комп'ютер користувача, який підключений до його мережі, і сервер додатків, на якому розміщена прикладна система для віртуальної примірки товарів за допомогою використання модуля доповненої реальності. Прикладна система складається з модуля інтерфейсу користувача, модуля доповненої реальності та бази даних об'єктів, що зберігає накладені зображення різних об'єктів. Модуль доповненої реальності взаємодіє з базою даних товарів, накладаючи зображення вибраних товарів на відео, зняте модулем захоплення зображень, що дозволяє користувачам бачити в реальному часі, як різні товари виглядають на них. Це створює ефект віртуальної приміркової, що дозволяє користувачам побачити товар на собі перед покупкою та прийняти обґрунтоване й ретельно обдумане рішення про покупку. Основні функції системи включають запис рухів користувача, відображення відео в реальному часі на комп'ютері користувача, створення облікового запису користувача, зберігання записаних сеансів примірок та зберігання характеристик товарів у відповідній базі даних. Система також включає комунікаційний модуль між стороннім комп'ютерним пристроєм та комп'ютерним пристроєм користувача для зв'язку. Отже, ця інновація має на меті покращити досвід онлайн-покупок, подолавши розрив між фізичною та віртуальною примірною, шляхом розміщення зображень реальних товарів на тілі користувача в режимі реального часу. Даний підхід залучає технологію доповненої реальності, щоб надати користувачам більш захоплюючий та інтерактивний досвід онлайн-покупок.

Дослідження "Realistic 3D Virtual Fitting Room" шляхом інтеграції штучного

інтелекту та доповненої реальності фокусується на покращенні методів роботи віртуальних примірочних та технології [8]. Основною метою є автоматизація та спрощення процесу онлайн-примірки, зменшення обчислень та ручної роботи. У цій науковій роботі спочатку розглядаються обмеження існуючих систем віртуальних примірочних, зокрема, обсяг ручної роботи, необхідний для правильної підгонки. Потім представлені інноваційні методи для автоматизації різних аспектів процесу примірки. У дослідженні запропоновано метод швидкої та точної оцінки вхідних значень виконавчого пристрою для роботи та конфігурації роботів, що змінюють форму, в режимі реального часу. Метою цього підходу є генерування конкретних 3D-форм на основі заданих розмірів для покращення реалістичності віртуальної примірки. Включаючи лазерне сканування та фотограмметрію, надається всебічний огляд технологій та методів 3D-сканування. Дослідження оцінює різні методи для створення 3D-реконструкцій одягу, що є важливим для додатків віртуальної примірки. Інноваційний підхід до вимірювання розміру тіла використовує інформацію про глибину з фотограмметричних скануючих пристроїв, таких як Microsoft Kinect 2. Цей метод автоматично визначає ключові розміри тіла для підвищення точності віртуальної примірки. Дослідниками було запропоновано загальну структуру для створення тривимірних хмарних точок і текстурних сіток об'єктів та сцен з використанням RGB-D кадрів, знятих камерою Kinect 2. Дослідження зосереджене на підвищенні ефективності та реалістичності 3D-реконструкції, включаючи методи мапування текстур та зменшення шуму. Також дослідниками було розроблено комплексне автоматизоване рішення для створення 3D-моделі одягу з використанням декількох зображень, знятих з різних ракурсів камерою Kinect 2. Отже, це дослідження сприяє розвитку технології віртуальних примірочних за рахунок впровадження автоматизованих методів сканування, реконструкції та 3D-моделювання одягу. Були запропоновані рішення для підвищення комерційної ефективності та надійності послуг віртуальних примірочних інтернет-магазинів одягу завдяки застосуванню штучного інтелекту та доповненої реальності. Також гнучкість запропонованих фреймворків відкриває можливості для застосування у

віртуальній та доповненій реальності, мобільних пристроях та робототехніці.

Дослідницька робота "Image-based Virtual Fitting Room" зосереджена на розробці додатку віртуальної приміркової із застосуванням штучного інтелекту та технології доповненої реальності, особливо для дизайнерів одягу та платформ електронної комерції [9]. Метою цього дослідження є усунення обмежень існуючих рішень для віртуальних примірочних. Ці рішення мають труднощі з точною ідентифікацією різних речей та зміною їхніх текстур і стилів. Запропоноване рішення використовує передові алгоритми штучного інтелекту для подолання цих викликів. У дослідженні використано новий підхід, який поєднує R-CNN маски для розпізнавання модних речей та Neural Style Transfer для трансформації стилю та текстури. Модель навчалася на наборі даних, що містить зображення PaperDoll та анотації ModaNet з eBay. Маска R-CNN використовує двоетапну процедуру з мережею пропозицій та сегментацією екземплярів для точної ідентифікації об'єктів на зображенні. Щоб створити зображення з потрібним стилем Neural Style Transfer адаптує зображення як вхідні дані контенту, а текстури як вхідні дані стилю. У цьому дослідженні були проведені експерименти, в яких вісім моделей навчалися з різними конфігураціями для оптимізації продуктивності. Дослідники використовували такі метрики, як середня швидкість спаду оцінок, щоб оцінити ефективність перенесення стилю та середня точність, щоб оцінити точність сегментації. Результати показали, що моделі, які навчені прогресивним підходом, дали кращі результати, ніж моделі, які навчені з частковим навчанням або з нуля. Поєднання R-CNN маски та Neural Style Transfer являє собою новий підхід при розробці віртуальної приміркової. За допомогою передових технологій штучного інтелекту можна значно підвищити точність сегментації та реалістичність передачі стилю, покращуючи загальний користувацький досвід. Отже, це дослідження вирішує основну проблему віртуальних примірочних і пропонує більш надійне та реалістичне рішення для користувачів і бізнесу.

Дослідження "Virtual Fitting Room and Its Potential in E-Commerce" фокусується на викликах, з якими стикається індустрія моди в епоху

діджиталізації та онлайн-покупок [10]. Основна мета – розробити рішення, яке інтегрує віртуальні примірочні з платформами електронної комерції для покращення клієнтського досвіду інтернет-шопінгу. Інновація передбачає створення віртуальної примірочної з базою даних 3D-аватарів, надаючи користувачам можливість в бажаному стилі віртуально приміряти одяг. Пропонується комплексний підхід до віртуальної примірки, використовуючи для динамічних аватарів технологію CLO3D, яка дозволяє клієнтам уявити, як різний одяг сидить та виглядає на їхньому тілі, та для побудови 2D-лекал – Gemini Cad Systems, яка дає змогу визначити, які корективи необхідно внести, щоб поліпшити посадку. Дослідження також включало вивчення вподобань та сприйняття покупцями віртуальних примірочних та онлайн-покупок. Результати показали, що віртуальні примірочні користуються високим попитом як рішення для покращення досвіду онлайн-шопінгу та зменшення кількості повернень. Інтеграція віртуальних примірочних з платформами електронної комерції може покращити комунікацію з користувачами та уможливити персоналізовані рекомендації на основі розміру. Отже, дослідження підкреслює важливість використання та застосування штучного інтелекту та технологій доповненої реальності, адаптації до цифрових змін в індустрії моди та впровадження віртуальних примірочних для підвищення ступеня задоволеності користувачів, зниження кількості повернень та збільшення продажів на платформах електронної комерції.

Отже, аналіз наукової літератури та патентів свідчить про значний розвиток технологій у віртуальних примірочних завдяки об'єднанню доповненої реальності із штучним інтелектом. Ці інноваційні рішення мають на меті змінити досвід онлайн-покупки, пропонуючи користувачам інтерактивний, захоплюючий та персоналізований спосіб віртуально приміряти товари перед тим, як їх купити. Патенти та дослідження демонструють різноманітні підходи: від систем, що використовують модулі доповненої реальності для накладання в реальному часі зображень товарів на відео до реалістичних віртуальних примірок з використанням 3D-аватарів. Ці технології можуть подолати розрив між фізичним

і віртуальним досвідом та збільшити реалістичність та зручність покупок. Створення алгоритмів, використовуючи штучний інтелект, також може автоматизувати такі процеси, як 3D-сканування, реконструкція та моделювання одягу для підвищення точності та зменшення ручної роботи. Також компанії можуть пропонувати більш надійні та ефективні послуги віртуальної примірки, застосовуючи на основі штучного інтелекту рішення, що згодом підвищить комерційну ефективність та задоволеність клієнтів. Оцифрування продовжує трансформувати індустрію моди, а ці інноваційні рішення прокладають шлях до більш безперешкодного та цікавого досвіду онлайн-покупок.

1.3 Проблеми та протиріччя у вирішенні завдань

Попередні патенти та дослідження привели до значного прогресу в розробці віртуальної роздягальні, використовуючи технології доповненої реальності та штучного інтелекту, але багато невирішених питань та протиріч залишаються без відповіді, що обґрунтовує необхідність подальших досліджень.

Незважаючи на прогрес у створенні 3D-аватарів та накладанні зображень на об'єкти, існуючі системи часто мають проблеми з точним моделюванням того, як різні товари виглядатимуть на користувачах у реальному часі, тому досягнення точної та реалістичної посадки залишається складним завданням. Щоб це вирішити необхідно підвищити точність віртуальної примірки, наприклад, за допомогою алгоритмів або метрик.

Деякі віртуальні примірочні є багатообіцяючими в контрольованих умовах, але їх важко адаптувати до великої кількості реальних користувачів [11]. При створенні інклюзивної віртуальної примірочної важливо забезпечити доступність для користувачів з різними потребами, в тому числі для користувачів з інвалідністю.

Багатьом сучасним рішенням бракує надійних можливостей для персоналізації та кастомізації. Незважаючи на те, що деякі системи пропонують базові налаштування, які ґрунтуються на вимірах тіла, вони часто не враховують індивідуальні нюанси фігури або стильові уподобання людини. Тому розширення

можливостей персоналізації та кастомізації може надати користувачам більш цікавий та персоналізований досвід віртуальної примірки.

Інтеграція віртуальної примірочної в існуючі онлайн-платформи для торгівлі має такі технічні виклики, як здатність до взаємодії зі сторонніми додатками, а також сумісність з різними пристроями та програмними системами. Щоб забезпечити безперебійну роботу користувачів в різних середовищах та на різних платформах ці проблеми потрібно вирішити.

Оскільки додатки віртуальних примірочних можуть автоматично за замовчуванням збирати особисті дані користувачів, такі як розміри тіла та стилеві уподобання, важливо забезпечити конфіденційність та безпеку даних. Розробка надійних заходів для захисту конфіденційності користувачів і запобігання несанкціонованому доступу до персональних даних має важливе значення для побудови довіри з користувачами, бо існуючі рішення можуть не відповідати вимогам захисту даних та ризикам кібербезпеки.

Отже, проблеми та протиріччя, згадані вище, потребують подальшого дослідження. Також вирішення цих проблем створить нові можливості для покращення досвіду онлайн-покупок, які сприятимуть змінам віртуальної взаємодії користувачів з модними товарами та їх придбанням в Інтернеті, а також сприятимуть зростанню бізнесу в індустрії моди.

1.4 Постановка задачі

Задача полягає в дослідженні та використанні оптимальної технології доповненої реальності для програмної реалізації віртуальної примірочної аксесуарів за допомогою механізму штучного інтелекту розпізнавання маркерів.

Дослідження технологій доповненої реальності для віртуальної примірочної аксесуарів включає наступні етапи:

- огляд сучасних технологій доповненої реальності, таких як Wikitude, ARKit, ARCore, Vuforia, Kudan та Unity AR Foundation, також важливо врахувати їх ключові особливості, переваги та недоліки;
- порівняльний аналіз цих платформ за різними критеріями,

використовуючи метод лінійної адитивної згортки з урахуванням вагових коефіцієнтів та нормуючих множників.

Аналіз механізму розпізнавання маркерів включає наступні кроки:

- визначення ролі маркерів: маркери будуть визначатися як попередньо визначені візуальні підказки, які AR-система використовує для точного відстеження та ідентифікації віртуальних об'єктів у реальному середовищі;
- використання бінарних маркерів для полегшення точного розпізнавання та стабільного відстеження в динамічному середовищі;
- реалізація механізму розпізнавання маркерів, яка включає застосування адаптивного порогового значення, фільтрацію контурів та використання метрики нормалізованої крос-кореляції для підвищення точності системи;
- оптимізація та вдосконалення: ітеративний процес вдосконалення на основі результатів експерименту для досягнення найкращих результатів.

Розробка віртуальної примірочної аксесуарів включає наступні етапи:

- проектування та розробка додатку з використанням оптимальної технології доповненої реальності та механізму штучного інтелекту;
- фокус на користувацькому досвіді та забезпеченні безперешкодного використання на різних платформах.

Оцінка ефективності механізму розпізнавання маркерів наступні етапи:

- проведення експериментів з механізмом розпізнавання маркерів для оцінки його точності у розташуванні аксесуарів на людині у віртуальній примірочній;
- маніпулювання факторами, такими як якість камери, умови освітлення та місцезнаходження людини, для оцінки їх впливу на точність розташування.

У дослідженні важливо з'ясувати, наскільки ефективні технології доповненої реальності та механізм штучного інтелекту для розробки віртуальної примірочної аксесуарів.

2 ОБҐРУНТУВАННЯ МЕТОДОЛОГІЇ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Вибір напрямку дослідження

Технології доповненої реальності пропонують безліч платформ та фреймворків для безперешкодної інтеграції віртуального контенту з реальним світом, серед них Wikitude, ARKit, ARCore, Vuforia, Kudan та Unity AR Foundation. Кожна з цих технологій має унікальні можливості та функції, що підходять для різних застосунків і сценаріїв використання. Для віртуальної примірочної аксесуарів вибір технології доповненої реальності повинен визначатися такими факторами, як наявність маркерного відстеження, сумісність та підтримка пристроїв, точність відстеження, простота інтеграції, продуктивність та швидкість реагування, середовище розробки та підтримка та наявність у тарифному плані безкоштовної опції. Також вибір технології має великий вплив на загальний користувацький досвід, зокрема на точність розміщення віртуальних аксесуарів, візуальну достовірність та взаємодію в реальному часі. Тому важливо провести ретельний аналіз та порівняти ці технології доповненої реальності, щоб визначити, яка технологія найкраще підходить для розробки віртуальної примірочної.

Поєднання механізму штучного інтелекту, як розпізнавання маркерів, із технологією доповненої реальності має великий потенціал для покращення функціональності та реалістичності віртуальної примірочної аксесуарів. Механізм розпізнавання маркерів може ідентифікувати та відстежувати певні маркери або шаблони в реальному світі, дозволяючи точно відображати та позиціонувати віртуальний об'єкт у фізичному середовищі. Також розпізнавання маркерів відіграє важливу роль у точному розміщенні аксесуарів на тілі користувача та в навколишньому середовищі. Використовуючи алгоритми штучного інтелекту для виявлення та відстеження маркерів, система може забезпечити бездоганне позиціонування та взаємодію віртуальних аксесуарів із навколишнім середовищем користувача. Це не тільки підвищить реалістичність віртуальної примірки, але й покращить загальну зручність та ефективність додатку. Таким чином, вибір механізму штучного інтелекту, зокрема розпізнавання маркерів,

може забезпечити точне позиціонування та відстеження віртуальних аксесуарів, доповнюючи можливості технології доповненої реальності. Таке поєднання може забезпечити більш захоплюючий та інтерактивний досвід у віртуальному середовищі, підвищуючи залученість та задоволеність користувачів.

Отже, напрямок дослідження спрямований на виявлення найкращої технології доповненої реальності для програмної реалізації віртуальної примірконої аксесуарів, використовуючи також механізм розпізнавання маркерів. Поєднуючи оптимальну технологію з механізмом штучного інтелекту можна покращити досвід онлайн-покупок.

2.2 Підходи до вирішення завдань

Щоб програмно реалізувати віртуальну примірочну аксесуарів потрібен підхід, який забезпечить комплексне та ефективне рішення. Цей підхід передбачає аналіз, порівняння та визначення найкращої технології доповненої реальності серед Wikitude, ARKit, ARCore, Vuforia, Kudan та Unity AR Foundation, аналіз механізму розпізнавання маркерів, а також поєднання технології та механізму штучного інтелекту для вирішення різних аспектів процесу розробки.

З моменту свого заснування у 2008 році Wikitude пропонує надійну сукупність інструментів для розробки програмного забезпечення. Цей провідний постачальник дозволяє розробникам розробляти застосунки доповненої реальності на різних платформах, від мобільних пристроїв до розумних окулярів, а основною пропозицією Wikitude є багатофункціональний SDK, який дозволяє легко інтегрувати функції доповненої реальності у свої додатки [12]. У ключові інструменти входять 3D-відстеження, розпізнавання зображень та доповнена реальність на основі геолокації. Ці інструменти підтримуються для точного розпізнавання об'єктів та середовища потужними алгоритмами комп'ютерного зору. Здатність точно накладати цифровий контент на фізичний світ є однією з сильних сторін Wikitude, що сприяє взаємодії та залученню користувачів [13]. Універсальність SDK охоплює широкий спектр платформ, включаючи Android, iOS та Unity, що забезпечує широку сумісність та доступність для розробників

усіх рівнів. Велика кількість документації та допоміжних ресурсів ще більше спрощує процес розробки доповненої реальності.

Ключові особливості та переваги Wikitude:

- розробники можуть створювати ефекти доповненої реальності, які зберігаються, навіть коли користувач віддаляється від маркера активації завдяки вдосконаленому відстеженню об'єктів, забезпечуючи безперервність та безперебійну взаємодію з віртуальним контентом, а також покращуючи загальний користувацький досвід;
- надає розширені функції розпізнавання сцен, які допомагають розробникам розуміти та взаємодіяти зі складними реальними середовищами, що дозволяє точно визначати місцезнаходження користувачів і реалістично розташовувати цифрові об'єкти у фізичному середовищі;
- має розширені функції розпізнавання зображень, які дозволяють розробникам створювати доповнену реальність на основі конкретних зображень, логотипів або об'єктів. За допомогою цієї функції цифровий контент можна накладати на реальні зображення, щоб підвищити залученість та інтерактивність;
- включає функцію Unity Live Preview, яка дозволяє розробникам у реальному часі в середовищі Unity3D переглядати та тестувати свої додатки доповненої реальності, що покращує продуктивність робочого процесу та спрощує процес розробки;
- остання версія Wikitude включає вдосконалений рушій комп'ютерного зору, який забезпечує більшу надійність і кращу продуктивність у розпізнаванні та відстеженні об'єктів. Користувачі отримують вигоду від безперебійної та стабільною працездатністю з доповненою реальністю;
- для розробки інтерактивних та динамічних ефектів доповненої реальності підтримує 3D-відстеження, які реагують на рухи та взаємодію користувачів;
- містить функцію доповненої реальності на основі геолокації, яка

дозволяє створювати взаємодію з географічно прив'язаним місцем, дозволяючи на основі фізичного місцезнаходження користувача збагатити реальне середовище цифровим контентом;

- підтримує декілька платформ, включаючи Android, iOS та Unity. Ця крос-платформна сумісність пропонує різноманітні можливості застосування, що дозволяє розробникам пропонувати свої додатки доповненої реальності ширшій аудиторії;
- дозволяє розробникам реалізовувати відстеження без маркерів, тобто для запуску контенту доповненої реальності не потрібен фізичний маркер або QR-код. Замість цього для більш плавного та інтуїтивно зрозумілого використання у середовищі користувача Wikitude доповненої реальності застосовує алгоритми комп'ютерного зору для розпізнавання та відстеження об'єктів;
- легко інтегрується з популярною платформою для розробки ігор Unity, що дозволяє розробникам використовувати робочі процеси та інструменти Unity для розробки доповненої реальності, спрощуючи процес розробки та полегшуючи створення високоякісних додатків доповненої реальності;
- пропонує гнучкість з точки зору кастомізації та масштабування, що дозволяє розробникам адаптувати свої додатки доповненої реальності до їхніх конкретних потреб. Зокрема, алгоритм відстеження, користувацький інтерфейс і контент доповненої реальності можна налаштувати так, щоб створити привабливі та унікальні враження;
- надає вичерпну документацію, ресурси підтримки, навчальні посібники, зразки коду, покрокові інструкції, а також доступ до спеціальної команди підтримки, допомагаючи у процесі розробки та забезпечуючи усіма необхідними інструментами для досягнення успіху.

Недоліки Wikitude:

- для користувачів, які тільки починають займатися розробкою доповненої реальності або не знайомі з платформою, вивчення Wikitude та його

розширених можливостей може зайняти певний час;

- для невеликих проектів або хобі з обмеженим бюджетом деякі користувачі можуть вважати вартість платної підписки Wikitude занадто високою;
- у деяких випадках, коли розробники впроваджують складні функції доповненої реальності у Wikitude, вони можуть зіткнутися з проблемами або обмеженнями продуктивності, особливо на менш потужних або старих пристроях, що може вплинути на загальний користувацький досвід;
- активність та розмір спільноти розробників може бути обмежена порівняно з іншими платформами для розробки додатків доповненої реальності, що може вплинути на доступ до ресурсів і підтримки, що надаються спільнотою;
- інтеграція Wikitude з Unity та іншими сторонніми платформами може призвести до проблем залежності та сумісності, тому користувачам слід стежити за версіями та оновленнями платформи, з метою забезпечення функціональності та сумісності.

Отже, Wikitude – це ефективний інструмент для створення доповненої реальності, який пропонує безліч функцій та можливостей для створення захоплюючих та інтерактивних додатків.

ARKit, який створений компанією Apple у 2017 році – це платформа для пристроїв iOS, яка дозволяє розробникам створювати додатки доповненої реальності. Вона використовує складні алгоритми комп'ютерного зору та інформацію з датчиків для моніторингу орієнтації та положення пристрою відносно навколишнього середовища, а також включає набір інструментів та API для інтеграції віртуального контенту в реальне середовище, яке захоплене камерою пристрою, які дозволяють створювати реалістичні та інтерактивні AR-додатки [14].

Ключові особливості ARKit:

- точно відстежує в реальному часі положення та орієнтацію пристрою,

- дозволяючи взаємодіяти із фізичним середовищем віртуальним об'єктам;
- щоб виявити та зрозуміти геометрію об'єктів та поверхонь ARKit аналізує сцени, зняті камерою, полегшуючи точне розміщення віртуального контенту;
- за допомогою камери TrueDepth на сумісних пристроях iOS підтримує розпізнавання обличчя, дозволяючи програмам розпізнавати рухи та вираз обличчя;
- оцінює рівень освітленості у навколишньому середовищі, щоб віртуальні об'єкти плавно зливатися з навколишнім середовищем та відображали реалістичні тіні;
- дозволяє розробникам використовувати розширені можливості у своїх AR-додатках, оскільки ARKit легко інтегрується з іншими фреймворками Apple, такими як Metal для рендерингу графіки та CoreML для машинного навчання.

Переваги ARKit:

- надає розробникам прості у використанні інструменти та API, які допомагають у створенні додатків доповненої реальності;
- пропонує розширені функції, які дозволяють розробляти складні додатки доповненої реальності;
- розробники отримують доступ до ресурсів, зростаючої спільноти та ринкових можливостей для AR-додатків, оскільки екосистема Apple та ARKit набувають все більшої популярності.

Недоліки ARKit:

- працює лише на iOS-пристроях;
- може обмежити сумісність зі старими пристроями на iOS, бо для оптимальної роботи потрібні пристрої з достатньою обчислювальною потужністю та сенсорами;
- потрібен час і досвід, щоб освоїти функції та можливості ARKit.

Отже, платформа ARKit є рушієм інновацій у сфері доповненої реальності завдяки розширеній функціональності, безшовній інтеграції з екосистемою Apple

та зростаючим можливостям та ресурсам. Однак розробникам слід пам'ятати про вимоги до апаратного забезпечення, залежність від платформи та криву навчання, яка пов'язана з розробкою за допомогою ARKit.

ARCore від Google – це платформа, яка призначена для розробки додатків доповненої реальності на різних пристроях Android та iOS. ARCore надає розробникам інструменти та інтерфейси API для створення додатків, які поєднують віртуальний контент з реальним світом [15]. ARCore використовує датчики руху, камеру пристрою та передові алгоритми для точного відстеження руху, оцінки освітлення та розуміння навколишнього середовища, дозволяючи віртуальним об'єктам реалістично взаємодіяти з їх фізичним оточенням.

Ключові особливості ARCore:

- визначаючи характерні точки в навколишньому середовищі та поєднуючи їх з даними датчиків для точного позиціонування цифрових елементів, ARCore відстежує положення та орієнтацію відносно світу;
- для більшого занурення у віртуальну реальність ARCore оцінює поточні умови освітлення в навколишньому середовищі, дозволяючи віртуальним об'єктам відображати реалістичні тіні та адаптуватися до навколишнього освітлення;
- розпізнає та розуміє різні поверхні в реальному середовищі, як вертикальні, горизонтальні та похилі поверхні, наприклад, стіни, підлога та столи, що дозволяючи розробникам точно розміщувати віртуальний контент;
- дозволяє розробляти додатки доповненої реальності, використовуючи знайомі інструменти та мови, оскільки надає SDK для популярних середовищ розробки, включаючи Java/OpenGL для Android, Unreal, Unity і веб-розробку;
- дозволяє розробникам створювати спільні AR-додатки, які без проблем працюють на обох операційних системах, оскільки API-інтерфейси доступні як для платформ Android, так і для iOS.

Переваги ARCore:

- дозволяє розробникам охопити ширшу аудиторію за допомогою додатків доповненої реальності, бо ARCore розроблений для роботи на різноманітних пристроях Android та iOS;
- доступний для широкого кола користувачів, бо не потребує додаткового обладнання, окрім стандартних датчиків та камер, які є в більшості смартфонів.

Недоліки ARCore:

- може призвести до невідповідностей у роботі з доповненою реальністю, оскільки специфічні особливості та функціональність можуть відрізнятися на різних платформах;
- дешевші або старіші пристрої можуть мати обмеження з точки зору точності відстеження або якості рендерингу, бо оптимальна продуктивність ARCore залежить від апаратних ресурсів пристрою;
- для користувачів, які є новачками у сфері доповненої реальності або не знайомі з API та інструментами ARCore розробка AR-додатків може потребувати певний час для навчання.

Отже, розробники можуть використовувати платформу ARCore для створення захоплюючих та інтерактивних AR-додатків для пристроїв на Android та iOS завдяки розширеним можливостям, крос-платформенній сумісності та широкій підтримці пристроїв. Незважаючи на обмеження платформи та проблеми з продуктивністю, ARCore пропонує значні переваги з точки зору доступності, гнучкості та функціональності для розробки.

Розроблена PTC SDK-компанією Vuforia, що є платформою доповненої реальності, дозволяє створювати застосунки доповненої реальності для мобільних пристроїв з широким спектром можливостей для розпізнавання та відстеження різноманітних об'єктів і середовищ в режимі реального часу [16]. Vuforia підтримує як 2D, так і 3D об'єкти, що надає розробникам гнучкість у створенні різноманітних AR-додатків.

Ключові особливості Vuforia:

- контент доповненої реальності можна розміщувати на таких об'єктах, як

іграшки, промислове обладнання та транспортні засоби, оскільки Vuforia ідентифікує форми об'єктів за допомогою попередньо визначених 3D-моделей;

- за допомогою Vuforia Creator і професійних 3D-сканерів можна доповнити реальне середовище та точно налаштувати постійний контент у різних умовах;
- щоб покращити взаємодію з фізичним середовищем можна розміщувати контент доповненої реальності на різних поверхнях;
- кастомізовані маркери VuMarks кодують структуру даних для чіткої ідентифікації та відстеження в додатках доповненої реальності, а також забезпечують гнучкість дизайну та можливості брендування;
- наявність хмарного сервісу розпізнавання, який ефективно оновлює бази даних новими зображеннями та розпізнає великі обсяги зображень;
- інтегрує ресурси пристрою з функціями Vuforia Engine, щоб забезпечити оптимальну роботу доповненої реальності та стабільну продуктивність на всіх пристроях;
- у доповненій реальності розпізнає різноманітні штрих-коди, розширюючи діапазон інтерактивних можливостей;
- для тестування та вдосконалення робочих процесів розробки записує та відтворює сеанси доповненої реальності, щоб полегшити налагодження та ітеративну розробку;
- покращує взаємодію та безперервність доповненої реальності, забезпечуючи надійне і точне відстеження, навіть коли об'єкти або контент більше не перебувають в полі зору камери.

Переваги Vuforia:

- забезпечує безперервну розробку та розгортання на різних пристроях завдяки інтеграції з Unity і підтримці платформ Android та iOS;
- надає детальну документацію та інструменти, щоб полегшити розробникам вивчення та застосування функцій доповненої реальності;
- хмарні сервіси розпізнавання полегшують масштабування додатків, які

поєднують цифровий контент з реальним світом через ефективне управління та оновлення баз даних зображень;

- пропонує надійні можливості відстеження різноманітних об'єктів і середовищ, щоб забезпечити точне розміщення та взаємодію віртуального контенту.

Недоліки Vuforia:

- може потребуватися оптимізація продуктивності доповненої реальності на старих або дешевих пристроях;
- створення точних об'єктів або контенту на місцевості може вимагати спеціального обладнання та досвіду, що ускладнює процес розробки;
- може потребуватися певний час для навчання для користувачів, які не знайомі з доповненою реальністю або Vuforia SDK через наявність широкого набору функцій.

Отже, Vuforia – це потужна AR-платформа та SDK, яка надає безліч можливостей та функціональності для створення імерсивних та інтерактивних AR-додатків. Vuforia дозволяє розробникам будувати різноманітні додатки доповненої реальності для пристроїв Android та iOS завдяки універсальній підтримці, розширеним функціям відстеження та крос-платформенній сумісності. Незважаючи на те, що Vuforia вимагає певного часу на освоєння та вимагає певної продуктивності, вичерпна документація та потужні функції роблять її популярним вибором серед розробників для створення проектів доповненої реальності.

Kudan – це SDK для доповненої реальності, який розроблений, щоб забезпечити комплексне рішення для розробників доповненої реальності. Основний рушій Kudan розроблено на C++ зі спеціальною архітектурою, яка спрямована на забезпечення високої продуктивності без шкоди для використання пам'яті [17]. Kudan пропонує підтримку маркерного і безмаркерного відстеження. Kudan задовольняє різноманітні вимоги до розробки, від автономних проектів до вбудованих систем, надаючи власні API для Java (Android) та Objective-C (iOS).

Ключові особливості Kudan:

- дозволяє розробникам надавати чудові можливості доповненої

реальності на широкому спектрі пристроїв, не вимагаючи новітнього апаратного забезпечення завдяки власним API для Android та iOS та інтеграції з Unity;

- підтримує відстеження з маркерами або без них, що дозволяє розробникам створювати доповнену реальність з фізичними маркерами або без них. Така гнучкість дозволяє створювати різноманітні додатки;
- надає такі налаштовувані опції для розширеного використання, як захоплення та запис зображень високої чіткості, підтримка високоякісного рендерингу та підтримка перетворення текстур у реальному часі. Розробники також можуть комбінувати стерео- або монокамери з іншими датчиками, наприклад, датчиками глибини, щоб покращити досвід доповненої реальності;
- пропонує безкоштовний ліцензійний план для незалежних розробників та приватних осіб, надаючи їм необмежений доступ до основних функцій SDK, що робить Kudan доступним для розробників усіх рівнів, від ентузіастів до професіоналів.

Переваги Kudan:

- основний рушій оптимізовано для швидкої та надійної роботи, а оптимізація для конкретної архітектури вбудована в збірку для безперебійної роботи на різних пристроях та мінімізації використання пам'яті;
- масштабовані ліцензійні плани задовольняють розробників різних рівнів, розширюючи доступність Kudan для різноманітного кола користувачів;
- надає розробникам гнучкість у створенні різноманітних AR-додатків, пристосовані до їхніх конкретних вимог за допомогою підтримки маркерного та безмаркерного відстеження.

Недоліки Kudan:

- вивчення розширених функцій може потребувати певного часу;
- доступність ресурсів підтримки спільноти може бути більш обмеженою порівняно з деякими іншими AR SDK.

Отже, надаючи підтримку та інструменти, які необхідні для втілення творчих задумів розробників у сфері доповненої реальності, Kudan є привабливим варіантом для користувачів, які шукають адаптивне та комплексне рішення для своїх AR-проектів.

Розробники можуть використовувати пакет Unity AR Foundation у середовищі Unity3D для створення додатків доповненої реальності, які безперешкодно працюють на різних платформах. Цей пакет пропонує уніфікований інтерфейс для доступу до функцій доповненої реальності на різних платформах, включаючи iOS і Android, за допомогою використання специфічних для кожної платформи AR SDK, таких як ARKit та ARCore, що полегшує розгортання на різних пристроях і операційних системах [18].

Ключові особливості Unity AR Foundation:

- надає функції для рендерингу зображення з камери пристрою та можливість оцінювати освітлення, покращуючи візуальну якість сцени доповненої реальності;
- можна відстежувати обертання та положення пристроїв доповненої реальності у фізичному просторі, забезпечуючи точну просторову взаємодію в AR-додатках;
- дозволяє керувати сеансами доповненої реальності, а також запускати, призупиняти та налаштовувати роботу з доповненою реальністю на цільових платформах;
- підтримує виявлення та відстеження тривимірних об'єктів і двовимірних зображень, що дозволяє створювати AR-досвід, який реагує на певні візуальні сигнали або подразники;
- функція виявлення поверхонь дозволяє відстежувати та виявляти плоскі поверхні в реальному середовищі, забезпечуючи безперешкодну взаємодію між цифровими об'єктами та їхнім фізичним оточенням;
- підтримує виявлення та відстеження важливих точок у навколишньому середовищі та забезпечує точну взаємодію, спрямовуючи промінь на відстежуваний об'єкт;

- дозволяє виявляти та відстежувати людські обличчя й тіла, розширюючи можливості для інтерактивних AR-додатків, які використовують розпізнавання обличчя та відстеження рухів;
- можна використовувати якорі для відстеження довільних точок у просторі та генерувати сітки середовища;
- дозволяє закривати AR-контент фізичними об'єктами для підвищення реалістичності AR-сцен та підтримує створення кубомapi, тобто 360-градусних зображень або текстур для представлення навколишнього середовища у віртуальному просторі.

Переваги Unity AR Foundation:

- розробники можуть працювати у знайомому середовищі Unity3D і використовувати його широкі можливості та ресурси для створення захоплюючих AR-додатків;
- дозволяє розробляти AR-додатки, які сумісні із різними платформами, включаючи Android, iOS, Meta Quest, visionOS та HoloLens, спрощуючи процес розробки та дозволяючи охопити ширшу аудиторію;
- розробники можуть налаштовувати та розширювати AR-додатки відповідно до вимог проекту, бо Unity AR Foundation підтримує широкий спектр можливостей та функцій доповненої реальності.

Недоліки Unity AR Foundation:

- розробники можуть зіткнутися з труднощами у навчанні, особливо коли мова йде про специфічні для платформи реалізації та розширені AR-можливості;
- покладається на сторонні плагіни для доступу до ресурсів доповненої реальності, тому між різними платформами та версіями SDK можуть виникати проблеми залежності та сумісності.

Отже, Unity AR Foundation надає можливість розробляти винахідливі рішення та пропонує захоплюючі AR-функції користувачам на всіх платформах. Також Unity AR Foundation дозволяє розробникам розширювати межі технології доповненої реальності та створювати захоплюючий досвід, який приваблює

аудиторію по всьому світу завдяки всебічній підтримці, уніфікованому середовищу розробки та багатому набору функцій і гнучкості.

У контексті доповненої реальності розпізнавання маркерів – це процес виявлення та ідентифікації заздалегідь визначених візуальних маркерів у реальному середовищі для накладання цифрового контенту. Ці маркери зазвичай є зображеннями або шаблонами, які призначені для легкого розпізнавання AR-системою, щоб точно відстежувати віртуальні об'єкти, точно представляючи їх у реальних умовах.

У дослідженні використовуються бінарні маркери, тобто візуальні підказки, які складаються зі спеціально розроблених візерунків або шаблонів, зазвичай чорно-білого кольору. На рисунку 2.1 зображено бінарні маркери від Metaіo та ArUco, які полегшують точне доповнення віртуальних елементів на реальну сцену, дозволяючи системі встановлювати та підтримувати постійну точку відліку в динамічному середовищі.

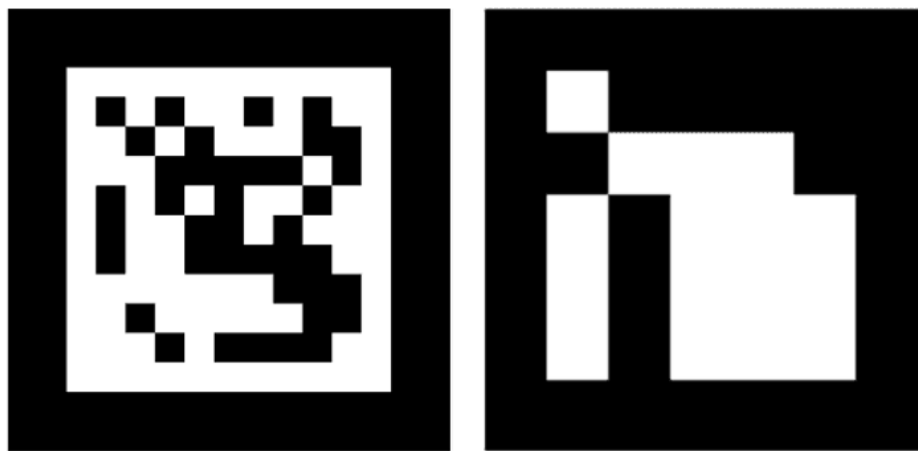


Рисунок 2.1 – Бінарні маркери від Metaіo (ліворуч) та ArUco (праворуч)

На спрощеній блок-схемі проілюстровано процес роботи системи доповненої реальності, яка детально описує послідовні кроки, що задіяні в цьому процесі (див. рис. 2.2). Спочатку отримується зображення маркера та послідовно вилучаються кадри камери, що є основою для подальших процесів відстеження. Модуль відстеження – це ядро системи доповненої реальності, який обчислює відносне положення камери. Термін "положення" охоплює шість ступенів свободи, що представляють тривимірне розташування та тривимірну орієнтацію

об'єкта [19]. Інтегрований в систему модуль дозволяє безперешкодно додавати віртуальні компоненти як невід'ємну частину реальної сцени. Враховуючи двовимірну природу кадрів з камер, система використовує проективну геометрію для точного доповнення у реальне середовище віртуальних 3D-об'єктів.

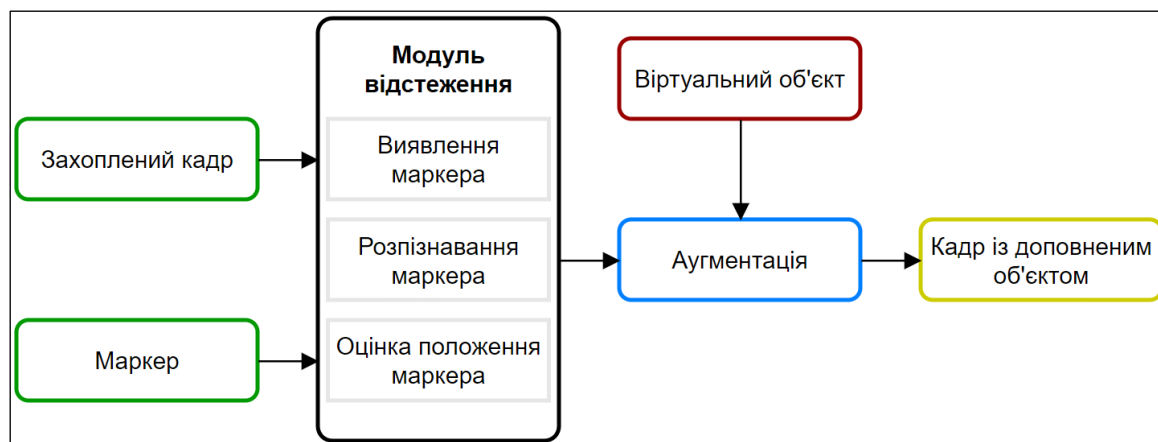


Рисунок 2.2 – Блок-схема системи доповненої реальності

При використанні бінарного маркера для відстеження потрібний маркер повинен бути надрукований і розміщений перед камерою, що є невід'ємним недоліком цього підходу, проте є переваги його використання:

- забезпечує точне відстеження, дозволяючи віртуальним об'єктам безперешкодно інтегруватися в реальний світ з високою точністю;
- легко виявляється та розпізнається навіть в умовах різного освітлення або при частковій оклюзії, тобто коли тільки частина об'єкта затуляється або блокується з поля зору;
- процес виявлення та розпізнавання маркерів виконується швидко та ефективно;
- придатні для широкого спектру застосувань у доповненій реальності, бо їх можна легко друкувати або відображати на різних поверхнях.

Алгоритм розпізнавання простий і базується на природі маркера, що включає застосування адаптивного порогового значення для виділення країв, виділення замкнутих контурів з бінарного зображення, фільтрацію контурів та апроксимацію контурів та виявлення контурів чотирикутної форми. Після цих кроків виявлені кандидати в маркери зберігаються для подальшого розпізнавання

маркерів.

Кожен виявлений кандидат деформується до фронтального вигляду та розбивається на блоки. Завдання алгоритму розпізнавання полягає в тому, щоб витягти двійковий код з кандидата на маркер та порівняти його з кодом істинного маркера. Найбільш схожий кандидат вважається відповідним маркером [20]. На рисунку 2.3 зображено сцену з бінарним маркером і подальшим виявленням та розпізнаванням маркера, що підкреслює ефективність алгоритму.



Рисунок 2.3 – Сцена з бінарним маркером (ліворуч) та виявленим маркером (праворуч)

У механізмі розпізнавання маркерів вибір метрики відіграє ключову роль у забезпеченні точної ідентифікації маркерів, тому буде використовуватися метрика нормалізованої крос-кореляції, де для оцінки подібності між виявленим маркером і шаблоном обчислюється значення розбіжності. Ця метрика є особливо цінною в сценаріях, де важливим є повне розуміння кореляції між значеннями пікселів маркера та шаблону. Формула для значення розбіжності в нормалізованій крос-кореляції має вигляд (див.ф.2.1):

$$D = \frac{\sum_i (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_i (x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum_i (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (2.1)$$

де x – середнє значення пікселів маркера;

y – середнє значення пікселів шаблону;

підсумовування відбувається за відповідними значеннями пікселів.

Ця формула слугує цінним інструментом у процесі розпізнавання маркерів, допомагаючи визначити схожість та відмінність між виявленим маркером і шаблоном. Включення такої метрики підкреслює досконалість механізму розпізнавання маркерів, що дозволяє адаптуватися до різних сценаріїв і сприяє підвищенню загальної точності та надійності системи доповненої реальності. Оскільки маркери точно ідентифіковані та оцінена їхня відмінність, наступні етапи механізму, включаючи оцінку пози і вирівнювання віртуального об'єкта, отримують надійну основу, забезпечуючи безперешкодну інтеграцію віртуальної примірочної аксесуарів в реальне середовище.

Отже, програмна реалізація віртуальної примірочної для аксесуарів з використанням технології доповненої реальності та механізму штучного інтелекту демонструє багатогранний підхід до вирішення проблем. Використовуючи такі технології, як Wikitude, ARKit, ARCore, Vuforia, Kudan та Unity AR Foundation, кожна з яких пропонує унікальні функції та можливості, можна створювати захоплюючі та інтерактивні AR-додатки, які дозволяють користувачам віртуально приміряти аксесуари в режимі реального часу. Використовуючи механізм розпізнавання маркерів, система може ефективно ідентифікувати та відстежувати аксесуари у віртуальній примірочній, покращуючи користувацький досвід та реалістичність додатку.

Використання технологій доповненої реальності та штучного інтелекту пропонує надійне та комплексне рішення для реалізації віртуальної примірочної аксесуарів. Такий підхід забезпечує ефективну розробку та відкриває нові можливості для індустрії моди, покращуючи досвід онлайн-покупок.

2.3 Порівняльна оцінка технологій

Зі стрімким розвитком технологій доповненої реальності впровадження віртуальної примірочної аксесуарів з використанням штучного інтелекту є передовим рішенням для покращення досвіду онлайн-покупок. Оскільки споживачі все частіше звертаються до платформ електронної комерції для задоволення своїх потреб, можливість переглядати аксесуари у віртуальному

середовищі має першорядне значення для полегшення прийняття обґрунтованих рішень про покупку. Однак, зважаючи на безліч доступних технологій доповненої реальності, від Wikitude та ARKit до ARCore, Vuforia, Kudan та Unity AR Foundation, визначення найефективнішого рішення може бути непростим завданням.

Метою цього порівняльного аналізу є оцінка та порівняння різних технологій доповненої реальності, щоб визначити найбільш підходящу для програмної реалізації віртуальної примірочної аксесуарів. Оцінка враховує такі фактори, як наявність маркерного відстеження, сумісність та підтримка пристроїв, точність відстеження, простота інтеграції, продуктивність та швидкість реагування, середовище розробки та підтримка та наявність у тарифному плані безкоштовної опції, що надає комплексний набір функцій, щоб визначити оптимальне рішення для даної проблемної області.

Для проведення цієї оцінки буде використано метод лінійної адитивної згортки, що забезпечує системний та кількісний підхід до оцінки та порівняння AR-технологій та за допомогою якого кожна технологія доповненої реальності буде оцінюватися на основі конкретних критеріїв. Кожному критерію будуть присвоєні вагові коефіцієнти, щоб відобразити його відносну важливість в контексті досліджуваної проблеми. Систематично аналізуючи переваги та недоліки кожної технології, ця оцінка має на меті надати цінну інформацію для вибору найбільш ефективного AR-рішення для реалізації віртуальної примірочної.

Наступні критерії будуть використовуватися для вибору технології доповненої реальності:

- наявність маркерного відстеження – передбачає здатність розпізнавати та відстежувати маркери, підвищуючи точність розміщення віртуальних об'єктів. Можливість відстеження маркерів для віртуальної примірочної забезпечує більш контрольовану та точну взаємодію з віртуальними аксесуарами, тому вона є дуже важливою;
- сумісність та підтримка пристроїв – технологія доповненої реальності

повинна безперешкодно функціонувати як на Android, так і iOS пристроях, забезпечуючи доступ до віртуальної примірочної широкому колу користувачів. Оцінка сумісності з різними пристроями та операційними системами має вирішальне значення;

- точність відстеження – високий рівень точності покращує користувацький досвід, роблячи AR-візуалізацію більш реалістичною та надійною. Точність відстеження є критичним критерієм для віртуальної примірочної, що забезпечує точне вирівнювання віртуальних аксесуарів з об'єктами реального світу;
- простота інтеграції – технологія, яка мінімізує складнощі інтеграції, прискорює розробку та забезпечує більш плавний користувацький досвід. Легкість, з якою технологія доповненої реальності може бути інтегрована в існуючу платформу аксесуарів, є важливою для ефективного впровадження;
- продуктивність та швидкість реагування – високопродуктивна система з мінімальною затримкою забезпечує безперебійну та захоплюючу взаємодію з користувачем у віртуальній примірочній. Оцінка продуктивності та швидкості реагування технології доповненої реальності в реальному часі має важливе значення;
- середовище розробки та підтримка – якість середовища розробки, документація та підтримка спільноти суттєво впливають на легкість впровадження та усунення несправностей. Добре підтримане середовище розробки має вирішальне значення для ефективної розробки, оновлення та подальшої підтримки;
- наявність у тарифному плані безкоштовної опції, що надає комплексний набір функцій. Цей критерій має вирішальне значення, оскільки дозволяє користувачам отримати доступ до основних функцій без додаткових витрат, що сприяє більш широкому впровадженню та вивченню можливостей технології.

Після визначення критеріїв вибору наступним кроком є їх інтеграція в

таблицю технологій доповненої реальності, де кожен критерій систематично узгоджується з відповідними значеннями (див. табл. 2.1). Цей процес забезпечує комплексну оцінку кожної технології на основі попередньо визначених критеріїв, полегшуючи структуроване порівняння та допомагаючи в процесі прийняття рішень.

Таблиця 2.1 – Технології доповненої реальності зі значеннями критеріїв вибору

	Наявність маркерного відстеження	Сумісність та підтримка пристроїв	Точність відстеження	Простота інтеграції	Продуктивність та швидкість реагування	Середовище розробки та підтримка	Наявність у тарифному плані безкоштовної опції
Wikitude	Без маркерів	Android та iOS	Висока	Висока	Висока	Широка	Обмежена
ARKit	На основі маркерів	iOS	Висока	Помірна	Висока	Широка	Обмежена
ARCore	Без маркерів	Android	Висока	Помірна	Висока	Широка	Обмежена
Vuforia	На основі маркерів	Android та iOS	Висока	Висока	Висока	Широка	Безкоштовна
Kudan	На основі маркерів	Android та iOS	Помірна	Висока	Висока	Помірна	Безкоштовна
Unity AR Foundation	Обидва	Android та iOS	Висока	Помірна	Висока	Широка	Обмежена

Нижче наведено розподіл балів за кожним критерієм для оцінки технологій доповненої реальності, а також визначаю найважливіші з них.

Наявність маркерного відстеження:

- обидва: 4 бали – відображає найвищий рівень гнучкості, вказуючи на те, що технологія підтримує як безмаркерні, так і маркерні методи відстеження, забезпечуючи універсальність та адаптивність до різних сценаріїв використання;
- на основі маркерів: 3 бали – означає, що технологія використовує відстеження на основі маркерів, що зазвичай забезпечує вищу точність та надійність завдяки використанню заздалегідь визначених візуальних

маркерів як опорних точок;

- без маркерів: 1 бал – вказує на те, що технологія покладається на безмаркерні методи відстеження, які можуть мати обмеження з точки зору точності та надійності порівняно з підходами на основі маркерів. До того ж у дослідженні важливий маркерний підхід, бо використовується механізм розпізнавання маркерів.

Різниця в балах між відстеженням без маркерів (1 бал) та відстеженням з маркерами (3 бали) відображає значну різницю в точності та надійності між цими методами. Відстеження за допомогою маркерів забезпечує вищу точність завдяки використанню заздалегідь визначених візуальних маркерів, тоді як безмаркерне відстеження покладається на природні особливості, що може бути менш точним. Додатковий бал за підтримку обох методів (4 бали) свідчить про гнучкість та адаптивність, що забезпечується поєднанням їхніх сильних сторін.

Сумісність та підтримка пристроїв:

- Android та iOS: 3 бали – передбачає широку сумісність та підтримку на різних платформах, включаючи пристрої на базі Android та iOS, що забезпечує ширше охоплення та доступність для користувачів;
- Android або iOS: 1 бал – передбачає обмежену сумісність із підтримкою лише пристроїв на базі Android або iOS, що потенційно виключає значну частину користувачів іншої платформи.

Розрив у балах між критеріями "Android та iOS" та "Android або iOS" підкреслює важливість широкої підтримки платформи для забезпечення максимальної доступності та залучення користувачів. Підтримка платформ iOS та Android гарантує, що технологія може задовольнити більшу аудиторію, в той час як обмежена підтримка може обмежити її використання та впровадження серед користувачів на непідтримуваній платформі.

Точність відстеження:

- висока: 3 бали – означає, що технологія забезпечує високоточне відстеження віртуальних об'єктів у реальному середовищі, мінімізуючи помилки та розбіжності;

- помірна: 2 бали – означає задовільну точність відстеження, з випадковими незначними помилками або коливаннями продуктивності відстеження;
- прийнятна: 1 бал – вказує на те, що точність відстеження відповідає основним вимогам, але може бути схильна до помітних помилок або неточностей.

Простота інтеграції:

- висока: 3 бали – означає, що технологію легко інтегрувати в існуючі програми або системи, що вимагає мінімальних зусиль та ресурсів;
- помірна: 2 бали – вказує на те, що інтеграція можлива, але може вимагати певних зусиль та усунення несправностей для забезпечення сумісності та безперебійної роботи;
- складна: 1 бал – вказує на те, що інтеграція є складною, зі значними перешкодами або складнощами, які необхідно подолати.

Продуктивність та швидкість реагування:

- висока: 3 бали – відображає відмінну продуктивність та чуйність, з мінімальними затримками у відтворенні віртуального контенту та реагуванні на дії користувача;
- помірна: 2 бали – відображає задовільну продуктивність та швидкість реагування, з періодичними затримками або коливаннями у часі відгуку;
- достатня: 1 бал – вказує на достатню, але не виняткову продуктивність, з помітними затримками у відтворенні віртуального контенту або реагуванні на дії користувача.

Середовище розробки та підтримка:

- широка: 3 бали – означає комплексну підтримку широкого спектру пристроїв, платформ і ресурсів для розробки, що забезпечує широку сумісність та доступ до ресурсів;
- помірна: 2 бали – вказує на достатню підтримку обмеженого кола пристроїв, платформ або ресурсів для розробки, пропонуючи достатню, але не широку сумісність та доступність до ресурсів;

- обмежена: 1 бал – мінімальна підтримка, сумісність обмежена лише кількома пристроями, платформами або обмеженим доступом до ресурсів для розробки.

Наявність у тарифному плані безкоштовної опції, що надає комплексний набір функцій:

- безкоштовна: 3 бали – вказує на те, що технологія пропонує безкоштовний рівень із суттєвими можливостями та функціями, що дозволяє користувачам вивчати та використовувати технологію безкоштовно;
- обмежена: 1 бал – вказує на те, що безкоштовна опція або недоступна, або пропонує лише базові функції, що обмежує її зручність та функціональність для користувачів без платної підписки.

Різниця в балах підкреслює важливість наявності безкоштовної опції з повним набором функцій, оскільки вона забезпечує ширший доступ, заохочує до експериментів, підтримує користувачів з обмеженим бюджетом, полегшує розробникам прийняття обґрунтованих рішень та сприяє інноваціям у сфері технологій доповненої реальності.

Визначивши шкали оцінок за критеріями, можна знайти, яка з технологій доповненої реальності підходить більше усього для програмної реалізації віртуальної примірочної за допомогою штучного інтелекту. Вирішувати дану задачу вибору AR-технології буду за рахунок лінійної адитивної згортки з ваговими коефіцієнтами за формулою (див.ф.2.2):

$$Z^* = \max_{i=1,m} \sum_{j=1}^n \alpha_j \beta_j a_{ij}, \quad (2.2)$$

де α_j – нормуючі множники;

β_j – вагові коефіцієнти.

Спочатку буду нормувати всі значення критеріїв, тобто приведу їх із урахуванням min та max із різних шкал до однієї в діапазоні [0; 1] за формулою

(див.ф.2.3):

$$f = \frac{f_{\text{вимір}} - f_{\text{min}}}{f_{\text{max}} - f_{\text{min}}} \quad (2.3)$$

Нижче наведені результати нормування значень критеріїв.

Наявність маркерного відстеження: обидва = 1, на основі маркерів = 0.6 та без маркерів = 0.

Сумісність та підтримка пристроїв: Android та iOS = 1 та Android або iOS = 0.

Точність відстеження: висока = 1, помірна = 0.5 та прийнятна = 0.

Простота інтеграції: висока = 1, помірна = 0.5 та складна = 0.

Продуктивність та швидкість реагування: висока = 1, помірна = 0.5 та достатня = 0.

Середовище розробки та підтримка: широка = 1, помірна = 0.5 та обмежена = 0.

Наявність у тарифному плані безкоштовної опції, що пропонує повний набір функцій: безкоштовна = 1 та обмежена = 0.

Після нормування всіх значень переходжу до визначення вагових коефіцієнтів. Буду це робити за допомогою пропорційного методу. Враховуючи акцент на забезпеченні надійного відстеження, широкої сумісності пристроїв та доступності безкоштовної опції, було визначено пріоритетність цих аспектів у вагових коефіцієнтах. Зокрема, вважаємо, що наявність маркерного відстеження, безкоштовної опції та сумісність й підтримка пристроїв є вирішальними факторами, які в 4 рази важливіші, ніж точність відстеження, простота інтеграції, продуктивність та швидкість реагування та середовище розробки й підтримка, важливість яких дорівнює 2, адже вони усі важливі для успішної реалізації віртуальної примірочної аксесуарів з використанням штучного інтелекту. Таким чином, отримую наступні вагові коефіцієнти:

– наявність маркерного відстеження: 0.2;

- сумісність та підтримка пристроїв: 0.2;
- точність відстеження: 0.1;
- простота інтеграції: 0.1;
- продуктивність та швидкість реагування: 0.1;
- середовище розробки та підтримка: 0.1;
- наявність у тарифному плані безкоштовної опції, що пропонує повний набір функцій: 0.2.

Тепер зроблю розрахунок у Microsoft Excel для порівняльної оцінки технологій доповненої реальності за допомогою лінійної адитивної згортки з урахуванням вагових коефіцієнтів та нормуючих множників (див. рис. 2.4). У таблицю записані вже нормовані значення критеріїв. Останній стовпчик відображає результати функції згортки.

	Наявність маркерного відстеження	Сумісність та підтримка пристроїв	Точність відстеження	Простота інтеграції	Продуктивність та швидкість реагування	Середовище розробки та підтримка	Наявність у тарифному плані безкоштовної опції	Z*
Wikitude	0	1	1	1	1	1	0	0,6
ARKit	0,6	0	1	0,5	1	1	0	0,47
ARCore	0	0	1	0,5	1	1	0	0,35
Vuforia	0,6	1	1	1	1	1	1	0,92
Kudan	0,6	1	0,5	1	1	0,5	1	0,82
Unity AR Foundation	1	1	1	0,5	1	1	0	0,75
Вагові коефіцієнти	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	

Рисунок 2.4 – Технології доповненої реальності зі значеннями критеріїв у числовому форматі

Отже, виходячи з результатів, отриманих за допомогою методу лінійної адитивної згортки, очевидно, що технологія доповненої реальності Vuforia постає як найбільш сприятливий варіант для подальшого дослідження, щоб програмно реалізувати віртуальну примірочну аксесуарів з використанням механізму розпізнавання маркерів. З максимальною оцінкою, що дорівнює 0.92, Vuforia випереджає інші альтернативи, що свідчить про її перевагу за різними критеріями, оціненими в цьому порівняльному аналізі.

3 ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ ВІРТУАЛЬНОЇ ПРИМІРОЧНОЇ

3.1 Етапи розробки та особливості програмної системи

Vuforia Engine – це ключовий набір для розробки програмного забезпечення, який використовується для створення додатків доповненої реальності. Використання Vuforia Engine у середовищі розробки Unity значно покращує процес програмної реалізації, дозволяючи створювати AR-додатки, адаптовані для різних пристроїв [21].

Щоб почати використовувати Vuforia, я інтегрую пакет Vuforia Engine AR у свій проект Unity. Vuforia Engine AR є фреймворком, який використовує технологію комп'ютерного зору для розташування віртуальних 3D-об'єктів на різних поверхнях, включаючи зображення, реальні об'єкти та плоскі поверхні.

Щоб налаштувати Vuforia Engine AR, було створено обліковий запис на порталі Vuforia Engine Developer Portal та отримано ліцензійний ключ, який необхідний для розблокування різних функцій та сервісів Vuforia Engine.

Розпізнавання маркерів у Vuforia, в контексті цілей на основі зображень, залежить від різних факторів, які визначають ефективність відстеження та виявлення. Створення ефективних цілей на основі зображень передбачає максимізацію деталізації, контрастності та розподілу елементів, уникаючи при цьому повторюваних шаблонів та забезпечуючи належне форматування. Дотримання цих найкращих практик покращує розпізнавання маркерів і ефективність відстеження в додатках доповненої реальності [22].

У Додатку В відображено процес програмної реалізації віртуальної примірочної.

У проекті для розпізнавання зображення використовувалися бінарні маркери, а саме Data Matrix, що є 2D-матричним штрих-кодом, який складається з білих та чорних квадратів, розміщених у вигляді сітки, які були автоматично згенеровані за допомогою кодування тексту (див. рис. В.1). Data Matrix мають декілька переваг при використанні у технології доповненої реальності Vuforia та для програмної реалізації віртуальної примірочної аксесуарів:

- надійні алгоритми розпізнавання Vuforia дозволяють швидко виявляти Data Matrix в режимі реального часу, забезпечуючи швидку та безперебійну взаємодію з віртуальними аксесуарами, мінімізуючи затримки та забезпечуючи безперебійну роботу користувача;
- забезпечує надійне відстеження, дозволяючи віртуальним аксесуарам точно зберігати своє положення та орієнтацію в доповненому середовищі. Ця стабільність має вирішальне значення для того, щоб аксесуари виглядали реалістично та "поводилися природно" під час взаємодії з користувачами;
- можна застосовувати до різних типів віртуальних аксесуарів, бо їх універсальність робить їх придатними для широкого спектру товарів у віртуальній примірочній, покращуючи загальний досвід шопінгу для користувачів.

Використовую Target Manager для створення бази даних зображень-цілей на порталі Vuforia Engine Developer Portal, обравши згенеровані бінарні маркери для кращого розпізнавання алгоритмами комп'ютерного зору. Важливо враховувати ефективність розпізнавання зображень, бо оцінка якості зображень на основі їхніх характерних ознак може суттєво вплинути на продуктивність алгоритмів комп'ютерного зору. На рисунку В.2 відображено 2D-матричний штрих-код, що оцінений п'ятьма зірками та має високу розпізнаваність, що означає, що воно має багато характерних ознак, які допомагають Vuforia точно виявляти та відстежувати об'єкти. При аналізі такого зображення доступ до характерних точок через інтерфейс платформи показує ступінь деталізації та складності, яку вловив алгоритм. Цей ретельний аналіз допомагає визначити придатність зображення для розпізнавання цілей в рамках доповненої реальності.

Після завантаження зображень імпортую базу даних до проекту Unity.

Далі починаю з організації та налаштування різних моделей аксесуарів, а точніше моделей годинників, каблучок, браслетів та сережок, для віртуальної примірочної. Кожна модель потребує специфічних матеріалів та текстур, щоб точно відтворити її реальний вигляд. Були створені матеріали для різних

компонентів моделей, наприклад, годинника, таких як ремінці, корпуси, циферблати та скло. Для кожного матеріалу налаштовані такі властивості, як колір, гладкість та прозорість, щоб досягти бажаного візуального ефекту. Також було звернено увагу на такі деталі, як хромоване або сталеве покриття, кольорові акценти та світловідбиваючі поверхні. Протягом усього процесу використовувалися інструменти та шейдери Unity, щоб ефективно наносити матеріали на 3D-моделі [23]. Після того, як всі матеріали були застосовані, покращую візуальні якості, додаючи відображення, використовуючи HDR (High Dynamic Range) зображення з Unity Asset Store, який надає широкий вибір високоякісних панорамних зображень, придатних для створення реалістичних віддзеркалень, та регулюючи освітлення. На рисунку В.3 зображено готові моделі годинників та каблучок. Такий ретельний підхід гарантує, що віртуальні аксесуари в примірювальній кімнаті будуть виглядати реально, покращуючи користувацький досвід та реалістичність додатку.

Для прикріплення 3D-моделей аксесуарів до зображення-цілі, вибираю зображення штрих-коду та переходжу до Target Manager, щоб інтегрувати цільове зображення в існуючу базу даних (див. рис. В.4), яка потім заважується для платформи Unity Editor та додається до ресурсів проекту.

Далі переходжу до створення об'єкта зображення штрих-коду в середовищі Unity, перетягуючи об'єкт зображення в ієрархію сцени та створюючи основу для подальшого приєднання моделей аксесуарів. Суть роботи полягала в точному позиціонуванні та масштабуванні моделей по відношенню до об'єкта зображення. Маніпулюючи атрибутами обертання, масштабу та положення, була вирівняна кожна модель, щоб забезпечити ідеальне накладання на об'єкт зображення (див. рис. В.5).

Досягнувши гармонійного вирівнювання між моделями та об'єктом зображення, було проведено тестування на прикладах моделі годинника та обручки, щоб перевірити точність реалізації (див. рис. В.6).

Щоб вирішити проблему занурення у віртуальній примірювальній, була використана концепція оклюзії – ключова техніка для створення ілюзії глибини в

додатках доповненої реальності. Віртуальна 3D-модель руки та вуха була інтегрована в середовище доповненої реальності, яка слугує прототипом руки та вуха користувача, дозволяючи віртуальним аксесуарам, виглядати так, ніби вони реалістично обгорнуті навколо зап'ястя й пальця та надіті на вухо (див. рис. В.7).

Наступним важливим кроком була реалізація функціональності оклюзії, щоб приховати частини віртуальних аксесуарів, які будуть закриті рукою користувача. Використовуючи спеціалізований шейдер оклюзії, був створений та застосований матеріал до моделі руки. Цей шейдер ефективно замаскував ті частини віртуальних аксесуарів, які приховані від очей, підвищуючи реалістичність віртуальної примірки (див. рис. В.8).

Після успішної реалізації функціональності оклюзії було продовжено поєднання моделі руки з об'єктом зображення, гарантуючи, що вона буде рухатися синхронно з рухами користувача. Також щоб підтримувати узгодженість освітлення та віддзеркалень, було прикріплено до зображення-цілі датчик спрямованого світла та віддзеркалень.

Після цього проводилося тестування додатку віртуальної приміркової на мобільному пристрої. Для додаткової зручності було прикріплено роздрукований штрих-код з точними розмірами на силіконовий браслет (див. рис. В.9).

Щоб полегшити безперешкодну взаємодію в середовищі додатку було створено користувацький інтерфейс (див. рис. В.10). Мета полягала в тому, щоб користувачі могли без зусиль приміряти різні моделі аксесуарів, отримувати доступ до відповідної інформації про кожну модель та налаштовувати такі аспекти, як колір ремінця годинника, колір каблучки, браслетів та сережок. Інтерфейс складається з кнопок, кожна з яких відповідає окремим моделям аксесуарів. Після натискання кнопки відповідна модель накладається на зап'ястя користувача та супроводжується вікном із відповідними деталями, такими як зображення аксесуару, назва, ціна та параметри налаштування кольору. Можна перемикатися між різними моделями аксесуарів, взаємодіючи з кнопками інтерфейсу.

Також було створено анімації за допомогою використання відповідних

інструментів Unity для безперешкодної взаємодії з користувачем та інтуїтивно зрозумілої навігації. Процес анімації включав в себе створення плавних переходів для вікон аксесуарів, забезпечуючи їхнє ковзання при взаємодії з користувачем. Ці анімації надають віртуальному середовищу відчуття динамічності та чуйності, підвищуючи загальну залученість користувачів.

На наступному етапі пишу код логіки взаємодії на мові програмування C# в середовищі Unity, щоб безперешкодно поєднати ці анімації з користувацькими подіями, ще більше покращуючи функціональність та зручність використання додатку (див. рис. В.11). Починаю зі створення змінних для зберігання посилань на об'єкти моделі аксесуару та об'єкти вікна аксесуару в ієрархії Unity. Ці змінні дозволяють маніпулювати цими об'єктами програмно. Далі визначаю методи `AccessoryOneButtonClicked` – `AccessorySixButtonClicked`, що відповідають кнопкам аксесуару. Кожен метод обробляє вибір моделі та анімацію відповідного вікна аксесуару. У межах кожного методу пишу код, щоб увімкнути вибраний об'єкт моделі аксесуару та вимкнути інші. Так само запускаю анімацію відповідного вікна моделі, щоб воно з'являлося на екрані, приховуючи інші.

Код функціонує наступним чином:

- при натисканні на кнопку годинника код активує відповідний об'єкт моделі аксесуару та вимикає інші. Це гарантує, що на зап'ясті користувача буде видно лише обрану модель аксесуару;
- одночасно з цим код запускає анімацію відповідного вікна аксесуару, що з'являється на екрані. Ця анімація надає користувачам важливу інформацію про обрану модель.

Тепер користувачі можуть взаємодіяти з середовищем віртуальної приміркової, безперешкодно досліджувати різні моделі годинників і легко отримувати доступ до відповідних інформаційних вікон.

Далі переходжу до написання коду для кожної функції, яка передбачає керування анімацією вікна (див. рис. В.12). Для цього створюю змінні `w1WindowAnimation` – `w6WindowAnimation`, по одній для кожної анімації вікна аксесуару. У цих змінних зберігаються посилання на компоненти анімації вікон

аксесуарів. Після створення цих змінних присвоюю їм значення, звертаючись до компонентів анімації кожного вікна аксесуару за допомогою коду. Маючи компоненти анімації, збережені в цих змінних, продовжую керувати анімацією вікон аксесуарів у відповідних функціях натискання кнопок. У середині кожної функції використовую відповідну змінну анімації для відтворення анімації, пов'язаної з відповідним вікном аксесуару.

Також створюю кнопки закриття для кожного вікна аксесуару, щоб користувачі могли закрити інформаційні вікна (див. рис. В.13). Ці кнопки розміщуються у вікнах, і кожна кнопка пов'язана зі спільною функцією `closeButtonClicked`. Щоб розрізняти кнопки закриття, використовую змінну `buttonName`, яка зберігає назву кнопки, що викликала функцію `closeButtonClicked`. Це дозволяє визначити, яка кнопка закриття вікна була натиснута. У функції `closeButtonClicked` використовую умовні оператори для перевірки значення `buttonName` та виконання відповідних дій.

Тепер пишу код для зміни кольору ремінця годинника та кольору каблучки у віртуальній примірочній (див. рис. В.14). Визначаю змінні `band1`, `band2`, `band3`, `ring1`, `ring2` та `ring3` які представляють матеріали, що контролюють ремінці та каблучки для кожної моделі. Щоб увімкнути вибір кольору, створюю загальнодоступні методи `W1ColorSelect` – `W6ColorSelect`, кожен метод пов'язаний з кнопками вибору кольору у вікнах аксесуару. Щоб розрізнити кнопки та визначити, яка з них натиснута, використовую змінну `buttonName`, яка зберігає назву кнопки, що викликала відповідний метод вибору кольору. У межах кожного методу вибору кольору використовую умовні оператори для перевірки значення `buttonName` та виконання відповідних дій. Це дозволяє змінювати колір відповідного аксесуару залежно від натиснутої кнопки. Визначаю шістнадцяткові значення для потрібних кольорів і за допомогою методу `ColorUtility.TryParseHtmlString` перетворюю ці значення на кольори. Потім застосовую ці кольори до відповідних матеріалів за допомогою методу `SetColor`.

Пишу код для метрики нормалізованої крос-кореляції, щоб оцінити подібність між виявленим маркером, що представляє штрих-код, і шаблоном,

тобто еталонним зображенням (див. рис. В.15).

Метод `CalculateNormalizedCrossCorrelation` отримує вхідними параметрами два масиви: `markerPixels` та `templatePixels`. Ці масиви містять значення пікселів виявленого маркера та шаблонного зображення відповідно. Потім код обчислює середнє значення пікселів як для виявленого маркера, так і для шаблонного зображення. Це робиться за допомогою допоміжного методу `CalculateMean`, який ітераційно проходить через кожне значення пікселів у масиві, підсумовує їх, а потім ділить суму на загальну кількість пікселів. Після отримання середніх значень пікселів як для маркера, так і для шаблону, код обчислює чисельник і знаменник значення розбіжності відповідно до наданої формули нормалізованої крос-кореляції. Чисельник обчислюється шляхом ітерації над кожним значенням пікселів у масивах, віднімання середнього значення відповідного масиву від кожного значення пікселя, а потім перемноження різниць. Знаменники обчислюються шляхом додавання квадратів різниць між значенням кожного пікселя та середнім значенням для масивів маркерів і шаблонів. Далі код нормалізує обчислене значення розбіжності шляхом ділення чисельника на добуток квадратних коренів із знаменників. Ця нормалізація гарантує, що значення розбіжності потрапляє в стандартний діапазон, що спрощує порівняння та інтерпретацію різних наборів даних. Розраховане значення розбіжності відображає схожість між виявленим маркером і шаблонним зображенням. Вище значення вказує на сильнішу кореляцію або схожість, тоді як нижче значення вказує на слабшу кореляцію або розбіжність.

Нижче наведено як працює метрика нормалізованої крос-кореляції в віртуальній примірочній аксесуарів:

- додаток віртуальної примірочної використовує технологію доповненої реальності для виявлення та відстеження маркерів, розміщених на різних аксесуарах. Ці маркери слугують орієнтирами для програми, яка накладає віртуальні зображення аксесуарів на зображення користувача, зняте камерою;
- для кожного типу аксесуарів, що підтримуються додатком, наприклад,

годинник, каблучка, браслет та сережки, в системі зберігаються заздалегідь визначені еталонні шаблони. Ці шаблони представляють ідеальний зовнішній вигляд або характеристики кожного аксесуара, включаючи розмір, форму, колір та інші візуальні характеристики;

- коли користувач взаємодіє з віртуальною примірочною, вибираючи або приміряючи різні аксесуари, додаток виявляє відповідні маркери з камери. Потім він фіксує значення пікселів цих маркерів і порівнює їх зі значеннями пікселів еталонних шаблонів, використовуючи нормалізовану метрику крос-кореляції;
- за допомогою нормалізованої метрики крос-кореляції обчислюється значення розбіжності, яке вказує на схожість між виявленим маркером і еталонним шаблоном;
- на основі аналізу подібності додаток віртуальної примірочної коригує віртуальне представлення аксесуара для більш точного збігу з виявленим маркером, гарантуючи, що віртуальний аксесуар буде правильно накладений на зображення, забезпечуючи захоплюючий і реалістичний досвід віртуальної примірки;
- користувач може взаємодіяти з віртуальними аксесуарами, наприклад, змінювати їх колір. Коли користувач вносить ці зміни, додаток перераховує значення розбіжностей, використовуючи нормалізовану метрику крос-кореляції, щоб переконатися, що віртуальні аксесуари зберігають своє вирівнювання та зовнішній вигляд відносно виявлених маркерів.

У додатку Г на рисунках Г.1 – Г.17 наведені скріншоти взаємодії користувача з готовою віртуальною примірочною аксесуарів.

Також для вирішення проблем та протиріч було впроваджено кілька ключових стратегій, які були реалізовані та вирішені в процесі розробки:

- проблема точного моделювання того, як різні товари виглядатимуть на користувачах у реальному часі була ефективно вирішена завдяки підвищенню точності віртуальної примірочної через впровадження

метрики нормалізованої крос-кореляції, яка забезпечила надійний метод оцінки схожості між виявленими маркерами та еталонними шаблонами, що призвело до більш точного представлення аксесуарів на користувачах;

- доступність була головним пріоритетом на етапі розробки, тому віртуальна примірочна була розроблена таким чином, щоб бути інклюзивною та зручною для всіх людей, незалежно від їхніх здібностей та з різними потребами;
- були розроблені функції кастомізації, а саме зміна кольору ремінця годинника, кольору каблучки, браслета та сережок, щоб запропонувати користувачам більш цікавий та персоналізований досвід віртуальної примірки;
- для захисту конфіденційності користувачів і запобіганню несанкціонованому доступу до персональних даних було прийнято рішення, що дані користувачів не зберігатимуться в системі, надаючи пріоритет конфіденційності користувачів та зменшуючи потенційні ризики, які пов'язані з витоком даних, тим самим зміцнюючи довіру користувачів до платформи.

Отже, потужна та надійна платформа доповненої реальності Vuforia дозволяє створити віртуальну примірочну, яка точно виявляє та відстежує маркери, а також дозволяє користувачам візуалізувати, як аксесуари виглядатимуть та сидітимуть на них у режимі реального часу, підвищуючи їхню впевненість у прийнятті рішення про покупку.

Механізм розпізнавання маркерів, що працює на алгоритмах ШІ, відіграє ключову роль у точній ідентифікації віртуальних аксесуарів і зіставленні їх з виявленими маркерами. Порівнюючи значення пікселів та обчислюючи значення розбіжностей за допомогою нормалізованих показників крос-кореляції, цей механізм забезпечує точне накладання аксесуарів на зображення, забезпечуючи реалістичний досвід примірки. Розробка віртуальної примірочної аксесуарів з використанням технології Vuforia та механізму штучного інтелекту розпізнавання

маркерів є передовим рішенням для покращення досвіду онлайн-покупок аксесуарів. Очікується, що з подальшим розвитком технологій доповненої реальності та штучного інтелекту віртуальні примірочні в майбутньому стануть більш захоплюючими та гнучкими.

3.2 Можливості та потенційні застосування розробленої програмної системи

У сучасному швидкозмінному середовищі роздрібної торгівлі клієнтський досвід стає критично важливим фактором для брендів, які прагнуть виділитися на переповненому ринку. З розвитком технологій ритейлери використовують креативні способи покращити досвід шопінгу та залучити клієнтів. Однією з таких інновацій є впровадження віртуальних примірочних, які використовують доповнену реальність та штучний інтелект. Ці рішення дозволяють користувачам віртуально приміряти годинники, ювелірні вироби та інші аксесуари, різні поєднання та стилі в домашніх умовах. Це дає змогу ритейлерам запропонувати більш захоплюючий та інтерактивний досвід покупок.

Дозволяючи користувачам приміряти аксесуари віртуально, програмна система може легко інтегруватися з платформами електронної комерції. Це спрощує процес купівлі та зменшує ризик повернення товару, якщо він не відповідає очікуванням, покращує досвід онлайн-покупок і підвищує коефіцієнт конверсії. Нижче наведено як інтеграція віртуальної примірочної з платформами електронної комерції сприяє зростанню бізнесу та покращує досвід покупок:

- клієнти можуть легко перейти від віртуальної примірки аксесуарів до здійснення покупки всього за кілька кліків, що спрощує весь процес купівлі, усуваючи необхідність переходу на окрему платформу або веб-сайт для завершення покупки;
- під час процесу онлайн-покупки клієнти отримують краще уявлення про те, як виглядає та на що схожий реальний продукт завдяки віртуальній примірці аксесуарів. Покращена візуалізація товару підвищує впевненість у прийнятті рішення про покупку та зменшує невизначеність;

- однією з ключових переваг віртуальної приміркової є зменшення кількості повернень та надання користувачам більш обґрунтованого рішення при покупці. Продавці можуть значно зменшити кількість повернень, які спричинені проблемами з розміром або невідповідністю очікуванням. Також користувачі почуватимуться більш впевненими у своїх покупках, що призведе до зменшення кількості повернень та підвищення загального рівня їх задоволеності;
- коли клієнти можуть віртуально приміряти та купувати аксесуари в одному цифровому середовищі, то проблеми, які пов'язані з онлайн-покупками, зводяться до мінімуму. Цей досвід без зайвих зусиль спонукає клієнтів завершити покупку, що призводить до підвищення коефіцієнта конверсії та збільшення продажів;
- відрізняючись від конкурентів, платформи електронної комерції, які пропонують можливість віртуальної примірки, отримують конкурентну перевагу на ринку, пропонуючи унікальний та інноваційний досвід покупок, залучають нових клієнтів, утримують існуючих і зміцнюють свої позиції на ринку.

Отже, інтеграція віртуальної приміркової з платформами електронної комерції пропонує низку переваг для продавців та покупців. Незалежно від того, чи спрощується процес купівлі, чи зменшується кількість повернень, чи підвищується коефіцієнт конверсії, ці інтеграції покращують загальний досвід онлайн-покупок і сприяють успіху бізнесу в цифрову епоху.

Віртуальна примірочна може бути використана для освіти та навчання в індустрії моди. Для експериментів з різними комбінаціями аксесуарів, щоб зрозуміти принципи дизайну та заглибитися в методологію стилізації студенти та професіонали можуть використовувати віртуальну примірочну. Програмна система сприяє розвитку креативності та вдосконаленню навичок у фешн-спільноті. Нижче наведено як можна ефективно використовувати віртуальну примірочну в освіті та навчанні:

- студенти факультетів моди можуть отримати практичний досвід у створенні стилю та дизайну аксесуарів у віртуальній примірочній. Вони можуть приміряти різні комбінації аксесуарів, щоб покращити своє розуміння принципів дизайну, теорії кольору та естетичної композиції. Такий практичний підхід покращує навчальний процес і готує студентів до реальних викликів в індустрії моди;
- експерти індустрії моди можуть організовувати майстер-класи та семінари для стилістів-початківців та любителів моди, використовуючи віртуальну примірочну. Під час цих інтерактивних сесій учасники можуть навчитися різним технікам стилізації, дізнатися більше про сучасні модні тенденції та отримати індивідуальні поради щодо стилізації аксесуарів. Також учасники можуть вдосконалити свої навички стиліста, розширити свій творчий репертуар і бути в курсі останніх тенденцій індустрії, працюючи у віртуальній примірочній;
- для покращення своїх знань про товари та обслуговування клієнтів фахівці в галузі моди, наприклад, стилісти та роздрібні продавці, можуть використовувати віртуальну примірочну як навчальний інструмент професійного розвитку. Ознайомившись з різними варіантами аксесуарів і варіантами стилізації, вони можуть краще допомагати користувачам приймати обґрунтовані рішення щодо своїх покупок. Результатом є більша задоволеність клієнтів, більш персоналізований досвід шопінгу та збільшення продажів;
- віртуальна примірочна дозволяє модним брендам та продавцям візуалізувати та експериментувати з плануванням вітрин та презентаціями товарів. Бренди можуть оцінити візуальний вплив своєї продукції та оптимізувати загальну естетику магазину, віртуально розміщуючи аксесуари в різних торгових середовищах. Програмна система дозволяє продавцям створювати цікавий та захоплюючий досвід покупок для своєї цільової аудиторії.

Отже, використання віртуальної приміркової в освіті та навчанні в індустрії моди має багато переваг для студентів, професіоналів та фахівців від розвитку творчих навичок і дизайнерських здібностей до покращення обслуговування клієнтів. Ця програмна система є цінним інструментом для поглиблення знань та досягнення успіху в динамічному світі моди.

Організатори заходів та маркетологи можуть використовувати віртуальну примірочну для організації віртуальних показів, презентацій товарів та рекламних кампаній. Нижче наведено використання віртуальної приміркової у плануванні та маркетингу подій:

- програмну систему можна використовувати для організації віртуальних модних показів останніх колекцій аксесуарів. Така віртуальна подія забезпечує динамічний та захоплюючий досвід для відвідувачів і дає їм можливість взаємодіяти з аксесуарами у віртуальному середовищі. Віртуальний показ може бути записаний наживо або заздалегідь, забезпечуючи гнучкість у виборі часу та охопленні аудиторії. Презентуючи аксесуари у візуально цікавому способі, бренди можуть привернути увагу своєї аудиторії та створити ажіотаж навколо своєї продукції;
- маркетологи можуть віртуально презентувати нові лінійки аксесуарів через віртуальну примірочну та створювати очікування напередодні запуску, надаючи користувачам можливості віртуально приміряти найновіші аксесуари;
- бренди можуть використовувати віртуальну примірочну для проведення інтерактивних промо-кампаній, присвячених аксесуарам. Наприклад, вони можуть пропонувати віртуальну примірочку в рамках рекламної кампанії, де клієнти могли спробувати різні комбінації аксесуарів та ділитися своїми образами в соціальних мережах. Бренди можуть охопити свою цільову аудиторію та підвищити впізнаваність бренду, заохочуючи взаємодію та користувацький контент;

- організатори заходів можуть співпрацювати з продавцями для створення заходів у магазині з використанням віртуальної приміркової. Наприклад, продавці можуть організовувати майстер-класи зі стилізації аксесуарів або VIP-шопінг, де клієнти можуть отримувати індивідуальні поради від модних експертів та віртуально приміряти аксесуари. Такі заходи створюють унікальний та незабутній досвід шопінгу, що може збільшити кількість відвідувачів і підвищити лояльність клієнтів.

Отже, програмна система пропонує організаторам заходів та маркетологам універсальний інструмент для створення цікавих подій, які підвищують впізнаваність бренду та покращують бізнес-показники. Віртуальна примірочна допомагає брендам залишити незабутнє враження в конкурентному середовищі моди та налагодити значущий зв'язок зі своєю аудиторією, незалежно від того, чи це організація віртуальних модних показів, рекламна кампанія або запуск нових аксесуарів. Виходячи з цього, можливості та потенційні застосування розробленої програмної системи віртуальної приміркової сприяють розвитку у роздрібній торгівлі у сфері аксесуарів. Незалежно від того, чи це розширення асортименту, захоплюючий досвід примірки, підвищення зручності або покращення доступності, віртуальна примірочна змінила спосіб купівлі аксесуарів, пропонуючи ідеальне поєднання онлайн і офлайн-торгівлі. Використання віртуальної приміркової в освіті та навчанні, заходах та маркетингу відкрило низку можливостей в індустрії моди, включаючи творчість, залучення та вплив на роздрібну торгівлю. Віртуальні примірочні змінюють взаємодію брендів з аудиторією, підвищуючи впізнаваність, залученість і лояльність. Це поєднання доповненої реальності та моди відкриває нові можливості для продавців і споживачів. Використання віртуальних примірочних допомагає компаніям зберегти конкурентну перевагу, забезпечити індивідуальний досвід і досягти успіху в роздрібній торгівлі. З розвитком технологій майбутнє ритейлу відкриває численні перспективи для інновацій та трансформацій, а віртуальна примірочна стане провідником до більш захоплюючого, інтерактивного та персоналізованого шопінгу для всіх.

4 ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ РЕЗУЛЬТАТИ

Було проведено кілька експериментів для оцінки ефективності механізму розпізнавання маркерів під час проведення експериментальних досліджень, що були спрямовані на вирішення проблем, які пов'язані із впровадженням технології доповненої реальності у віртуальну примірочну аксесуарів. Цей механізм має вирішальне значення для точного розміщення віртуальних аксесуарів у середовищі користувача. Експерименти передбачали маніпулювання такими факторами, як якість камери, умови освітлення та місцезнаходження людини, щоб оцінити їхній вплив на точність розташування.

Метою першого експерименту було перевірити вплив якості камери на точність розпізнавання маркеру. Замість використання різних камер з різною роздільною здатністю, на камеру було накладено різну кількість шарів клейкої стрічки, щоб імітувати різну якість та чіткість зображення. У таблиці 4.1 наведені результати першого експерименту.

Таблиця 4.1 – Експеримент 1: якість камери

Кількість шарів клейкої стрічки	Оцінка якості розпізнавання (%)	Час накладання аксесуара на маркер (с)
0 шарів	91	0.80
2 шари	78	1.12
5 шарів	64	2.05

У першому стовпчику наведені різні конфігурації накладання прозорої стрічки на камеру із зазначенням кількості використаних шарів. У другому стовпчику наведено оцінку якості розпізнавання, яка відображає точність та надійність розпізнавання маркерів, отриманих за допомогою відповідної конфігурації стрічки. Оцінка якості розпізнавання виражається у відсотках, причому вищі значення вказують на кращу точність розпізнавання. Третій

стовпчик містить час накладання аксесуара на маркер, тобто час розпізнавання маркера. Час накладання – це час, протягом якого система розпізнавання маркерів точно виявляє та ідентифікує маркери. Одиницею виміру є секунди.

Оцінка якості розпізнавання розраховується як середньозважене значення трьох індивідуальних оцінок: точності, стабільності та продуктивності. Кожна окрема оцінка множиться на ваговий коефіцієнт та підсумовується для отримання загальної оцінки. Точність – це здатність системи доповненої реальності розпізнавати та відстежувати маркери або об'єкти в навколишньому середовищі. Вона вимірюється оцінюючи здатність системи точно розпізнавати маркери та визначати їхнє місцезнаходження відносно їхнього положення в реальному світі. Висока точність означає, що система доповненої реальності може надійно розпізнавати та відстежувати маркери з мінімальною похибкою. Стабільність вимірює надійність та узгодженість роботи системи відстеження з плином часу. Вона оцінює здатність системи зберігати положення та орієнтацію маркерів, незважаючи на зміни в навколишньому середовищі або рухи користувача. Високий показник стабільності означає, що система доповненої реальності може підтримувати точне відстеження без значних відхилень або коливань протягом тривалого часу. Продуктивність відображає ефективність системи доповненої реальності у полегшенні взаємодії з користувачами та досягненні бажаних результатів. До уваги беруться такі фактори, як час відгуку, простота використання та загальна задоволеність користувачів системою. Високий показник продуктивності означає, що система доповненої реальності дозволяє користувачам виконувати завдання швидко та інтуїтивно зрозуміло, покращуючи їхній загальний досвід.

Час накладання аксесуара на маркер реєструється шляхом фіксації поточного часу, коли система розпізнає маркер та накладає на нього аксесуар.

Отже, результати першого експерименту показують, що якість камери має значний вплив на якість розпізнавання та час накладання аксесуара на маркер. Коли кількість шарів стрічки дорівнювала 0, якість розпізнавання становила 91%, а час накладання – 0,80 секунди. Однак, коли кількість шарів стрічки було

збільшено до 2 і 5, якість розпізнавання знизилася до 78% і 64%, а час накладання збільшився до 1,12 і 2,05 секунди відповідно. Це свідчить про те, що камера високої чіткості може поліпшити якість розпізнавання та скоротити час накладання.

Метою другого експерименту було дослідити вплив умов освітлення на точність розпізнавання маркеру. Для освітлення віртуальної примірочної використовувалися різні освітлювальні прилади, а саме природне світло та штучне джерело світла – ліхтарик телефону з різними рівнями яскравості. Потім маркер відстежувався при кожному освітленні, щоб оцінити надійність та стійкість системи. У таблиці 4.2 наведені результати другого експерименту.

Таблиця 4.2 – Експеримент 2: умови освітлення

Природне світло		
Час доби	Оцінка якості розпізнавання (%)	Час накладання аксесуара на маркер (с)
Ранок	92	3.80
День	87	4.50
Вечір	75	5.20
Штучне джерело світла		
Рівень яскравості	Оцінка якості розпізнавання (%)	Час накладання аксесуара на маркер (с)
1 рівень	88	4.93
3 рівень	90	4.00
5 рівень	94	3.60

Для секції "Природне світло" у першому стовпчику вказано різні часи доби: ранок, день, вечір, протягом яких проводився експеримент. Таким чином, дані класифікуються відповідно до умов природного освітлення в різний час доби. У другому стовпчику відображається відсоткова оцінка, що вказує на якість розпізнавання маркерів при заданих умовах освітлення. Оцінюється, наскільки

добре система розпізнавання маркерів працює при природному освітленні в різний час доби. Третій стовпчик показує час в секундах, який необхідний для накладання аксесуара на маркер і дає уявлення про ефективність розпізнавання маркера при природному освітленні.

Для секції "Штучне джерело світла" у першому стовпчику зазначено різні рівні яскравості, що забезпечуються штучним джерелом світла, яке використовується в експерименті, від низького до високого рівня яскравості. Дані класифікуються залежно від інтенсивності штучного освітлення. Подібно до секції "Природне світло", другий стовпчик представляє відсоткову оцінку, що вказує на якість розпізнавання маркера в умовах штучного освітлення. Оцінюється, наскільки добре система розпізнавання маркерів працює за різних рівнів яскравості. У третьому стовпчику вказано тривалість у секундах накладання аксесуара на маркер при кожному рівні яскравості. Вимірюється час, необхідний для накладання аксесуара на маркер за різних умов штучного освітлення, що дає уявлення про ефективність розпізнавання.

Отже, результати другого експерименту показують, що умови освітлення мають значний вплив на якість розпізнавання та час накладання аксесуара на маркер. При природному освітленні показники якості розпізнавання змінюються залежно від часу доби та є вищими вранці, ніж вдень або ввечері. Штучне джерело світла з різним рівнем яскравості також впливає на результати розпізнавання, причому вищі рівні яскравості призводять до вищих результатів: 94% на 5 рівні. Цікаво, що час, необхідний для накладання аксесуара на маркер, змінювався залежно від умов освітлення та був меншим при штучному освітленні, ніж при природному, що свідчить про те, що оптимізація умов освітлення важлива для ефективного розпізнавання маркерів.

Метою третього експерименту було дослідити, як переміщення та положення користувача у віртуальній примірочній впливають на точність розпізнавання маркеру. Переміщаючи руку зі сторони в сторону, рухи відстежувалися в режимі реального часу для оцінки здатності системи точно визначати місцезнаходження маркеру. Очікувалося, що рухи руки в полі зору

камери призведуть до точного розпізнавання маркерів, оскільки маркери залишаються видимими. Щоб оцінити здатність системи точно відстежувати маркери, враховувалися траєкторія та швидкість рухів. У таблиці 4.3 наведені результати третього експерименту.

Таблиця 4.3 – Експеримент 3: місцезнаходження людини

Швидкість рухів	Оцінка якості розпізнавання (%)	Час накладання аксесуара на маркер (с)
Повільно	93	4.20
Середня швидкість	86	4.90
Дуже швидко	-	-

У першому стовпчику класифікується швидкість пересування руки у віртуальній примірочній. У другому стовпчику відображається відсотковий показник, що вказує на якість розпізнавання маркерів залежно від швидкості пересування руки. Оцінюється, наскільки добре працює система розпізнавання маркерів при різній швидкості руху руки у віртуальному середовищі. У третьому стовпчику вказується час, який необхідний для накладання аксесуара на маркер у секундах для кожної категорії швидкості.

Отже, результати третього експерименту показали, що існує кореляція між швидкістю руху людини, швидкістю розпізнавання маркера та часом накладання аксесуара на маркер. Рухаючись повільно, було отримано найвищий показник розпізнавання – 93%, а час накладання становив 4,20 секунди. Рухаючись з середньою швидкістю, було отримано дещо нижчий показник розпізнавання – 86%, а час накладання становив 4,90 секунди, що є відповідним збільшенням часу. Рухаючись з дуже високою швидкістю не було отримано жодних результатів щодо якості розпізнавання та часу накладання аксесуара на маркер, що свідчить про те, що система розпізнавання маркерів може мати обмеження в точному відстеженні та розпізнаванні маркерів при дуже високих швидкостях рухів.

Загалом, згідно з результатами цих трьох експериментів можна зробити кілька важливих висновків.

Чим вища якість камери, тим точніше розпізнається маркер. Зі збільшенням кількості шарів клейкої стрічки зменшувалася як оцінка якості розпізнавання, так і час накладання аксесуара на маркер. Це підкреслює важливість використання камер з високою роздільною здатністю для покращення розпізнавання маркерів у віртуальній примірочній.

Природне світло вранці та штучне джерело світла з високим рівнем яскравості забезпечили кращу точність розпізнавання маркерів порівняно з іншими умовами освітлення. Час доби та рівень яскравості суттєво впливали на якість розпізнавання та час накладання аксесуара на маркер. Ці результати свідчать про те, що оптимізація умов освітлення може підвищити продуктивність системи розпізнавання маркерів.

Швидкість рухів користувача у віртуальній примірочній впливала на точність розпізнавання маркерів. Чим повільніший рух, тим вищий результат розпізнавання і тим менше часу потрібно для накладання аксесуара на маркер. Однак, рухаючи руку з дуже високою швидкістю, не було отримано жодних результатів, що свідчить про те, що система розпізнавання маркера може мати обмеження в точному відстеженні маркерів під час швидких рухів.

Отже, експерименти показали, що на точність розпізнавання маркерів у додатку віртуальної примірочної суттєво впливають такі фактори, як якість камери, умови освітлення та швидкість рухів людини. Оптимізація цих факторів може підвищити надійність та продуктивність системи розпізнавання маркерів і, в кінцевому підсумку, поліпшити загальний досвід користувача у віртуальному середовищі.

5 АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ

5.1 Сумарна оцінка результатів

Використовуючи дані першого експерименту, було побудовано лінійний графік, щоб візуально представити зв'язок між кількістю шарів клейкої стрічки, яка представляє якість камери, оцінкою якості розпізнавання та часом накладання аксесуара на маркер (див. рис. 5.1).

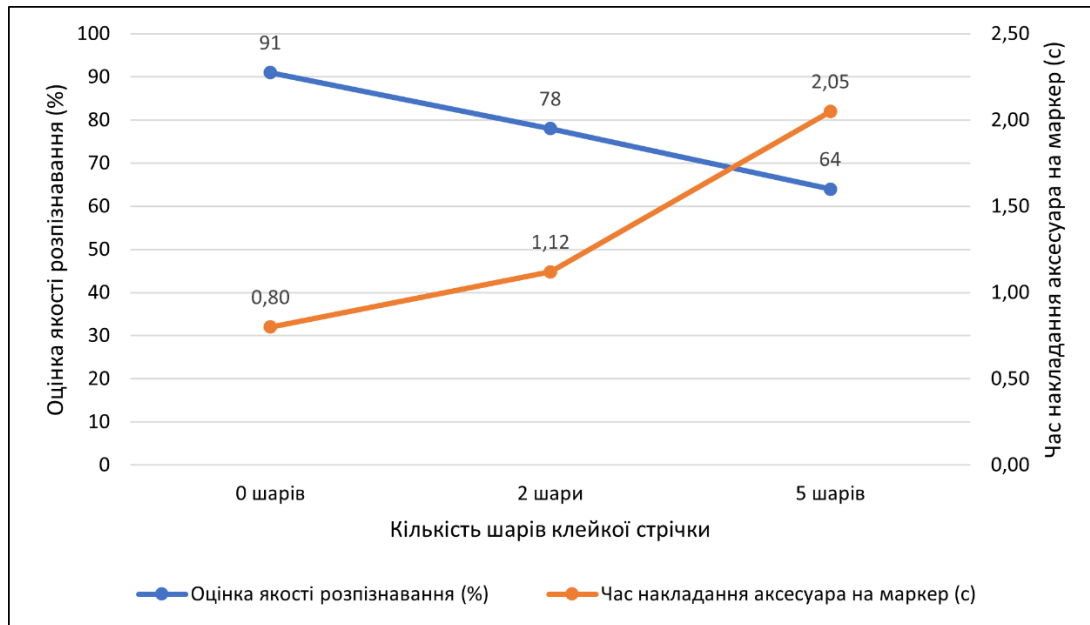


Рисунок 5.1 – Результати першого експерименту

При відсутності кількості шарів було отримано найвищий показник якості – 91%. Цей показник вказує на те, що система працює оптимально без втручання додаткових шарів. Також аксесуар був накладений на маркер, за найкоротший час, всього за 0,80 секунди, що свідчить про ефективність системи в ідеальних умовах.

При наявності двох шарів оцінка впала до 78%, а точність значно знизилася. Це свідчить про те, що навіть невелика кількість перешкод (два шари стрічки) має значний вплив на здатність розпізнавання маркерів. Час накладання збільшився до 1,12 секунди. Ймовірно, це пов'язано з тим, що механізму розпізнавання маркерів потрібно більше часу, щоб точно ідентифікувати маркер.

При наявності п'яти шарів результат падає до 64%, що свідчить про значне погіршення розпізнавання маркерів при зіткненні з більшою кількістю перешкод. Час накладання значно збільшився до 2,05 секунди. Таке різке збільшення вказує, що на ефективність системи сильно впливають додаткові перешкоди.

Початкова гіпотеза полягала в тому, що використання якіснішої камери підвищить точність розпізнавання маркерів і скоротить час, необхідний для накладання аксесуару на користувача. Результати підтвердили цю гіпотезу і наочно продемонстрували, що наявність перешкод у вигляді шару клейкої стрічки або використання менш якісної камери знижує точність та швидкість роботи механізму розпізнавання маркерів.

Дані чітко показують, що чим краща якість камери (менше шарів стрічки), тим вищі показники якості розпізнавання. Це підтверджує гіпотезу про те, що висока якість камери має першорядне значення для точного розпізнавання маркерів. Експеримент також показав, що час накладання аксесуара на маркер, збільшується з використанням більшої кількості шарів клейкої стрічки. Це підтверджує гіпотезу про те, що перешкоди або низька якість камери уповільнюють процес розпізнавання.

Отже, результати першого експерименту показали, що якість камери має значний вплив на точність та ефективність розпізнавання маркерів у додатку віртуальної примірочної. Як і передбачалося, якісніші камери, які були представлені меншою кількістю шарів стрічки, призвели до вищих показників якості розпізнавання та швидшого накладання аксесуарів. Отримані результати узгоджуються з гіпотезою про те, що якість камери безпосередньо впливає на точність та ефективність розпізнавання маркерів. Чим чіткіше зображення, тобто менше шарів плівки, тим кращий показник розпізнавання. Експеримент підкреслює необхідність чітких, високоякісних зображень для оптимальної точності розпізнавання, а це означає, що якість камери пристрою має бути пріоритетом при використанні додатку віртуальної примірочної. Забезпечуючи високу якість розпізнавання та швидкий час накладання, можна значно покращити користувацький досвід у віртуальному середовищі. Користувачі

отримують вигоду від швидкої та безперешкодної взаємодії з віртуальними аксесуарами.

Результати другого експерименту мають вирішальне значення для розуміння того, як різні налаштування освітлення впливають на продуктивність механізму розпізнавання маркерів. Використовуючи дані другого експерименту, було побудовано лінійний графік, щоб візуально представити зв'язок між різними умовами освітлення, оцінками якості розпізнавання та часом накладання аксесуара на маркер (див. рис. 5.2).

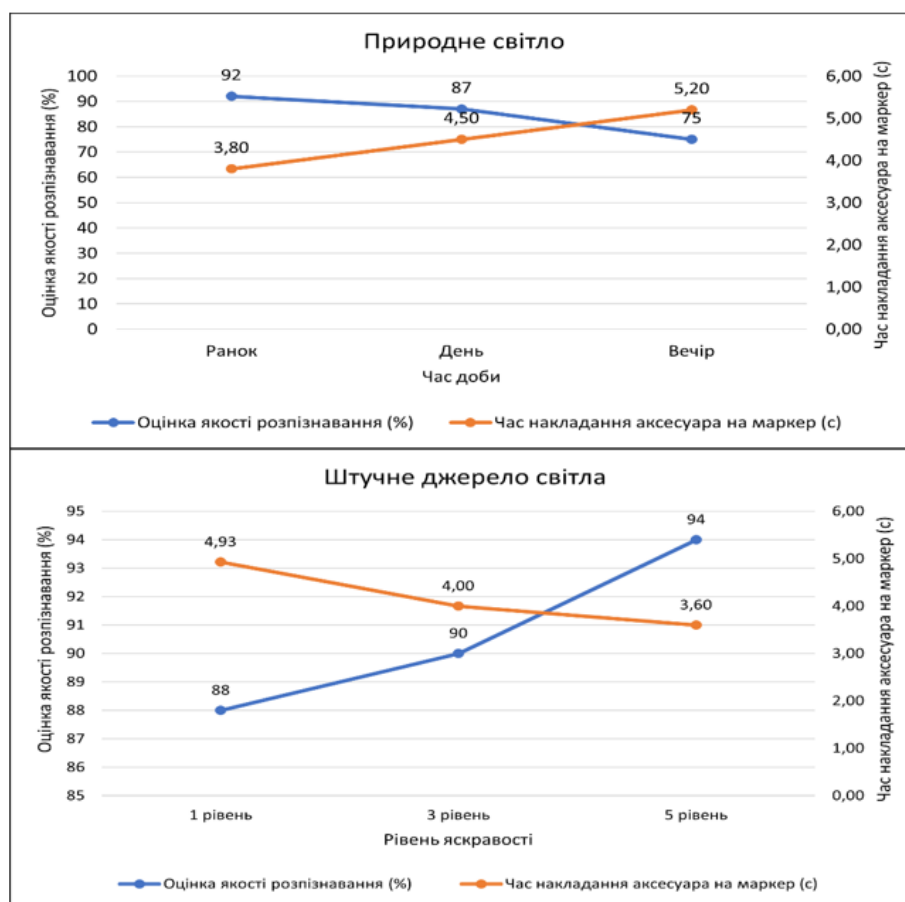


Рисунок 5.2 – Результати другого експерименту

При ранковому світлі оцінка якості розпізнавання має найвищий бал у 92%, що свідчить про те, що механізм розпізнавання маркерів найкраще працює при природному освітленні вранці. Час накладання аксесуара на маркер при ранковому світлі є найшвидшим та становить 3,80 секунди, що свідчить про ефективність розпізнавання при сприятливому ранковому освітленні.

При денному світлі оцінка якості розпізнавання трохи нижча, всього 87%, що свідчить про те, що підвищена інтенсивність світла вдень може створити певні проблеми. При денному світлі час накладання аксесуара на маркер збільшується до 4,50 секунди, що відображає незначну "боротьбу" механізму розпізнавання з більш інтенсивним світлом.

При вечірньому світлі оцінка якості розпізнавання має найнижчий показник у 75%, що свідчить про те, що низький рівень природного освітлення у вечірній час значно знижує точність розпізнавання маркерів. При вечірньому світлі час накладання аксесуара на маркер є найповільнішим та становить 5,20 секунди, що свідчить про значні труднощі розпізнавання в умовах низької освітленості.

При першому рівні яскравості ліхтарика телефону оцінка якості розпізнавання є відносно високою, всього 88%, що свідчить про те, що система добре працює в умовах контрольованого низького штучного освітлення. Час накладання аксесуара на маркер при першому рівні яскравості становить 4,93 секунди, що вказує на хорошу продуктивність при слабкому штучному освітленні.

При третьому рівні яскравості ліхтарика телефону оцінка якості розпізнавання має незначне покращення у 90%, що вказує на оптимальну роботу за середньої яскравості. Час накладання аксесуара на маркер при третьому рівні яскравості покращується до 4,00 секунд, демонструючи оптимальну ефективність при середній яскравості.

При п'ятому рівні яскравості ліхтарика телефону оцінка якості розпізнавання має найвищий показник у 94%, що свідчить про те, що сильне, рівномірне штучне освітлення забезпечує найкращі умови для розпізнавання маркерів. Час накладання аксесуара на маркер при п'ятому рівні яскравості має найшвидший час у 3,60 секунди, що свідчить про те, що висока яскравість штучного освітлення забезпечує найкращі умови для швидкого розпізнавання маркерів.

Початкова гіпотеза полягала в тому, що умови освітлення мають значний вплив на продуктивність розпізнавання маркерів у додатку віртуальної

приміркою. Результати другого експерименту підтвердили цю гіпотезу, особливо щодо різного впливу природного та штучного світла.

Ранкове світло має найвищий показник якості розпізнавання серед усіх природних умов освітлення. Це свідчить про те, що м'яке, розсіяне ранкове світло є оптимальною умовою для розпізнавання маркерів. Денне світло залишається ефективним, але якість розпізнавання дещо знижується, можливо, через підвищену інтенсивність та потенційні відблиски, які можуть перешкоджати розпізнаванню маркерів. Вечірнє світло має найнижчий показник якості розпізнавання, можливо, через знижений рівень освітленості та підвищену кількість тіней, що ускладнює процес розпізнавання.

Низька яскравість ліхтарика телефону забезпечила непогану якість розпізнавання, але вимагала більшого часу накладання аксесуара на маркер, що свідчить про те, що недостатнє освітлення може знизити ефективність системи. Середній рівень яскравості забезпечує баланс між високою якістю розпізнавання та відносно швидким часом накладання аксесуара на маркер, що свідчить про те, що цей рівень штучного освітлення близький до оптимального для розпізнавання маркерів. Висока яскравість забезпечила найвищу оцінку якості розпізнавання та найшвидший час накладання аксесуара на маркер, що свідчить про те, що потужне, добре розподілене штучне освітлення значно покращує продуктивність розпізнавання маркерів.

Дані другого експерименту показують чіткий взаємозв'язок між умовами освітлення та показниками якості розпізнавання. Оптимальне освітлення, як природне, так і штучне, покращує точність розпізнавання, підтверджуючи гіпотезу про те, що освітлення є важливим фактором. Експеримент також продемонстрував, що кращі умови освітлення скорочують час накладання аксесуара на маркер. Це підтверджує гіпотезу про те, що добре освітлене середовище сприяє швидшому та ефективнішому розпізнаванню маркерів.

Отже, результати другого експерименту підкреслюють значний вплив умов освітлення на точність та ефективність розпізнавання маркерів у віртуальній примірочній. Дані показують, що як природні, так і штучні джерела світла

впливають на якість розпізнавання та час накладання аксесуара на маркер. Отримані результати підтверджують гіпотезу про те, що умови освітлення відіграють важливу роль у точності та ефективності розпізнавання маркерів. Різний час доби та рівні штучного освітлення мають помітний вплив на продуктивність розпізнавання. Експеримент підкреслює необхідність оптимальних умов освітлення для досягнення високої якості розпізнавання та ефективного часу накладання аксесуара на маркер. Тому потрібно надавати перевагу добре освітленому середовищу при використанні віртуальної примірочної. Забезпечення належного освітлення може значно скоротити час, який необхідний для розпізнавання та накладання аксесуара на маркер, роблячи більш плавну та інтуїтивно зрозумілу взаємодію з додатком.

Використовуючи дані третього експерименту, було побудовано лінійний графік, щоб візуально представити зв'язок між швидкістю руху руки, оцінками якості розпізнавання та часом накладання аксесуара на маркер (див. рис. 5.3).

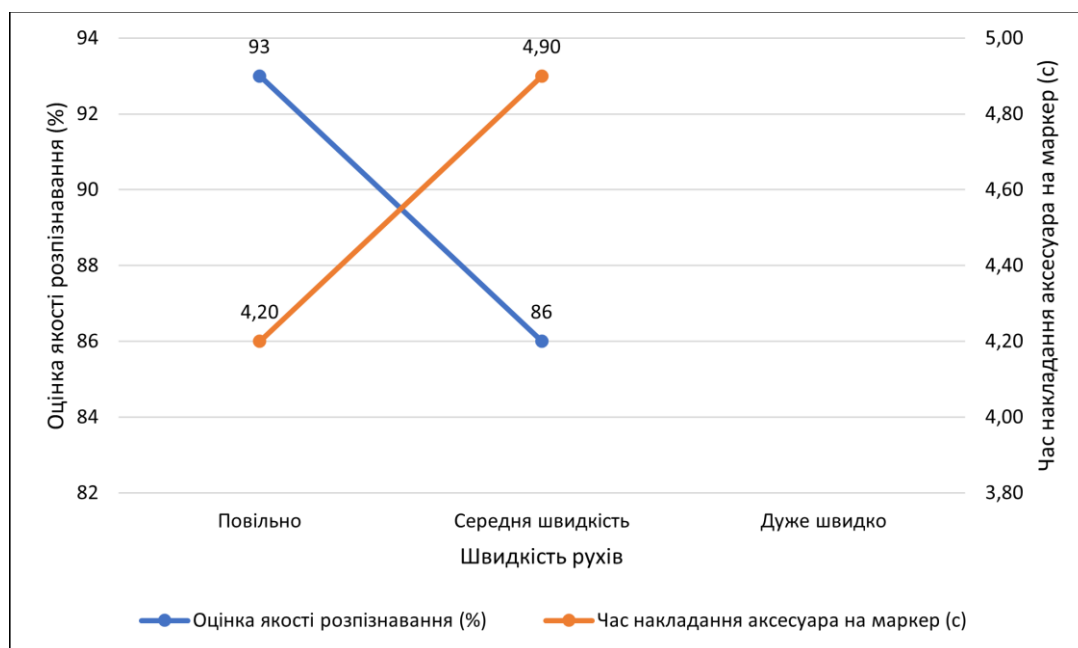


Рисунок 5.3 – Результати третього експерименту

Найвищий показник оцінки якості розпізнавання становить 93%, це свідчить про те, що механізм розпізнавання маркерів працює оптимально повільних рухах користувача. При повільних рухах час накладання аксесуара на

маркер становить 4,20 секунди, демонструючи ефективність та стабільність, коли користувач рухається повільно.

Збільшуючи швидкість рухів, оцінка розпізнавання падає до 86%, це свідчить про те, що такі рухи створюють певні проблеми для точного розпізнавання маркерів. При середній швидкості рухів час накладання аксесуара на маркер збільшується до 4,90 секунди, що свідчить про те, що системі складніше обробляти швидкі рухи.

При дуже високій швидкості рухів не було отримано жодного результату, що свідчить про те, що система розпізнавання маркерів має значні проблеми під час швидкого руху користувача, ймовірно, через розмиття зображення маркера та складність утримання маркера в стабільному положенні або полі зору.

Початкова гіпотеза полягала в тому, що швидкість руху руки користувача матиме значний вплив на продуктивність розпізнавання маркерів у віртуальній примірочній. Результати підтвердили цю гіпотезу та продемонстрували, що існує чіткий зв'язок між швидкістю руху та продуктивністю системи.

Дані демонструють пряму кореляцію, коли повільніша швидкість руху призводить до вищих показників якості розпізнавання. Це підтверджує гіпотезу про те, що стабільність є ключовим фактором для ефективного розпізнавання маркерів.

Експеримент показав, що повільніша швидкість руху корелює зі скороченням часу, необхідного для накладання аксесуара на маркер. Це підтверджує гіпотезу про те, що мінімальний рух забезпечує більш ефективне та точне розпізнавання маркерів.

Отже, результати третього експерименту підкреслюють значний вплив швидкості руху на точність та ефективність розпізнавання маркерів у віртуальній примірочній. Дані свідчать про те, що чим повільніша швидкість руху руки, тим вища якість розпізнавання та менший час накладання аксесуара на маркер. Результати підтвердили гіпотезу про те, що швидкість рухів має значний вплив на продуктивність розпізнавання маркерів. Повільні рухи призводять до більшої точності та ефективності розпізнавання, тоді як дуже швидкі рухи негативно

впливають на продуктивність системи. Отримані результати підкреслюють необхідність оптимізації віртуальної примірконої для обробки різних швидкостей руху людини. Тому потрібно надавати перевагу підвищенню надійності розпізнавання маркерів, щоб краще пристосовуватися до помірних та швидких рухів, забезпечуючи більш плавну та інтуїтивно зрозумілу взаємодію з віртуальними аксесуарами.

Серія проведених експериментів в сукупності демонструють, що на ефективність та результативність розпізнавання маркерів у додатку віртуальної примірконої аксесуарів суттєво впливають різні фактори. Отримані результати підкреслюють, що для досягнення точного та ефективного розпізнавання маркерів важливо використовувати високоякісні камери, дотримуватися оптимальних умов освітлення та керувати швидкість руху. Ці результати мають важливе значення у розробці надійного додатку, який використовує як технологію доповненої реальності, так і механізм штучного інтелекту та який забезпечує безперебійну та надійну роботу користувачів у віртуальний примірконій.

5.2 Перспективи подальших досліджень

Дослідження технологій доповненої реальності для програмної реалізації віртуальної примірконої аксесуарів за допомогою штучного інтелекту визначило низку перспективних напрямків для майбутніх досліджень та технологічних розробок. Результати, які були отримані в ході дослідження, висвітлюють кілька сфер, де подальші дослідження та розробки можуть значно покращити функціональність, точність та зручність використання віртуальної примірконої на основі доповненої реальності.

Експерименти показали, що точність розпізнавання маркерів знижується за певних умов, таких як мінливе освітлення та швидкі рухи користувача. Для вдосконалення механізму розпізнавання маркерів подальші напрямки досліджень та розробок можуть бути такими:

- розробка більш складних або досконалих алгоритмів, які здатні динамічно підлаштовуватися до різної швидкості руху користувача та

умов освітлення. Це може включати інтеграцію методів машинного навчання для прогнозування та компенсації швидких змін у навколишньому середовищі;

- дослідження методів підвищення точності розпізнавання, коли частина маркера закрита. Щоб досягти цю мету можна використовувати складні моделі ШІ, які навчені на різних сценаріях оклюзії.

Хоча поточна система використовує штучний інтелект для розпізнавання маркерів, існує великий потенціал для розширення використання ШІ в інших аспектах віртуальної примірочної. Для інтеграція передових методів ШІ подальші напрямки досліджень та розробок можуть бути такими:

- використання моделей глибокого навчання, щоб покращити можливості обробки зображень, тобто маркерів, та підвищення стійкості систем до шуму та змін у візуальному вхідному сигналі;
- впровадження функцій персоналізації за допомогою штучного інтелекту, які адаптують досвід примірочної на основі вподобань користувача та попередніх взаємодій. Це включає в себе рекомендації щодо аксесуарів на основі стилю та розміру користувача.

У поточній системі взаємодія з користувачами в основному базується на розпізнаванні маркерів, які виявилися чутливими до рухів користувача та умов навколишнього середовища, а також на накладанні аксесуарів на них. Подальші напрямки досліджень та розробок, які стосуються взаємодії з користувачами та механізмів зворотного зв'язку можуть бути такими:

- використання розпізнавання жестів, щоб допомогти користувачам взаємодіяти з віртуальними аксесуарами більш інтуїтивно та природно. Це може зменшити залежність від маркерів та підвищити залученість користувачів;
- інтеграція розпізнавання голосу, щоб уможливити керування віртуальною примірочною без допомоги рук для більшої доступності та зручності.

Експерименти показали, що умови освітлення значно впливають на точність розпізнавання маркерів. Для покращення адаптації до навколишнього середовища подальші напрямки досліджень та розробок можуть бути такими:

- розробка вдосконалених методів компенсації освітлення для регулювання чутливості системи та обробки на основі аналізу освітлення в реальному часі;
- інтеграція датчиків навколишнього середовища для збору даних про умови навколишнього середовища, таких як освітлення або температура, та динамічного налаштування параметрів системи ІІІ.

Поточний додаток в основному зосереджений на конкретних типах аксесуарів, таких як годинники, каблучки, браслети та сережки. Для розширення асортименту аксесуарів подальші напрямки розробок можуть включати:

- розширення бібліотеки віртуальної приміркової, додавши різні аксесуари, такі як капелюхи, шарфи та окуляри, щоб задовольнити потреби більшої кількості користувачів;
- надання можливості користувачам налаштовувати аксесуари у віртуальній примірочній, пропонуючи варіанти для коригування розміру та стилю.

Отже, дослідження технологій доповненої реальності для програмної реалізації віртуальної приміркової аксесуарів за допомогою штучного інтелекту заклало міцний фундамент, продемонструвавши потенціал для зміни способу взаємодії користувачів з віртуальними додатками. Усуваючи поточні обмеження та вивчаючи наведені вище перспективи, майбутні дослідження можуть значно розширити можливості та застосування віртуальної приміркової, пропонуючи більш точний, інтуїтивно зрозумілий та цікавий користувацький досвід. Інтеграція передових методів штучного інтелекту, покращення взаємодії з користувачем та адаптація до навколишнього середовища матимуть вирішальне значення для наступних досліджень та розробок у віртуальній примірочній.

ВИСНОВКИ

Дослідження технологій доповненої реальності для програмної реалізації віртуальної примірочної аксесуарів за допомогою штучного інтелекту у ході науково-дослідної практики принесло значні результати.

На початку роботи було проведено всебічний огляд літератури та аналіз проблеми. Були проаналізовані етапи розвитку технологій доповненої реальності від концептуалізації до повсюдного впровадження, а також наукова та патентна літератури, щоб зрозуміти існуючі рішення та виявити нові тенденції в цій галузі. На цьому етапі були виявлені різні проблеми та протиріччя, які притаманні розробці віртуальної роздягальні. Для вирішення цих проблем було ретельно обґрунтовано методологію дослідження, обравши напрямок, орієнтований на виявлення найкращої технології доповненої реальності, серед Wikitude, ARKit, ARCore, Vuforia, Kudan та Unity AR Foundation, для програмної реалізації віртуальної примірочної аксесуарів, використовуючи також механізм розпізнавання маркерів.

При порівняльній оцінці технологій основна перевага надавалася таким критеріям, як наявність маркерного відстеження, сумісність та підтримка пристроїв, наявність у тарифному плані безкоштовної опції, що пропонує повний набір функцій, точність відстеження, простота інтеграції, продуктивність та швидкість реагування, середовище розробки та підтримка через їх значний вплив на ефективність та доцільність впровадження віртуальної примірочної з використанням штучного інтелекту. За допомогою лінійної адитивної згортки з урахуванням вагових коефіцієнтів та нормуючих множників вдалося визначити оптимальну технологію для програмної реалізації віртуальної примірочної аксесуарів за допомогою штучного інтелекту. За результатами обчислень, технологія доповненої реальності Vuforia виявилася найкращою альтернативою, маючи найвищий результат у функції згортки, що дорівнює 0.92.

Експериментальне дослідження дозволило виявити ключові фактори, що впливають на точність розпізнавання маркерів. Вища роздільна здатність камери та вдосконалена обробка зображень значно підвищили точність, тоді як

оптимальні умови освітлення та повільні рухи користувача сприяли підвищенню продуктивності. Ці результати мають важливе значення для розробки надійних та зручних додатків доповненої реальності, покращення роботи віртуальної приміркової, зменшення кількості повернень аксесуарів та підвищення рівня задоволеності користувачів. Впровадження рекомендованих удосконалень адаптації до різних умов освітлення та швидкості руху покращить продуктивність системи та призведе до більш швидкого та точного розпізнавання маркерів.

Напрямки подальших досліджень можуть бути зосереджені на передових методах розпізнавання маркерів, коригуванні зображень у реальному часі за допомогою глибокого навчання та інтуїтивній взаємодії за допомогою розпізнавання жестів та голосу. Персоналізовані рекомендації щодо аксесуарів та інтеграція датчиків навколишнього середовища можуть ще більше покращити користувацький досвід. Вирішення цих завдань значно покращить функціональність, точність та зручність використання віртуальної приміркової на основі доповненої реальності в роздрібній торгівлі.

Отже, за допомогою технології доповненої реальності Vuforia та штучного інтелекту віртуальна примірочна була розроблена у якості мобільного додатку, яка сумісна з Android та iOS, що забезпечує доступ широкому колу користувачів. При програмній реалізації основна увага приділялася підвищенню точності моделювання того, як різні товари виглядатимуть на користувачах у реальному часі, використовуючи метрику нормалізованої крос-кореляції, яка підвищила реалістичність та зручність віртуальних примірок, доступності віртуальної приміркової для користувачів з різними потребами, в тому числі для людей з обмеженими можливостями. Функції кастомізації були розроблені для того, щоб надати користувачам більш цікавий та персоналізований досвід, дозволяючи змінювати колір ремінця годинника, колір каблучки, браслета та сережок. Також були розроблені надійні заходи для захисту конфіденційності користувачів та запобіганню несанкціонованому доступу до персональних даних шляхом того, що дані користувачів не зберігаються в системі.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Robert Cordero. Can Technology Help Fashion Etailers Tackle ‘Try Before You Buy?’ // The Business of Fashion. URL: <https://www.businessoffashion.com/articles/technology/fashion-2-0-can-technology-help-fashion-etailers-tackle-try-before-you-buy/> (дата звернення: 24.01.2024).
2. Sus B., Revenchuk I., Tmienova N., Bauzha, O., Chaikivskyi T. Software System for Virtual Laboratory Works//2020 IEEE 15th International Scientific and 59 Technical Conference on Computer Sciences and Information Technologies. 2020. P. 396–399.
3. Sus B., Tmienova N., Revenchuk I., Vialkova V. Development of Virtual Laboratory Works for Technical and Computer Sciences//ICIST – International Conference on Information and Software Technologies. 2019. P. 383-394
4. VIRTUAL FITTING ROOM: patent US20140368499 United States of America. No 20140368499; applic. 15.06.2013; public. 18.12.2014, Application number 13918942. 157 pp.
5. Sus B., Tmienova N., Revenchuk I., Bauzha O., Stirenko S. Principles of gamification for Virtual laboratory works and educational courses//Матеріали IX Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні управляючі системи і технології» (ІУСТ-ОДЕСА-2020). 2020. С. 63-65.
6. VIRTUAL FITTING ROOM SYSTEM AND METHOD USING 3D AVATAR: patent KR1020150097903 Republic of Korea. No 1020150097903; applic. 18.02.2014; public. 27.08.2015, Application number 1020140018725. 20 pp.
7. SYSTEM AND METHOD FOR PROVIDING A PLATFORM FOR VIRTUAL AUGMENTED REALITY FITTING OF AN ITEM US20240037862 United States of America. No 20240037862; applic. 26.07.2022; public. 01.02.2024, Application number 17873940. 52 pp.
8. Morteza Daneshmand. Realistic 3D Virtual Fitting Room//Dissertationes technologiae Universitatis Tartuensis. 2020.
9. Zhiling Huang, Junwen Bu, Jie Chen. Image-based Virtual Fitting Room//Cornell University, Computer Vision and Pattern Recognition (cs.CV). 2021.

10. Alice Mătășel, Manuela Avădanei, Andreea Talpă, Carmen Loghin. Virtual Fitting Room and Its Potential in E-Commerce//CORTEP 2022 IASI-RO. 2022.
11. Sus B., Tmienova N., Revenchuk I., Bauzha O., Chaikivskyi T. Software System for Virtual Laboratory Works//XV International Scientific and Technical Conference Computer Science and Information Technologies. 2020. P. 396-400.
12. Wikitude 8, the SDK for Shared Augmented Reality Experiences. URL: <https://arpost.co/2018/06/08/wikitude-8-sdk-shared-augmented-reality-experiences/> (дата звернення: 09.02.2024).
13. Lester Madden. Professional Augmented Reality Browsers for Smartphones: Programming for junaio, Layar and Wikitude. – Wrox, 2011. – 360 pp.
14. Raywenderlich Tutorial Team, Chris Language. Apple Augmented Reality by Tutorials (Second Edition): Create AR Experiences with ARKit, RealityKit & Reality Composer. – Razeware LLC, 2022. – 399 pp.
15. Jonathan Linowes, Krystian Babilinski. Augmented Reality for Developers: Build practical augmented reality applications with Unity, ARCore, ARKit, and Vuforia. – Packt Publishing, 2017. – 550 pp.
16. Jesse Glover. Unity 2018 Augmented Reality Projects: Build four immersive and fun AR applications using ARKit, ARCore, and Vuforia. – Packt Publishing, 2018. – 358 pp.
17. Top 12 augmented reality SDKs. URL: <https://ulab.sumdu.edu.ua/top-12-augmented-reality-sdks> (дата звернення: 12.02.2024).
18. Jonathan Linowes. Augmented Reality with Unity AR Foundation: A practical guide to cross-platform AR development with Unity 2020 and later versions. – Packt Publishing, 2021. – 382 pp.
19. Ревенчук І., Агарков Є. Моделювання доповненої реальності на основі маркерів//Бионика интеллекта. 2021. № 96. С. 90–95.
20. Marker-Based Augmented Reality. URL: <https://www.it-jim.com/blog/augmented-reality-tracking-with-different-markers/> (дата звернення: 15.02.2024).
21. Getting Started with Vuforia Engine in Unity. URL:

<https://developer.vuforia.com/library/getting-started/getting-started-vuforia-engine-unity> (дата звернення: 19.02.2024).

22. Best Practices for Designing and Developing Image-Based Targets. URL: <https://developer.vuforia.com/library/objects/best-practices-designing-and-developing-image-based-targets> (дата звернення: 19.02.2024).

23. Назаров О. С., Шураєв І. Д. Автоматизація процесу створення 3D моделей на основі зображень//Міжнародна наукова інтернет-конференція "Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення"/Збірник тез доповідей: випуск 34. 2018. С. 54-56.