



Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет \_\_\_\_\_ комп'ютерної інженерії та управління \_\_\_\_\_

Кафедра \_\_\_\_\_ електронних обчислювальних машин \_\_\_\_\_

Рівень вищої освіти \_\_\_\_\_ другий (магістерський) \_\_\_\_\_

Спеціальність \_\_\_\_\_ 123 «Комп'ютерна інженерія» \_\_\_\_\_  
(код і повна назва)

Тип програми \_\_\_\_\_ освітньо-наукова \_\_\_\_\_  
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма \_\_\_\_\_ Системне програмування \_\_\_\_\_  
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри \_\_\_\_\_  
(підпис)

“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

## ЗАВДАННЯ

### НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві \_\_\_\_\_ Кириленку Дмитру Володимировичу \_\_\_\_\_  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Метод оптимального розташування віртуальних об'єктів  
у системах комп'ютерного зору

затверджена наказом по університету від “ 21 ” квітня 2025 р. № 296 Ст

2. Термін подання здобувачем роботи до екзаменаційної комісії 16 червня 2025 р.

3. Вхідні дані до роботи операційна система –Windows або Linux, технологія OpenGL

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати у роботі \_\_\_\_\_

1) Аналіз сучасного стану розвитку технології доповненої реальності \_\_\_\_\_

2) Оптимальне розташування об'єкта доповненої реальності у фізичному просторі \_\_\_\_\_

3) Оптимальне розташування об'єктів доповненої реальності у системах  
комп'ютерного зору \_\_\_\_\_

4) Висновки. \_\_\_\_\_

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій \_\_\_\_\_

Слайд-презентація – 15 слайдів \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

6. Консультанти розділів роботи (заповнюється за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1 )

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Строк / терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Огляд літературних джерел та аналіз предметної області досліджень	22.04.25-29.04.25	
2	Вибір та обґрунтування методики дослідження	30.04.25-05.05.25	
3	Вибір інструментальних засобів	06.05.25-09.05.25	
4	Розробка моделей протоколів	10.05.25-21.05.25	
5	Проведення експериментів	22.05.25-02.06.25	
6	Оформлення матеріалів кваліфікаційної роботи	03.06.25-05.06.25	
7	Подання кваліфікаційної роботи керівникові та її попередній захист	06.06.25-09.06.25	
8	Подання кваліфікаційної роботи на рецензування	10.06.25-12.06.25	

Дата видачі завдання “ 21 ” квітня 2025 р.

Здобувач \_\_\_\_\_

(підпис)

Керівник роботи \_\_\_\_\_

(підпис)

проф. Георгій КУЧУК \_\_\_\_\_

(посада, власне ім'я, прізвище)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи: 89 с., 24 рис., 3табл., 1 дод., 17 джерел.

ДОПОВНЕНА РЕАЛЬНІСТЬ, ВІРТУАЛЬНА РЕАЛЬНІСТЬ, ФІЗИЧНИЙ ПРОСТІР, ПЕРЦЕПТИВНА ВІДСТАНЬ, КОМП'ЮТЕРНИЙ ЗІР.

Мета кваліфікаційної роботи полягає у розробці методу оптимального розташування віртуальних об'єктів у системах комп'ютерного зору.

Об'єктом дослідження є процес розстановки віртуальних об'єктів у фізичному просторі, який обмежений у розмірах. Предметом дослідження є моделі та алгоритми оптимального розташування об'єктів доповненої реальності у фізичному просторі кінцевих розмірів.

У ході виконання кваліфікаційної роботи було проведено аналіз сучасного стану розвитку технології доповненої реальності. Визначені підходи до оптимального розташування об'єкта доповненої реальності та критерій оптимальної перцептивної відстані розміщення об'єкта, з урахуванням яких формується цільова функція і розробляється метод її оптимізації. Удосконалений та досліджений метод оптимального розташування віртуальних об'єктів у системах комп'ютерного зору.

## ABSTRACT

Master's thesis: 89 pages, 24 figures, 3 tables, 1 appendices, 17 sources.

AUGMENTED REALITY, VIRTUAL REALITY, PHYSICAL SPACE, PERCEPTIVE DISTANCE, COMPUTER VISION.

The purpose of the qualification work is to develop a method for optimal placement of virtual objects in computer vision systems.

The object of the study is the process of placing virtual objects in physical space, which is limited in size. The subject of the study is models and algorithms for optimal placement of augmented reality objects in physical space of finite size. During the qualification work, an analysis of the current state of development of augmented reality technology was conducted. Approaches to the optimal location of an augmented reality object and the criterion of the optimal perceptual distance of the object placement were determined, taking into account which the objective function is formed and a method for its optimization is developed. The method for optimal placement of virtual objects in computer vision systems was improved and investigated.

## ЗМІСТ

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ .....	8
1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ РОЗВИТКУ ТЕХНОЛОГІЇ ДОПОВНЕНОЇ РЕАЛЬНОСТІ .....	12
1.1 Еволюція поглядів на місце доповненої реальності в житті людини сучасного та людини майбутнього .....	12
1.1.1 Складові можливостей доповненої реальності .....	12
1.1.2 Хронологія розвитку уявлень про віртуальність .....	16
1.2 Методологія визначення місця доповненої реальності у технологічному прогресі .....	19
1.3 Вплив доповненої реальності на людину, її діяльність, сприйняття світу .....	21
2 ОПТИМАЛЬНЕ РОЗТАШУВАННЯ ОБ'ЄКТА ДОПОВНЕНОЇ РЕАЛЬНОСТІ У ФІЗИЧНОМУ ПРОСТОРИ .....	27
2.1 Визначення оптимального розташування об'єкта доповненої реальності.....	27
2.2.1 Реалістичність та занурення.....	31
2.2.2 Комфорт та безпека користувача .....	32
2.2.3 Взаємодія у середовищі доповненої реальності .....	34
2.2.4 Проблеми продуктивності.....	35
2.3 Практичне застосування доповненої реальності .....	37
3 ОПТИМАЛЬНЕ РОЗТАШУВАННЯ ОБ'ЄКТІВ ДОПОВНЕНОЇ РЕАЛЬНОСТІ У СИСТЕМАХ КОМП'ЮТЕРНОГО ЗОРУ .....	43
3.1 Основні параметри технології доповненої реальності.....	43
3.1.1 Концепт віртуальної 3D-карти.....	45
3.1.2 Хмара характерних точок.....	47
3.1.3 Використання сенсорів мобільних пристроїв .....	48
3.1.4 Доповнена реальність в приміщенні та на вулиці .....	49

3.2 Сутність віртуального об'єкту та його властивості .....	51
3.2.1 Вектор об'єктів .....	52
3.2.2 Лінійні розміри об'єктів.....	53
3.3 Концепт оптимальної перцептивної відстані .....	55
3.3.1 Віртуальна модель в контексті розроблюваного концепту .....	56
3.3.2 Зона просторової нейтральності в математичній моделі.....	57
3.3.3 Критерій оптимальності .....	59
3.4 Визначення відстані між віртуальними об'єктами та границями площин .....	62
3.4.1 Геометрія площини .....	63
3.4.2 Геометрія 3D об'єкту.....	64
3.4.3 Опис методу рішення.....	65
ВИСНОВКИ.....	76
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ .....	78
ДОДАТОК А Графічний матеріал кваліфікаційної роботи.....	81

## СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

ІКТ – інфокомунікаційні технології

ПЗ – програмне забезпечення

ЦОД – центр обробки даних

ШНМ – штучні нейронні мережі

ШІ – штучний інтелект

AI – штучний інтелект

AR – доповнена реальність

QoS – якість обслуговування (англ., Quality of Service)

RTT – час затримки (англ., Round trip Time)

VR – віртуальна реальність (англ. Virtual Reality)

## ВСТУП

У світі спостерігається значне зростання обсягу інформації, що генерується та споживається щодня. В результаті зростає потреба у більш ефективних способах обробки та візуалізації цієї інформації. Доповнена реальність (AR) – перспективна технологія, яка може допомогти вирішити цю проблему, забезпечуючи більш інтуїтивний та зручний спосіб візуалізації даних.

Розробляючи підходи, методи та алгоритми оптимального розміщення віртуальних об'єктів в AR, проведені дослідження сприяють більш швидкій та ефективній обробці та візуалізації інформації, що надходить. Це може мати широке застосування у таких галузях, як освіта, охорона здоров'я, машинобудування та ін.

Програми доповненої реальності використовують камеру мобільного пристрою або іншого пристрою з підтримкою AR для накладання цифрових об'єктів у реальний світ. Щоб встановити віртуальні об'єкти в оточенні користувача, програма AR повинна розпізнавати та відстежувати фізичне середовище в режимі реального часу. Для цього використовуються алгоритми комп'ютерного зору для виявлення особливостей реального світу та вирівнювання віртуальних об'єктів за цими особливостями. Після розпізнавання та відстеження середовища програма може розміщувати віртуальні об'єкти та маніпулювати ними таким чином, що створюється враження прив'язки до реального світу.

Однак процес розміщення віртуальних об'єктів в оточенні користувача за допомогою AR-програм може бути пов'язаний з деякими труднощами. Одна з проблем, з якою стикаються користувачі, пов'язана з розміщенням віртуальних об'єктів у своєму оточенні. Важливим моментом є необхідність забезпечити користувачам безпечний та природно-інтуїтивний досвід взаємодії з віртуальними об'єктами. Це досягається за рахунок достатнього

простору навколо віртуальних об'єктів, щоб користувачі могли наближатися до них та взаємодіяти з ними з усіх боків без ризику зіткнення з реальними об'єктами чи іншими користувачами.

Отже, науково-технічне завдання оптимального розташування віртуальних об'єктів у системах комп'ютерного зору є актуальним.

Об'єктом дослідження є процес розстановки віртуальних об'єктів у фізичному просторі, який обмежений у розмірах.

Предметом дослідження є моделі та алгоритми оптимального розташування об'єктів доповненої реальності у фізичному просторі кінцевих розмірів.

Мета кваліфікаційної роботи полягає у розробці методу оптимального розташування віртуальних об'єктів у системах комп'ютерного зору.

Для досягнення поставленої мети потрібно вирішити такі основні завдання:

- провести аналіз сучасного стану розвитку технології доповненої реальності;
- визначити підходи до оптимального розташування об'єкта доповненої реальності;
- обґрунтувати критерій для визначення оптимальної перцептивної відстані розміщення об'єкта, з урахуванням яких формується цільова функція і розробляється метод її оптимізації;
- удосконалити метод оптимального розташування віртуальних об'єктів у системах комп'ютерного зору.

Методи дослідження. Теоретичні дослідження в цій роботі виконані на основі методів математичного моделювання, теорії ймовірності та статистики, а також фундаментальних основ комп'ютерного зору та 3D-моделювання.

Наукова новизна дослідження полягає в такому:

удосконалений метод оптимального розташування віртуальних об'єктів у системах комп'ютерного зору за рахунок попереднього знаходження

мінімального за об'ємом описаного навкруги об'єкту доповненої реальності паралелепіпеда та застосування при розміщенні у просторі даного об'єкту концепта оптимальної перцептивної відстані.

Практична цінність дослідження полягає в спрощенні процесу оптимального розташування віртуальних об'єктів у системах комп'ютерного зору.

За результатами проведених досліджень була надрукована наукова стаття в фаховому виданні за 123 спеціальністю «Системи управління, навігації та зв'язку» [1].

# 1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ РОЗВИТКУ ТЕХНОЛОГІЇ ДОПОВНЕНОЇ РЕАЛЬНОСТІ

1.1 Еволюція поглядів на місце доповненої реальності в житті людини сучасного та людини майбутнього

## 1.1.1 Складові можливостей доповненої реальності

Актуальна цифрова культура обумовлюється вкрай швидким техніко-технологічним зростанням усіх навколишніх областей, зростанням, що впливає на ідентифікацію себе людини та навколишньої дійсності.

Процес віртуалізації реальності веде до істотного розширення предметних і непередметних меж культури, що порушують нові сенсоутворюючі осередки буття, що трансформують спосіб життя і шкалу пріоритетів у житті.

Існування концепції доповненої реальності залежить від людської уяви та притаманної нашому розуму цікавості — якостей, які піднесли нас як розумних істот. Це наше вроджене бажання матеріалізувати неймовірне або навіть недосяжне у нашій власній реальності, що забезпечує нам зв'язок із відчутними аспектами світу. Як зазначає Александрова, у сучасній культурі поняття доповненої реальності можна розуміти як останню онтологічну стадію когнітивного розвитку. Цей розвиток дозволяє окремим людям чи групам людей розширити поле свого сприйняття, включивши модальну візуалізацію за допомогою кібернетичних систем та цифрових комунікацій, тим самим покращуючи сприйняття реальності [2].

У основі ці процеси моделювання реальності займають центральне місце у творчій силі сучасної культури. Технологія впливає на ці процеси і одночасно демонструє, що її власний розвиток є проявом культурно

обумовленого мислення, що охоплює потреби та прагнення як окремих людей, так і суспільств.

Крім того, технології доповненої реальності приваблюють сьогодні інтерес із багатьох галузей науки (освіта, медицина, промисловість та ін.), це пояснюється високою динамікою розвитку інтернет-технологій та мобільної, доступної електроніки.

Проблемою використання цієї технології займалися багато вчених, такі як Д.Вагнер, П.Мілграм, Ф.Касіма, Р.Азума, які зробили важливий внесок у розвиток питань людино-комп'ютерної взаємодії та доповненої реальності. У той самий час відзначається дефіцит досліджень у час, коли доповнена реальність перестала бути лише умоглядним конструктом, а вже застосовується практично у різних сферах.

Віртуальна реальність (VR) – це технологічно змодельоване та інтерактивне середовище, створене для того, щоб користувачі могли повністю залучитися та брати участь у штучному світі за допомогою спеціалізованих пристроїв. Цей іммерсивний досвід замінює візуальні, слухові, тактильні та інші сенсорні входи та реакції людей ретельно розробленими симуляціями. За Ю.Чорним: "Для віртуальної реальності притаманні такі ознаки, як моделювання в справжньому масштабі часу, імітація навколишнього оточення з великою часткою реалізму та можливість зворотного зв'язку".

У деяких аспектах віртуальна реальність може сприйматися як продовження еволюції візуального мистецтва як медіуму. Однак вона виходить за рамки традиційних форм мистецтва, виступаючи як потужний інструмент для моделювання та занурення в реальний світ. Доповнена реальність (AR), з іншого боку, стосується технологій, які безшовно включають цифровий контент у фізичне середовище в режимі реального часу. Потенціал доповненої реальності обмежується технічними складнощами використовуваних пристроїв та програмного забезпечення.

Інтегруючи віртуальний контент у реальний світ, вона закладає основу його майбутньої віртуалізації.

Світ доповненої реальності має такі властивості:

- поєднує віртуальне та реальне;
- взаємодіє у реальному часі;
- працює у 3D.

Перша система доповненої реальності була розроблена військовими США в 1992 році, але історія йде ще далі [9].

Головними методами реалізації доповненої реальності є розпізнавання образів і координат розташування користувача та ідентифікація маркерів. Дані просторового позиціонування маркера використовуються для точного проектування віртуального об'єкта, створюючи ілюзію переконливої фізичної присутності в навколишньому просторі.

Для роботи з доповненою реальністю необхідно кілька компонентів: фізичне середовище, що містить матеріальні об'єкти, програма доповненої реальності та матеріальний носій, на якому розміщена програма, що зазвичай супроводжується веб-камерою. Камера знімає частину середовища, а відеосигнал обробляється програмним забезпеченням, в результаті чого на екрані пристрою відображається змішаної або доповненої реальності.

Основна траєкторія розвитку технологій віртуальної та доповненої реальності обертається навколо їх дедалі більшої близькості до світу природи. Ці технології знаходять застосування в різних галузях, включаючи військову справу та інженерну справу, промисловість, освіту та науку, медицину, дизайн, комерцію, маркетинг та розваги.

У той самий час і стандартне бачення людиною світу не можна назвати об'єктивним, не доповненим іншими чинниками, проєктованими мозком, чому можна говорити, що технології доповненої реальності можуть бути органічно включені до розуміння дійсності.

Відеосфера служить візуальним компонентом людського сприйняття та розуміння світу, дотримуючись певних стандартизованих конвенцій. Проте

інтригує той факт, що світ, який людина переживає і з яким взаємодіє у цій сфері, лише частково різною мірою пов'язаний з реальністю. На цей світ накладаються застосункові прошарки інформації, що складаються з уявних об'єктів або фантомів, які відсутні у фізичній сфері. Більше того, цей фантомний світ, який спостерігає людина, залишається невидимим для інших. Наприклад, під час перегляду конкретного зображення різні люди можуть по-різному інтерпретувати його реальний зміст, оскільки мозок здатний затемнювати чи зменшувати певні аспекти "картинки". Сприйняття цього світу у відеосфері таке своєрідне, як і галюцинації, що робить матеріальний носій (наприклад, окуляри або лінзи, в яких знаходиться програма) своєрідним об'єктом, здатним викликати подібні галюцинаторні переживання.

Все це разом формує "комбіновану реальність", як це показано на рисунку 1.1.



Рисунок 1.1 – Континуум «реальність – віртуальність»

З цієї точки зору, поведінка людей, що взаємодіють з доповненою реальністю, і тих, хто спостерігає за цією взаємодією ззовні зони доповненої реальності, стає інтригуючою.

На думку деяких авторів, доповнена реальність – це не революційний зсув у нашому сприйнятті насправді, а скоріше продовження давнього процесу. Бодрійяр стверджує, що царства справжнього та віртуального настільки тісно переплелися, що стає все важче відрізнити одне від одного. Ця взаємодія призвела до виникнення найскладнішого стану гіперреальності, в якому ми існуємо [5].

У традиційному розумінні "знак" зазвичай позначає щось, що має існування, хоча і не у фізичній формі. Проте симуляції, створювані засобами масової комунікації та комп'ютерними технологіями, сприяли поступовому стиранню демаркації між знаками та реальністю, до якої звикли люди. Бодрійяр називає цю штучну, віртуальну реальність, яка порушує та прагне витіснити справжню реальність, гіперреальністю – метою, яку, ймовірно, прагне досягти доповненої реальності

### 1.1.2 Хронологія розвитку уявлень про віртуальність

У 1838-му році фізик із Великобританії Ч.Уїтстон створив пристосування, яке функціонує за правилом стереоскопа – мозок «поєднує» двовимірну картинку з обох очей в одну об'ємну. Так він вигадав стереоскоп, за допомогою якого користувачі «поміщалися» у фотографію [4].

У 1938 році французький письменник Антонен Арто вперше застосував термін «віртуальна реальність».

У 1957-му році винайдено сенсору (пристрій запатентували лише в 1962 році) – це подоба симулятора. Воно являло собою кабінку, яка задіяла всі почуття, а не лише зір та слух.

В 1965 Іван Сазерленд, професор Гарвардського університету, запропонував концепцію "кінцевого дисплея", уявляючи собі систему, яка могла б точно відтворювати реальність. Ця концепція включала кілька ключових елементів: дисплей, розташований перед очима користувача, що забезпечує візуально реалістичний віртуальний світ; об'ємний звук та

тактильний зворотний зв'язок для посилення ефекту занурення; обробка віртуальних взаємодій реальному часі з допомогою комп'ютера; можливість взаємодії користувачів із віртуальними об'єктами у фізичному просторі. У статті Сазерленда була представлена основна концепція, яка вплинула на розвиток пристроїв віртуальної реальності і продовжує формувати нашу сучасну епоху.

У 1980 році зроблено перший AR-пристрій "EyeTap". Воно накладало зображення із текстом зверху справжньої картини дійсності. Комплекс складався з комп'ютера, розміщеного в рюкзаку та приєднаного до камери на окулярах.

1990 рік. Вчений Том Кодел запропонував термін "доповнена реальність". Він зазначив, що віртуальна реальність у разі робиться доповненням до фізичної.

У 1997 році Рональд Азума опублікував широкий огляд доповненої реальності, визнавши швидкий прогрес у комп'ютерному зорі, який вимагатиме подальшого огляду в найближчі роки. Він класифікує доповнену реальність за трьома визначальними ознаками: інтеграція реального та штучного світів, зв'язок усередині реального світу та існування у тривимірному просторі.

Р. Мілгром та Р. Азума створили таксономію доповнення реальності чи віртуальності шляхом додавання контенту. Однак система також здатна перетворювати довкілля іншими способами, наприклад, змінювати цифровий контент або видаляти/ховати об'єкти.

2002 року С. Манн розширив вісь "віртуальність-реальність" П. Мілгром, ввівши другу вісь, щоб охопити застосункові форми змін. Цей двомірний континуум "віртуальність-реальність" охоплює опосередковану віртуальність і реальність, у якій людське сприйняття та розуміння довкілля формується під впливом різних форм опосередкування. Ця система дозволяє вносити різні зміни у реальність. Згодом ці концепції було реалізовано великими компаніями у практичних застосунках [6].

2013 рік: Google оприлюднила відкрите бета-тестування окулярів Google Glass. Вони під'єднуються до інтернету на смартфоні через Bluetooth  
2016 рік. окулярів змішаної реальності Magic Leap One Creator Edition.

Отже, хронологію можна умовно розділити на два періоди, доповнена реальність без використання комп'ютерних технологій та із застосуванням таких. Перші передумови нового етапу були закладені в 60-х роках у теоретичних описах принципів і в 80-х у перших практичних зразках [5].

В даний час значна частина досліджень в області доповненої реальності пов'язана з використанням відеозображень у реальному часі, де цифрові елементи накладаються на комп'ютерну графіку. По суті, йдеться про систему, яка покращує зображення за допомогою цифрових компонентів.

Це привело до її використання в різних практичних застосунках. Volkswagen виділяється як один з перших послідовників цієї технології, використовуючи її при створенні моделей автомобілів через навчальні посібники для свого нового покоління транспортних засобів. Співробітникам передбачити вплив процесу відновлення на механізми автомобіля. Це впровадження продемонструвало потенціал доповненої реальності для підвищення ефективності роботи та навчання в автомобільній промисловості.

Крім основних застосунків, в області доповненої реальності з'являються інтригуючі та нетрадиційні тенденції. Крім того, на одному з нафтопереробних заводів була впроваджена система доповненої реальності для моніторингу і відстеження дефектів в мережі газових лічильників і датчиків, включаючи важкодоступні місця. Simtars в Австралії розробила вступний навчальний курс з безпеки в шахтах з використанням віртуального моделювання. умовах гірничодобувної промисловості [7].

На сьогодні окуляри змішаної реальності є найбільш прогресивним AR-пристроєм і, вони, дозволяють розробляти і використовувати програми візуалізації для рішень більш складних завдань, наприклад, в проектуванні і навіть в медицині, тоді як раніше це було неможливо в силу високої

неточності. Це пов'язано з тим, що зоровий аналізатор найбільш важливий для нас і його проробляють в AR.

## 1.2 Методологія визначення місця доповненої реальності у технологічному прогресі

На тлі загального галасу навколо штучного інтелекту зростає інтерес до інших зіставних технологій, які здатні справити перетворюючу дію як на бізнес, так і на повсякденне життя. Поряд із штучним інтелектом Благовіщенський виділяє кілька інших технологій, які змушують нас задуматися про те, чи є вони просто "шумом" або вказують на наш майбутній напрямок [3].

Необоротний характер еволюції віртуальної та доповненої реальності стає очевидним щодо реальних застосунків, а чи не лише з урахуванням абстрактних теорій. Ці технології поступово пробивають собі дорогу у різні професійні галузі. Наприклад, віртуальна реальність активно використовується в галузі журналістики, особливо в зарубіжній журналістиці, дозволяючи створювати захоплюючі сюжети. Дизайнери та архітектори використовують віртуальну реальність для демонстрації своїх проектів, прикладом чого може бути реалізація проекту ІКЕА. У медичній сфері віртуальна реальність є освітнім інструментом для студентів-медиків, дозволяючи їм моделювати та практикувати процедури. Вона також допомагає лікарям консультувати пацієнтів перед операцією, забезпечуючи візуальне подання передбачуваних процедур. Ці практичні докладання підкреслюють неминучий вплив віртуальної і доповненої дійсності у різних галузях, зміцнюючи їх незворотну інтеграцію у професійну практику [5].

Медичні стартапи, що використовують віртуальну реальність, роблять значний внесок у допомогу пацієнтам з такими захворюваннями, як хвороба Альцгеймера, рак та втрата зору. VR також широко використовується для навчання представників різних професій, включаючи солдатів, пілотів,

продавців, інженерів та енергетиків. Наприклад, нафтова корпорація Schlumberger використовує VR-симулятори для навчання новачків управлінню буровими установками. Багато компаній активно розробляють власні VR/AR-рішення для освітніх програм.

У сфері освіти доповнена реальність надає неоціненну допомогу у реконструкції історичних подій та створенні 3D-проекцій під час читання звичайних книг. Доповнена реальність покращує викладання у класах та презентації, дозволяючи студентам повніше засвоювати предмети. Прикладом впровадження технології є японська програма New Horizon, яка використовує камери смартфонів для відображення анімованих персонажів прямо на певних сторінках підручників. Різні програми вже вплинули, наприклад застосунок ARnatomy допомагає майбутнім лікарям зрозуміти реалістичні моделі скелета, а візуальний посібник VA-ST допомагає людям з порушеннями зору, створюючи контурні замальовки осіб співрозмовників.

Військовий сектор також виявляє великий інтерес до цих технологій. Американська компанія BAE Systems розробила шолом Striker II, оснащений зоровим дисплеєм замість окулярів. Цей шолом використовує зображення з камер нічного бачення і може відстежувати рухи голови оператора, забезпечуючи відповідність відображених даних лінії зору користувача.

Інша американська компанія, Matterport, використовує доповнену реальність для створення віртуального ринку нерухомості, революціонізуючи спосіб демонстрації та продажу нерухомості.

Але, звичайно, основні драйвери AR, як і багатьох інших технологій, - велетні Apple, Google і Microsoft. Вони ініціативно вкладають кошти в AR, щоб зробити технологію результативнішою і доступнішою для мільярдів користувачів смартфонів. Якщо вірити прогнозам, то технологія VR буде впроваджена приблизно через 2–5 років, AR – лише через 5–10 років. Щоб зрозуміти які сфери замінатимуться засобами доповненої реальності, наведемо схему на рисунку 1.2.

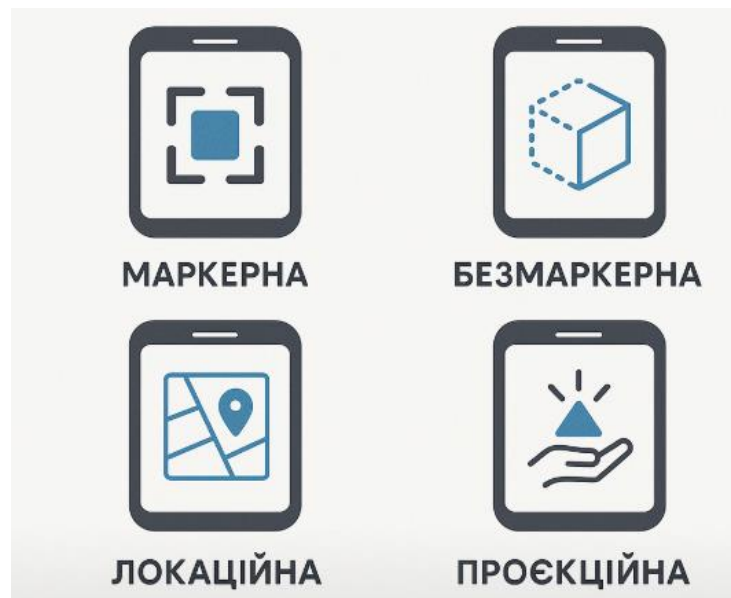


Рисунок 1.2 – Типи застосунків з доповненою реальністю

Промислові підприємства змушені вивчати технології віртуальної реальності, якщо хочуть увійти в історію Індустрії 4.0, стати на шлях цифровізації та глибокої автоматизації виробничих процесів. «Інтернет речей», VR та AR – важливі компоненти нової організації бізнес-моделей.

1.3 Вплив доповненої реальності на людину, її діяльність, сприйняття світу

Розглянемо технічні перспективи технологій доповненої реальності у найближчому та далекому майбутньому.

Чимало фахівців, вважають, що технології VR та AR спільно з BigData, хмарними розробками, штучним інтелектом та окремими іншими розробками будуть "стрижневими компонентами четверної промислової революції" [6].

Вважається, що зараз про AR мало говорять, тому що в найближчому майбутньому вони у своєму розвитку проходять етап "прізви розчарування" у циклі зрілості технологій К. Панетта (рисунок 1.3)

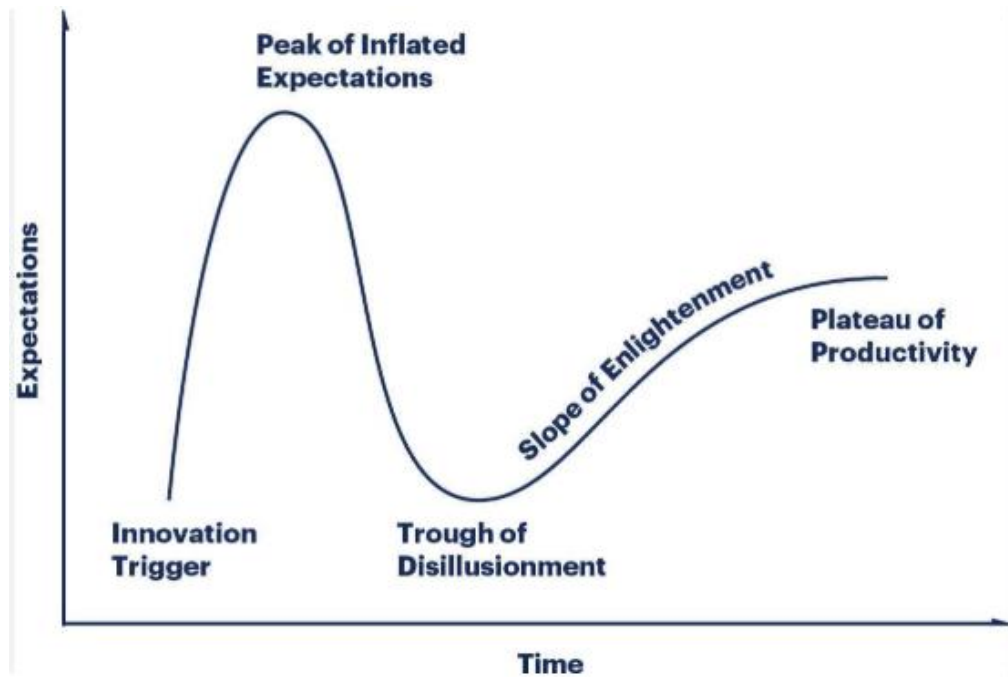


Рисунок 1.3 – Цикл зрілості технологій за К. Панеттом

Як можна побачити, технологія AR зараз перебуває практично в самому низу «прірви розчарування». А. Іванова коментує ситуацію наступним чином: "це можна пояснити невідповідністю очікувань за підсумками тестування пристроїв, що надійшли в масовий продаж, і програмних продуктів для доповненої реальності". На поточній стадії зазвичай виявляються вади будь-яких складних технологій [6].

Віртуальна реальність успішно подолала складну "прірву розчарування" і тепер вступила у фазу "просвітлення". Вона завоювала зростаючу і віддану аудиторію, та її творці дедалі більше зосереджуються на комерціалізації та активно шукають вирішення властивих їй проблем.

Хоча повна революція VR/AR може й не статися найближчим часом, варто відзначити значний інтерес різних компаній висновку подібних товарів ринку. Яскравим прикладом є Британська мовна корпорація (BBC), яка транслювала Чемпіонат світу з футболу 2018 року у віртуальній реальності.

Хоча в даний час, можливо, не вистачає дійсно якісних прикладів використання технології віртуальної реальності, це не применшує перспективи цієї сфери. До 2015–2016 років VR та AR були в основному

сферою розробників та мрійників, але останніми роками ці технології набрали значної популярності та стали помітним компонентом просування індустрії. З позиції В. Маслова: "Поки що VR/AR дивує не так інноваційністю продукту, як вірою прямих розробників, власників бізнесів, стартапів у цю технологію в довгостроковій перспективі" [6].

У короткому майбутньому причини гальмування розвитку недостатньо високому доволі картинки, малої потужності та швидкості пристроїв. Крім того, ціна якісних пристроїв, як і раніше, порівняно велика, а програми за ступенем складності виглядають швидше презентацією технології, а не масштабним комерційним продуктом.

У найближчому майбутньому технології віртуальної та доповненої реальності знайдуть застосування не лише у відеоіграх, а й у таких галузях, як реальні події, VR-парки, медицина, нерухомість, освіта та військова справа. Ці технології розвиватимуться у більш комплексні, захоплюючі та практичні рішення. У міру розвитку технологій пристрою, здатні підтримувати доповнену та віртуальну реальність, ставатимуть все більш потужними, забезпечуючи покращені візуальні враження. У промисловому секторі VR та AR відіграватимуть все більш важливу роль у перевірці якості технологічних процесів та інспекції готової продукції. У роздрібній торгівлі ці технології залучать покупців новими функціональними можливостями та захоплюючими враженнями. Крім того, технологія AR знайде своє застосування в автомобілях, надаючи цінну допомогу водіям. У міру розвитку проектів VR/AR вони стануть все більш універсальними та цінними у багатьох галузях, революціонізуючи способи взаємодії з технологіями та змінюючи різні аспекти нашого повсякденного життя [5].

Розглянемо й особливості перспектив щодо далекому майбутньому, від 10–20 років і більше. За прогнозами сфери сягне \$113 млрд. до 2024 р. (за окремою інформацією – \$192 млрд. до 2022 року), а до 2030 р. ринок AR та її "супутника" VR чекає потужне зростання до \$350 млрд. (рисунок 1.4) [2].

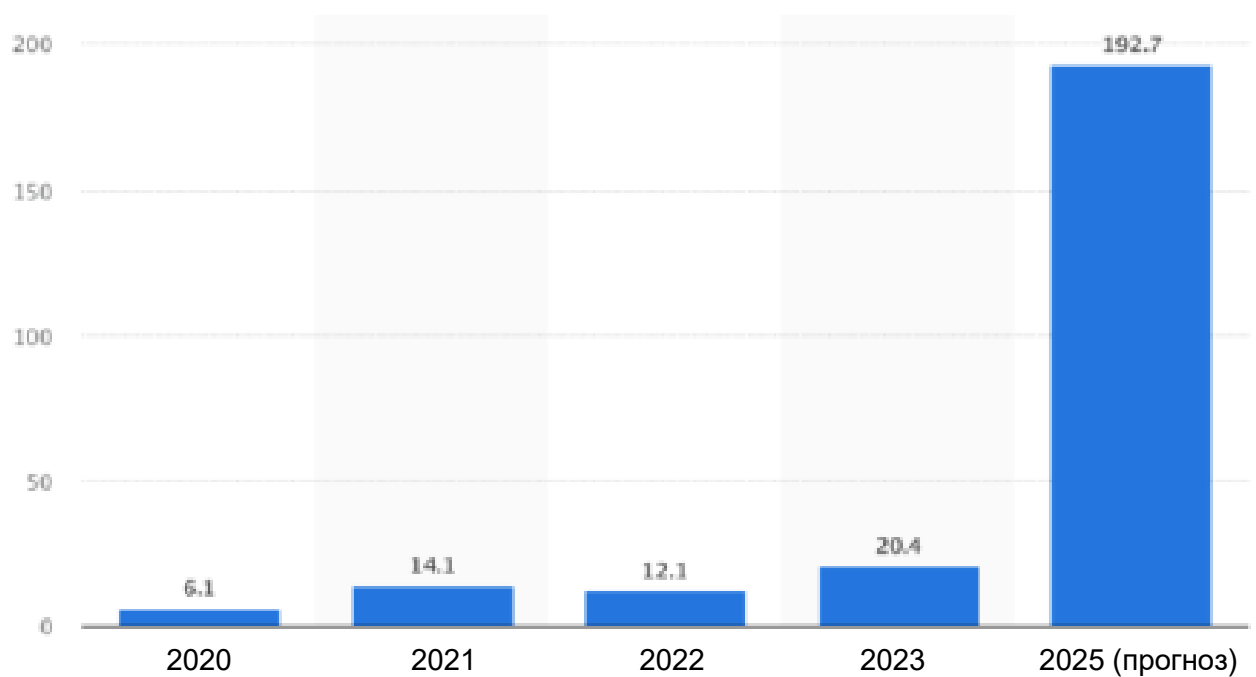


Рисунок 1.4 – Реалії та прогноз зростання ринку доповненої реальності

У найближчому майбутньому представники компаній Microsoft і Meta прогнозують технологічний зсув, коли традиційні монітори будуть замінені пристроями віртуальної реальності (VR) і доповненої реальності (AR). взаємодії з цифровим контентом, забезпечуючи більш захоплюючий і інтуїтивно зрозумілий інтерфейс користувача.

Якщо говорити загалом про розвиток доповненої реальності, то можливо дуже скоро окремі розробники VR-окулярів перейдуть на більшу взаємодію з навколишнім світом.

Сьогодні ми живемо під час бурхливих досліджень у галузі. Навіть у технологічних "монстрів" немає чіткої картини майбутнього формування ринку доповненої реальності.

Отже, постійною тенденцією розвитку технологій віртуальної та доповненої реальності є їхнє все більше зближення зі світом природи. Ці технології знаходять широке застосування в різних галузях, включаючи військову справу та інженерну справу, промисловість, освіту та науку, медицину, дизайн, комерцію, маркетинг та дозвілля. Деякі автори стверджують, що доповнена реальність — це не революційне зрушення в

нашому сприйнятті дійсності, а скоріше продовження процесу, що давно йде. На думку Бодрійяра, справжнє та віртуальне настільки переплелися, що їх неможливо розділити, внаслідок чого виникла найскладніша гіперреальність, у якій ми існуємо.

В даний час більшість досліджень доповненої реальності зосереджена на відео-застосунках, де системні процеси в цифровій формі інтегруються з комп'ютерною графікою. Це, власне, створює систему, яка доповнює зображення цифровими компонентами. Хоча нині зоровий аналізатор має першорядне значення у розвитку AR, найближчим часом очікується глибше вивчення доповненої реальності.

Віртуальна і доповнена реальність дедалі більше інтегруються у різні професійні галузі. Згідно з прогнозами, технологія VR набуде широкого поширення в найближчі 2-5 років, у той час як для впровадження AR може знадобитися близько 5-10 років. В даний час технологія AR знаходиться на стадії "прірви розчарування", що характеризується розбіжністю очікувань між масовим тестуванням дизайну та програмного забезпечення доповненої дійсності. Ця стадія часто виявляє недоліки складних технологій. Враховуючи цикл зрілості інших технологій, таких як смартфони, голосове та біометричне розпізнавання, магазини застосунків, можна зробити висновок, що прогноз щодо впровадження AR є досить точним.

З біологічної точки зору такий процес доповненого сприйняття також можливий хоч і не задуманий природою. Сегменти мозку, активовані в доповненій реальності, відгукуються за довготривале кодування пам'яті, уважність, залученість, емоційну напруженість та наближення/віддалення (фактичний нахил або віддалення від об'єкта, що аналізується). При вимірі когнітивної функції доповнена реальність показувала майже вдвічі (в 1,9 раза) більш високі рівні залучення у порівнянні з еквівалентами, не пов'язаними з ДР. Це очевидна ознака її можливості генерувати сильнішу віддачу, ніж аналоги.

AR відтворює реальну інформаційну ситуацію, але розширює її даними, які за типовому людському сприйнятті немає. Віддалено це можна порівняти з розумінням навколишнього світу бабкою. Людське сприйняття світу сформовано застосуванні двох очей як двох сенсорів і називається дихоптичним. Зображення створюється за законами геометричної оптики. Очі комах мають фасеткову будову, і кожне око включає багато сенсорів. Таке сприйняття називається голоптичним. У ньому одні візуальні моделі розширюють інші. Таке сприйняття в природі та моделювання в інформаційному полі формує інформаційну перевагу порівняно зі звичайним сприйняттям.

Звичайне існування індивіда цілком залежить з його можливостей сприйняття, але ми зовсім нездатні до прямого сприйняття зовнішнього світу, наше полі зору лімітовано межами нашого особистого психологічного свідомості. Таким чином, нам не можна пізнати дійсність у тому вигляді, в якому вона є.

## 2 ОПТИМАЛЬНЕ РОЗТАШУВАННЯ ОБ'ЄКТА ДОПОВНЕНОЇ РЕАЛЬНОСТІ У ФІЗИЧНОМУ ПРОСТОРИ

### 2.1 Визначення оптимального розташування об'єкта доповненої реальності

У застосунках доповненою реальності розташування віртуальних об'єктів в оточенні користувача грає важливу роль у створенні імерсивного і інтерактивного досвіду. Концепція оптимального розташування відноситься до розташування цих об'єктів таким чином, щоб максимально підвищити комфорт користувача, залученість і загальну ефективність AR- досвіду.

Оптимальне розташування об'єктів AR включає в себе кілька аспектів. По-перше, об'єкти повинні бути розташовані на відповідній відстані від користувача. Це припускає підтримку комфортної дельта-відстані навколо кожного об'єкта, яка гарантує, що об'єкти не знаходяться занадто близько, щоб викликати дискомфорт, і не занадто далеко, щоб з ними було важко взаємодіяти чи сприймати.

По-друге, об'єкти повинні бути правильно орієнтовані по відношенню до користувача і реального оточення. Це припускає використання бічних векторів для визначення орієнтації кожного об'єкта, забезпечуючи їх вертикальне положення та правильне напрямком з крапки зору користувача.

По-третє, компонування об'єктів повинно враховувати фізичні обмеження реального середовища. Наприклад, віртуальні об'єкти не повинні розташовуватися всередині реальних об'єктів або в місцях, які можуть бути недоступні або небезпечні для користувача.

Оптимальна компонування також залежить від конкретних цілей AR- програми. Наприклад, в AR-грі об'єкти можуть бути розташовані так, щоб створити складний ігровий процес, а в освітньому застосунку вони можуть бути розташовані так, щоб полегшити навчання та Вивчення.

Визначення оптимального розташування AR-об'єктів – складне завдання, яке часто включає в себе використання математичних моделей і алгоритмів. Вони можуть враховувати різні фактори, такі як становище і орієнтація користувача, геометрія середовища та властивості віртуальних об'єктів.

Згідно сучасному рівню, існує кілька досліджень, присвячених питанню розміщення 3D-моделей з використанням AR.

Однак на сьогоднішній час існує обмежена кількість досліджень, вивчаючих і оцінюють різні методи і рішення для такого розміщення для внутрішньої та зовнішньої середовища.

Наприклад, в роботі «The Assessment of 3D Models Placement Methods in Augmented Reality» [11] обговорюються останні дослідження методів розміщення 3D-моделей в AR. Стаття починається з огляду методів розміщення AR і рішень, запропонованих в літературі. Потім описується підхід до оцінки, який включає як якісну, так і кількісну оцінку кількох методів розміщення AR для внутрішньої і зовнішньої середовища. Автори даної статті пропонують кількісну і якісну оцінку кількох методів розміщення AR на 3D моделі. Вони також наводять обговорення вимог до точності і стабільності розміщення в деяких випадках використання в області АЕСО, аналізуючи придатність використання кожного вивченого методу розміщення. Для порівняння точності кожного методу розміщення були визначено локальні відхилення координат між реальними точками об'єкта і їх кореспондентами.

Collaborative Object Positioning in Distributed Augmented Realities – це дослідження, в якому вивчаються проблеми віддаленого співробітництва з використанням дисплеїв доповненою реальності (AR) [12].

Автори зазначають, що однією з основних проблем при віддаленому взаємодії з використанням AR-дисплеїв є позиціонування віртуальних об'єктів. Співробітникам можуть потрібно загальні просторові орієнтири для координації своїх дій, але при використанні AR-дисплеїв загальне простір зазвичай складається тільки з віртуальних робітників об'єктів, в то час як

взаємодія учасників відбувається в їх індивідуальному фізичному оточенні. Результати показали, що віртуальні орієнтири покращують користувальницький досвід і знижують тимчасову потреба. Автори також визначили проблемні ситуації, характерні для конкретної завдання, і запропонували рекомендації по розробці розподілених AR для полегшення спільного позиціонування віртуальних об'єктів.

Вплив різних ступенів штучності і транспортування вивчалось в здебільшого з крапки зору змішаного співробітництва між AR, VR і фізичної середовищем. Біллінгхерст представив прототип MagicBook - перехідний інтерфейс, який дозволяє користувачам перемикатися між типами інтерфейсів (наприклад, AR і VR) і від віддаленого до колабораційному (рисунок 2.1).

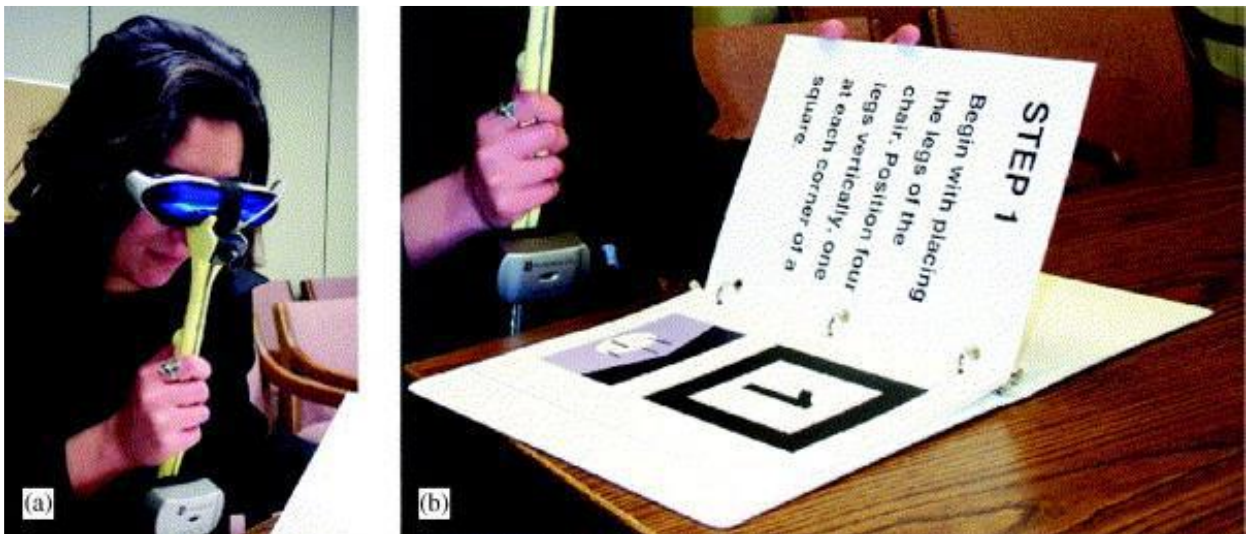


Рисунок 2.1 – Демонстрація роботи MagicBook

Крім того, вони представили "перехідну модель спільної роботи" - концептуальну модель, яка ілюструє різні типи спільної роботи в перехідних інтерфейси.

Загалом, це дослідження підкреслює важливість обліку просторових орієнтирів при розробці розподілених AR-систем для спільної віддаленою роботи. Надаючи віртуальні орієнтири в якості опорних точок для учасників

спільної роботи, розробники можуть покращити користувацький досвід і полегшити спільне позиціонування віртуальних об'єктів.

## 2.2 Опис завдання розміщення об'єкта доповненої реальності

Програми доповненою реальності спрямовані на те, щоб органічно поєднувати віртуальні об'єкти з реальним світом, створюючи для користувача захоплюючий і інтерактивний досвід. Для досягнення цієї цілі необхідно ретельно керувати розміщенням і орієнтацією цих віртуальних об'єктів в оточенні користувача. Саме тут вступає в гру концепція раціонального розміщення.

Раціональне компонування в AR означає стратегічне розташування віртуальних об'єктів таким чином, щоб максимально підвищити ефективність і зручність використання AR-застосунки. Це має на увазі не тільки розміщення об'єктів у відповідних місцях, але і їх правильну орієнтацію і забезпечення логічної взаємодії з реальним середовищем і кожен з кожним [14].

Необхідність раціональної компонування в AR-застосунках обумовлена декількома факторами:

Реалістичність і занурення: щоб враження від AR були переконливими, віртуальні об'єкти повинні виглядати так, як ніби вони природно існують в реальному середовищі. Це означає, що вони повинні бути розміщені і орієнтовані таким чином, щоб відповідати фізики та геометрії реального світу.

Комфорт і безпека користувача: віртуальні об'єкти повинні бути розташовані на комфортній відстані від користувача і не повинні заважати його руху або огляду реального світу. Це дуже важливо для забезпечення безпеки користувача і запобігання дискомфорту або дезорієнтації.

Інтерактивність: розташування віртуальних об'єктів повинно полегшувати взаємодію користувача з ними. Це може включати розміщення

об'єктів в межах досяжності користувача або їх розташування таким чином, щоб спрямовувати його увага і дії.

Продуктивність і ефективність: розміщення і орієнтація віртуальних об'єктів може вплинути на продуктивність AR- програми. Наприклад, розміщення занадто великої кількості об'єктів близько друг до другові може привести до навантаженні обчислювальної потужності пристрої, в то час як занадто велике відстань між ними може зробити застосунок менше ефективним в використанні.

Цілі програми: макет повинен підтримувати конкретні цілі AR- програми, будь то навчання, розвага, допомога в виконанні завдання або щось інше. Це може включати в себе розташування об'єктів таким чином, щоб стимулювати дослідження, наочно уявити інформацію, створити складний ігровий рівень або направити користувача на виконання завдання.

### 2.2.1 Реалістичність та занурення

Розробка AR-систем, що забезпечують узгодженість між реальним і віртуальним світом, є складним завданням. Реалістичність відноситься до ступеня, в якому AR-система може точно представляти реальний світ. Щоб досягти реалістичності, дизайнери повинні переконатися, що віртуальні об'єкти органічно інтегровані в реальне середовище. Це потребує детального розгляду таких факторів як освітлення, тіні і перспективи. Нотація ASUR забезпечує основу для описи об'єктів, беруть участь в AR-системі, і їх взаємовідносин. Використовуючи цю нотацію, дизайнери можуть гарантувати, що віртуальні об'єкти будуть розміщені в відповідних місцях в реальному середовищі, як це зображено на рисунку 2.2.

Узгодженість – це ступінь, в якому AR-система підтримує адекватний користувальницький досвід в різних сценарії. Щоб досягти узгодженості, дизайнери повинні переконатися, що все відносини від вихідних адаптерів або реальних об'єктів до користувачеві засновані на одному і том ж мовою

взаємодії. Це означає, що дані, відображаються AR-системою, повинні бути засновані на узгодженому графічному мовою, який відповідає подання реального об'єкт.

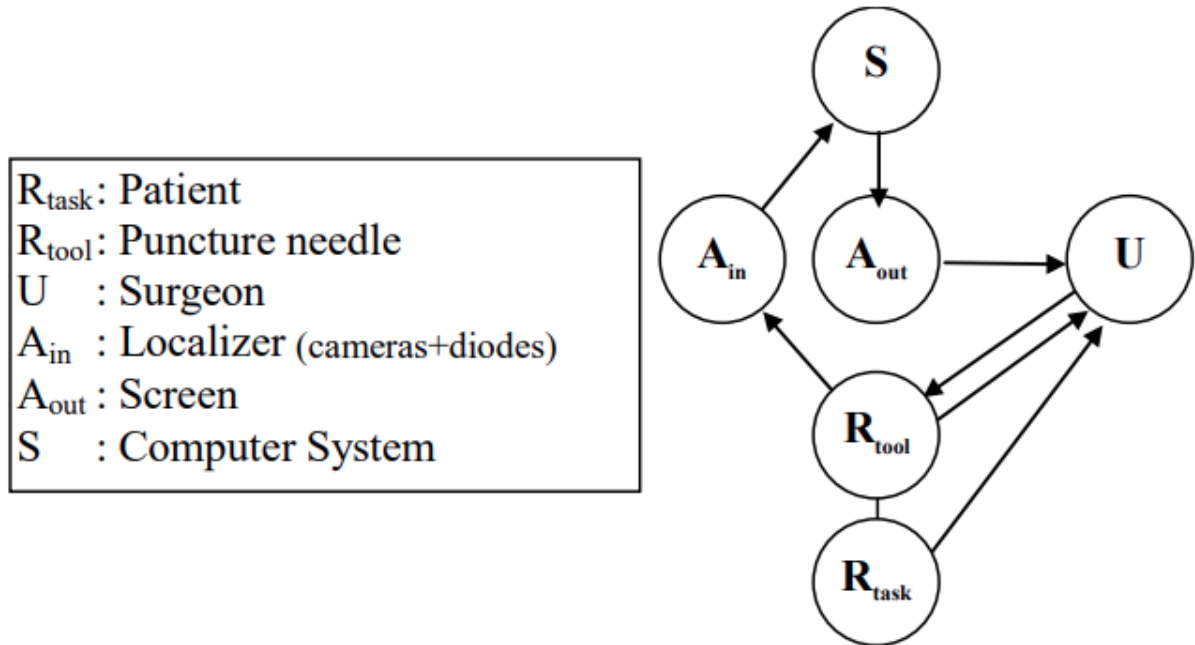


Рисунок 2.2 – Приклад використання ASUR нотації

Наприклад, якщо AR-система відображає інструкції по відкриття лотка принтера, вона повинна використовувати стрілки або інші графічні елементи, відповідні виду принтер.

### 2.2.2 Комфорт та безпека користувача

У статті "Guidance and surroundings awareness in outdoor handheld augmented reality" розглядається ефективність різних методів орієнтування в застосунках доповненою реальності на відкритому повітрі, а також важливість комфорту і безпеки користувача в таких застосунках [14]. Автори стверджують, що надійні системи орієнтації і запобігання ризиків є вирішальними факторами для успіху застосунків доповненою реальності для пішоходів. Одним з основних вкладів даної роботи є дослідження двох різних

методів наведення, щоб змусити людей рухатися в певні місця в застосунку доповненою реальності на відкритому повітря. Перша техніка припускає використання віртуальною стрілки для напрямки користувачів до місцю призначення, в то час як друга техніка припускає надання візуальних підказок о тому, куди користувачі повинні дивитися, як тільки вони туди потраплять. Автори виявили, що обидві техніки ефективно спрямовують користувачів до місцю призначення, але друга техніка більше ефективна в забезпеченні користувачів почуттям напрямки і орієнтації. У доповнення до вивчення методів орієнтації автори також виміряли час, проведене, дивлячись на екран, як показник того, наскільки користувачі обізнані о своєму оточенні. Вони стверджують, що це важливий момент, який необхідно враховувати при розробці застосунків для використання в реальних умовах, таких як міські райони, де мінімізація небезпек має вирішальне значення для безпеки користувачів. Автори також обговорюють потенційні ризики, пов'язані з використанням технології доповненою реальності на відкритому повітря. Ці ризики включають відволікання уваги від навколишнього обстановки, зниження ситуаційної поінформованості і підвищений ризик аварій або зіткнень. Щоб знизити ці ризики, автори пропонують розробляти програми з функціями безпеки, такими як попереджувальні сигнали або оповіщення, коли користувачі наближаються до небезпечним зон.

На рисунку 2.3 представлений один з прикладів відповідності UI мобільного програми доповненою реальності важливим політикам безпеки компанії Google, які вимагають обов'язкового залучення уваги користувача до необхідності пам'ятати про потенційні фізичні небезпеки у реальному світі.



Рисунок 2.3 – Жартівливе попередження користувача про небезпеку використання застосунків доповненої реальності»

### 2.2.3 Взаємодія у середовищі доповненої реальності

«Interactions in Augmented and mixed Reality: An Overview» представляє глибокий аналіз взаємодій між людьми і віртуальними об'єктами в середовищах доповненою і змішаною реальності [13]. У статті підкреслюється важливість цих взаємодій, оскільки вони мають вирішальне значення для створення імерсивного досвіду, який може підвищити залученість і задоволеність користувачів. Автори починають з короткого огляду сучасного стану технології змішаної реальності. Вони зазначають, що змішана реальність – це розвивається технологія, яка передбачає максимальне взаємодія користувачів в реальному світі по порівнянні з іншими подібними технологіями. Автори також підкреслюють вплив доповненою реальності на задоволеність користувача в численних застосунках, таких як інженерія, археологія, медицина або освіта. Далі в статті розглядаються різні способи взаємодії з віртуальними об'єктами в середовищах доповненою і змішаною реальності. Автори виділяють три основні модальності: візуальну, слухову і тактильну. Вони дають докладне опис кожною модальності і обговорюють їх

сильні і слабкі сторони. Що стосується візуального взаємодії, автори зазначають, що віртуальні об'єкти можуть відображатись з допомогою різних технологій, таких як проєкційні дисплеї. Вони також обговорюють, як візуальна взаємодія може бути покращена з допомогою таких методів, як відстеження об'єктів або розпізнавання жестів. Слухове взаємодія - ще одна важлива модальність для взаємодії з віртуальними об'єктами. Автори зазначають, що звук може використовуватися для забезпечення зворотній зв'язку з діями користувача або для створення більше захоплюючого досвіду. Вони також обговорюють, як слухові взаємодії можуть бути об'єднані з іншими модальностями для створення більше складного досвіду. Зрештою, тактильні взаємодії мають на увазі фізичну зворотну зв'язок з віртуальними об'єктами. Автори зазначають, що тактильна зворотна зв'язок може бути забезпечена з допомогою таких пристроїв, як рукавички або екзоскелети. Вони також обговорюють, як тактильна зворотна зв'язок може підвищити залученість користувача, забезпечуючи більше реалістичний досвід.

#### 2.2.4 Проблеми продуктивності

Однією з основних проблем, стоять перед AR, є технічні питання, які впливають на функціональність навчальної діяльності. До них відносяться проблеми з обладнанням, збої в роботі контенту і проблеми, виникаючі у користувачів [12].

Від несправності пристрої до проблем з підключенням до локальному серверу апаратні проблеми можуть перешкодити користувачеві отримати доступ і завершити дію. Наприклад, обмежене поле зору (FOV) в AR-пристроях знижує ефект занурення для користувачів, оскільки вони охоплюють тільки дуже маленьку область в окулярах. Таким чином, це обмеження в апаратному забезпеченні може вплинути на продуктивність AR-застосунків, роблячи взаємодія з цифровим контентом менше плавним та природним.

AR в значною ступеня залежить від того, наскільки правильно 3D-об'єкти закріплені перед користувачами і функціонують так, як очікується. Однак збої в контенті, коли 3D-об'єкти не закріплюються належним чином, можуть погіршити враження користувача і зробити процес використання програми менше ефективним.

Надійність AR-застосунків знижується в умовах низькою освітленості (менше 95 люкс), на відстані більше 80 см і при оклюзії маркера більше чим на 50%. AR-застосунок може виявити маркери, коли папір, на якому є мітки, є вологим або зім'ятим, що вказує на те, що фізичний стан мітки суттєво впливає на продуктивність AR-застосунків.

AR включає в себе кілька компонентів, в том числі узгодження кольорів, відстеження особливостей, регулювання пучків, калібрування камери, стереоузгодження і багаторакурсне стерео, всі, з яких можуть бути обчислювально інтенсивними. Також має значення потенціал нових технологій, таких як глибоке навчання і паралельні обчислення, в підвищенні продуктивності AR-застосунків.

З цих висновків ясно, що на продуктивність мобільних AR-застосунків впливає безліч факторів, починаючи від умов навколишнього середовища і закінчуючи обчислювальними можливостями пристрої. Для рішення цих проблем розробникам необхідно розглянути стратегії оптимізації, які підвищують надійність виявлення об'єктів в різних умовах і знижують обчислювальні вимоги AR-процесів. Це може включати в себе використання передових алгоритмів для виявлення і відстеження об'єктів, інтеграцію методів машинного навчання для обробки зображень в режимі реального часу, а також розробку ефективних AR-фреймворків, які можуть використовувати обчислювальні можливості сучасних мобільних пристроїв.

Крім того, оскільки технологія AR продовжує розвиватися, дуже важливо проводити постійні дослідження і випробування для виявлення і рішення нових проблем продуктивності. Це дозволить забезпечити

безперебійну роботу мобільних застосунків AR, незалежно від умов і обмежень, з якими вони можуть зіткнутися.

### 2.3 Практичне застосування доповненої реальності

Дослідження оптимального розміщення об'єктів в застосунках доповненою реальності – тема, представляюча значний інтерес в області комп'ютерних наук, особливо в контексті доповнення сцени, зокрема, метод контекстного доповнення сцени. Контекстне доповнення сцени - це метод, який припускає розміщення віртуальних об'єктів в реальній сцені таким чином, щоб це відповідало контексту і покращувало взаємодію користувача з навколишнього середовищем. Даний метод має вирішальне значення в застосунках доповненою реальності, де безшовна інтеграція віртуальних і реальних елементів має першорядне значення для занурення користувача в реальність.

Слід відзначити, що метод контекстного доповнення сцени грає важливу роль в оптимальному розміщенні об'єктів в застосунках доповненою реальності. Враховуючи контекст сцени і використовуючи передові методи машинного навчання, цей метод дозволяє створювати захоплюючі і реалістичні враження від доповненою реальності. Однак залишаються невирішені завдання, особливо в області оцінки пози і сценаріїв розміщення кількох об'єктів.

У останні роки мобільна доповнена реальність отримала значне розвиток, причому основне увага приділяється покращення взаємодії користувача з віртуальними об'єктами в фізичному світі. Розміщення цих віртуальних об'єктів має вирішальне значення для користувальницького досвіду і може змінюватись в залежності від цілей програми. Розглянемо деякі практичні сценарії і випадки, ілюструючи важливість і оптимізацію розміщення віртуальних об'єктів у мобільних AR-застосунках.

Туризм та навігація. Використання AR в туризмі і навігації стало помітним досягненням в цю галузь. Тепер туристи можуть досліджувати місто з допомогою віртуальних орієнтирів та покажчиків, накладених на реальне оточення. Однак тут дуже важливо оптимальне розміщення; наприклад, занадто високо або занадто низько розташований віртуальний покажчик може викликати дискомфорт у користувача. У якості прикладу можна привести застосунок "AR City" (рисунок 2.4), в якому віртуальні об'єкти стратегічно розташовані на рівні око і коригуються в залежності від відстані користувача від об'єкта, забезпечуючи більше зручну та інтерактивну навігацію [4].



Рисунок 2.4 – Інтерфейс програми AR City

Роздрібна торгівля та електронна комерція. Сектори роздрібний торгівлі і електронної комерції також прийняли технологію AR, причому компанії використовують її для покращення досвіду онлайн-покупок. Наприклад, компанія ІКЕА в своєму застосунку ІКЕА Place дозволяє користувачам візуалізувати меблі в будинку, раніше чим здійснити покупку. Розміщення віртуальних об'єктів в цьому сценарії повинно бути точним, щоб дати користувачеві реалістичне подання о тому, як меблі впишеться в його простір (рисунок 2.5). Тому застосунок використовує камеру і датчики пристрою, щоб зрозуміти розміри кімнати і оптимально розмістити віртуальну меблі, враховуючи такі фактори, як розмір, орієнтація та умови освітлення.

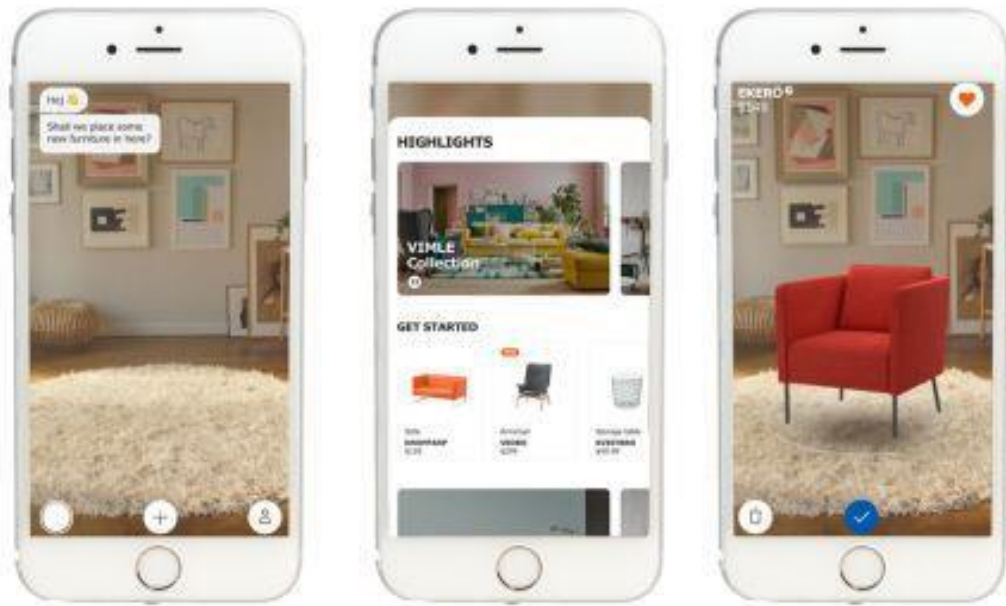


Рисунок 2.5 – Інтерфейс програми ІКЕА Place

Освіта та навчання. AR знайшов своє місце в освіті і навчання, забезпечуючи інтерактивний і імерсивний досвід навчання. Наприклад, застосунок для вивчення мови Mondly використовує AR для покращення вивчення мови з допомогою віртуальних персонажів і об'єктів. Оптимальне розміщення цих об'єктів необхідно для взаємодії, залучення і уникнення відволікаючих факторів. Тут об'єкти зазвичай розміщуються на зручному відстані для перегляду, з обліком концентрації та стійкості уваги учня, що можна побачити на рисунку 2.6.



Рисунок 2.6 – Інтерфейс програми Mondly

Охорона здоров'я і медицина. У охороні здоров'я AR використовується для навчання медичних працівників і надання допомоги при проведенні складних процедур. Наприклад, для ефективного наведення віртуальне зображення повинно точно збігатися з реальними венами пацієнта. Тому оптимальне розміщення в даному випадку досягається поєднанням технології відстеження в реальному часі і проектування зображення (рисунок 2.7).



Рисунок 2.7 – Приклад роботи застосунку Accu Vein

Обслуговування та ремонт. AR також знаходить застосування в завданнях технічного обслуговування і ремонту. Такі програми, як Vuforia Chalk, дозволяють експертам спрямовувати новачків при виконанні завдань з допомогою AR-анотацій. Розміщення цих анотацій має вирішальне значення для ефективного керівництва, і вони зазвичай прикріплюються до певних частин обладнання в полі зору користувача (рисунок 2.8).

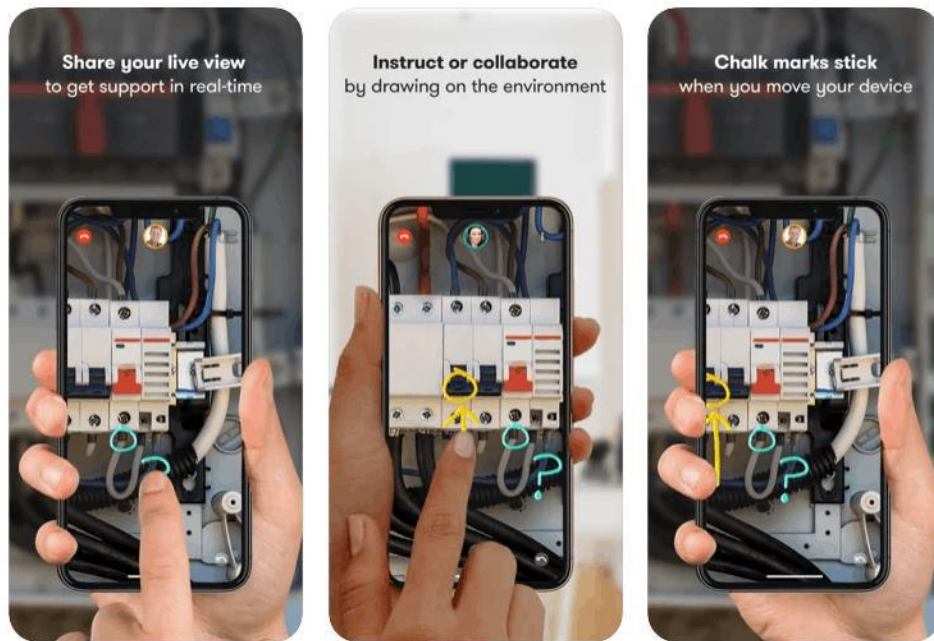


Рисунок 2.8 – Приклад анотування технічних засобів в Vuforia Chalk

Важливість оптимального розміщення віртуальних об'єктів в цих сценаріях вказує на необхідність використання передових алгоритмів і методів для точного відстеження в реальному часу, розуміння навколишнього середовища і моделювання взаємодії з користувачем. Ці фактори у сукупності забезпечують безшовну інтеграцію віртуальних об'єктів в фізичний світ, покращують користувацький досвід та взаємодію в мобільних AR-застосунках. Наведені реальні програми демонструють, як різні галузі використовують цю технологію, і підкреслюють важливу роль оптимального розміщення об'єктів. Однак в кожному з цих застосунків виникають унікальні проблеми, що свідчить про необхідність продовження досліджень та розробок у цій області.

Отже, концепція оптимального розташування відноситься до стратегічного розташування віртуальних об'єктів, яке максимізує комфорт користувача, залученість і загальну ефективність AR-досвіду. Це припускає розміщення об'єктів на відповідному відстані від користувача, їх правильну орієнтацію по відношенню до користувачеві і реальною середовищем, а також забезпечення логічного взаємодії з реальною середовищем і один з другом.

Необхідність оптимального розташування в AR-застосунках обумовлена декількома факторами, включаючи зручність і безпека користувача, реалістичність і занурення, інтерактивність, продуктивність і ефективність, а також конкретні цілі програми. Досягнення оптимального розташування включає в себе подолання кількох проблем, таких як підтримка реалізму і узгодженості, забезпечення комфортного користувальницького досвіду, полегшення інтерактивності і оптимізація продуктивність.

Оптимальне розташування об'єктів AR є ключовим аспектом технології AR, сприятливим створенню реалістичні, комфортних і захоплюючих вражень від AR. Використовуючи можливості математики і інформатики, розробники можуть створювати AR-проекти, які не тільки переконливі і захоплюючі, але і безпечні, зручні та ефективні в використанні.

## 3 ОПТИМАЛЬНЕ РОЗТАШУВАННЯ ОБ'ЄКТІВ ДОПОВНЕНОЇ РЕАЛЬНОСТІ У СИСТЕМАХ КОМП'ЮТЕРНОГО ЗОРУ

### 3.1 Основні параметри технології доповненої реальності

Сцени доповненою реальності є фундаментальним компонентом AR-застосунків, забезпечуючи інтерфейс, через який користувачі взаємодіють з віртуальними елементами, накладними на їх реальне оточення. AR-сцена - це, по суті, цифрове подання фізичного світу, доповнене віртуальними об'єктами, які можуть взаємодіяти з користувачем та друг з другом у режимі реального часу. Вона служить основою, на яку накладаються віртуальні об'єкти та контекстуалізується взаємодія користувача з цими об'єктами.

Початкова сцена зазвичай знімається з допомогою камери і інших датчиків на мобільному пристрої. Камера надає візуальні дані, а датчики, такі як акселерометри, гіроскопи і, в деяких випадках, датчики глибини, надають застосункову інформацію о становищі пристрої, його орієнтації та просторовому розташування навколишнього середовища.

Після захоплення вихідна сцена обробляється для створення цифрового уявлення, часто в вигляді 3D-карти або хмари точок. Це включає в себе ідентифікацію і відстеження характерних особливостей навколишнього середовища, таких як краї, кути або текстуровані поверхні. Ці особливості, представлені в вигляді точок на 3D-картка, дають системі AR набір опорних точок, які вона може використовувати для суміщення віртуального і реального світів. Початкова сцена не є статичної, вона постійно оновлюється по мірі переміщення користувача або змін в навколишнього середовище. Це динамічний оновлення має вирішальне значення для підтримки відповідності між віртуальним та реальним світом, забезпечуючи правильне розташування віртуальних об'єктів у реальному світі навіть за зміни перспективи користувача.

Концепція початкової сцени є основною для технології AR. Захоплюючи і аналізуючи її системи AR можуть створювати захоплюючі враження, в яких віртуальні об'єкти органічно поєднуються з реальним оточенням користувача.

Створення AR-сцени починається з захоплення реального оточення з допомогою датчиків, вбудованих в пристрій користувача (наприклад, смартфон або AR-окуляри). Ці датчики зазвичай включають камеру для візуального введення, акселерометри і гіроскопи для визначення руху, а іноді і датчики глибини для більше точного просторового відображення. Дані, зібрані цими датчиками, обробляються для створення тривимірної карти навколишнього середовища, яка служить основою для AR-сцени.

Одним з ключових аспектів AR-сцен є їх динамічна природа. На відмінність від статичних сцен у традиційній 3D-графіці, AR-сцени повинні адаптуватися у реальному часу до змін у навколишньому середовищі та перспективи користувача. Ця динамічність регулюється набором параметрів, які визначають поведінка AR-сцени та її віртуальних об'єктів. Одним з таких параметрів є становище і орієнтація пристрою користувача, також відома як поза пристрою. Поза постійно оновлюється на основі даних датчиків, щоб AR-сцена точно відображала точку зору користувача. Якщо користувач переміщає або повертає своє пристрій, AR-сцена повинна відповідним чином коригуватися, щоб підтримувати ілюзію того, що віртуальні об'єкти є частиною реального світу.

Іншим важливим параметром є масштаб AR-сцени, який визначає розмір віртуальних об'єктів щодо реального світу. Масштаб повинен бути ретельно відкалібрований, щоб віртуальні об'єкти відображалися в правильному розмірі з крапки зору користувача. Для цього часто потрібні складні розрахунки, враховують розмір екрану пристрою, параметри камери і відстань до око користувача.

Умови освітлення – ще один динамічний параметр, який може сильно вплинути на реалістичність AR-сцени. Аналізуючи навколишнє освітлення в

середовищі користувача, AR-застосунки можуть регулювати освітлення віртуальних об'єктів в відповідно з реальним світом, роблячи їх більше природними та переконливими. Слід відзначити, що AR-сцени представляють собою складну суміш реальних і віртуальних елементів, керовану набором динамічних параметрів, які забезпечують безшовні і інтерактивний користувальницький досвід. Розуміння цих параметрів і того, як вони впливають на поведінку AR-сцен, має вирішальне значення для розробки ефективних і захоплюючих AR- застосунків.

### 3.1.1 Концепт віртуальної 3D-карти

Віртуальна 3D-карта – це цифрове подання фізичної середовища, створене і використовуване в контексті застосунків доповненою реальності. Ця карта служить базовим шаром, на якому розміщуються віртуальні об'єкти і відбувається взаємодія з ними, створюючи ефект занурення, визначальний AR.

Створення віртуальної 3D-карти починається зі збору даних о фізичному оточенні. Зазвичай для цього використовується камера і інші датчики мобільного пристрої. Камера фіксує візуальні дані, а датчики глибини надають інформацію о відстані до різних точок в навколишнього середовища. Усі ці дані використовуються для побудови 3D-моделі фізичного простору (рисунок 3.1).

Ця 3D-модель представляє собою хмару точок – набір точок даних в тривимірній системі координат. Кожна точка в хмарі представляє собою точку в фізичної середовищі, а її становище щодо інших точок точно відображає просторові відносини в реальному світі. Таким чином, хмара точок представляє собою докладну і точну 3D-карту навколишнього середовища.

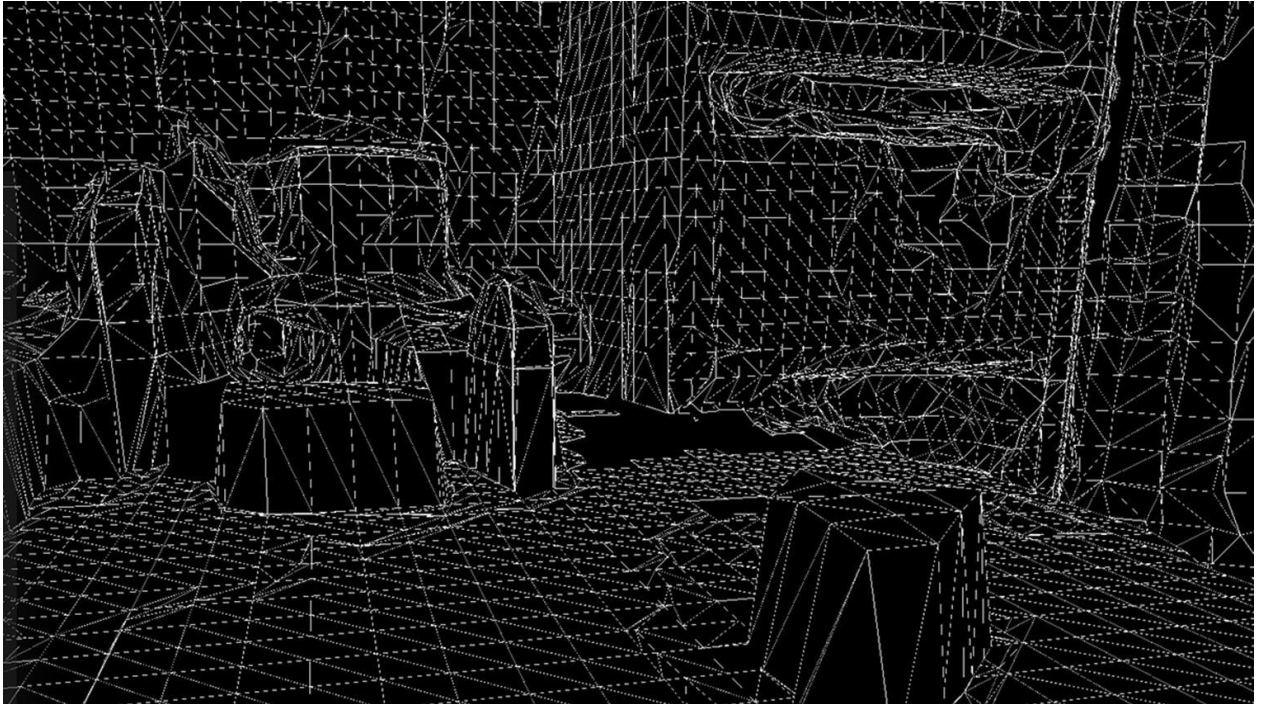


Рисунок 3.1 –Каркасна віртуальна карта простору

Після створення віртуальною 3D-карти її можна використовувати для накладення віртуальних об'єктів на реальну місцевість. Це досягається з допомогою процесу, відомого як реєстрація. При реєстрації AR-система вирівнює віртуальну 3D-карту з реальною середовищем, забезпечуючи правильне розташування віртуальних об'єктів при перегляді через камеру пристрої.

AR-система постійно оновлює реєстрацію при русі користувача, використовуючи дані датчиків для відстеження змін в становищі і орієнтації пристрої. Це дозволяє коригувати AR-сцену в режимі реального часу, підтримуючи ілюзію того, що віртуальні об'єкти є частиною реального світу.

У результаті концепція віртуальної 3D-карти займає центральне місце в функціонуванні AR-застосунків. Створюючи докладне цифрове подання фізичної середи і точно накладаючи його на реальну місцевість, AR-системи можуть створювати захоплюючі враження, які органічно поєднують віртуальний та реальний світи.

### 3.1.2 Хмара характерних точок

У сфері доповненої реальності віртуальна карта – це цифрове подання реальною середовища. Однією з найбільш поширених форм такого представлення є хмара точок – набір точок даних в тривимірній системі координат. Ці точки, що зветься характерними точками, представляють собою окремі особливості навколишнього середовища, які система AR може розпізнавати та відстежувати.

Точки-характеристики зазвичай визначаються з допомогою методів обробки зображень, застосовуваних до даними, знятим камерою пристрої. Ці методи шукають області високою контрастності або унікальні візерунки на зображення, такі як краю об'єктів, кути або текстуровані поверхні. Потім обчислюються просторові координати цих особливостей і зберігаються в вигляді точок у хмарі. Кожна точка в хмарі точок несе інформацію о своєму становищі в тривимірному просторі і часто застосункові дані, такі як колір або вектор нормалі. Колекція цих точок створює розріджене подання середовища, яке відбиває її суттєву структуру (рисунок 3.2).

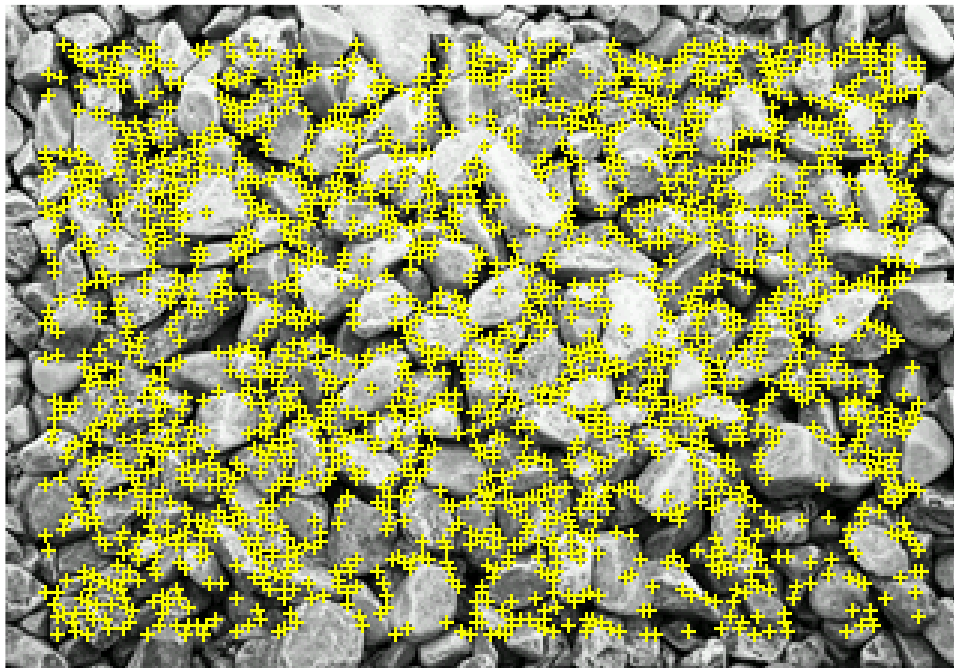


Рисунок 3.2 – Візуалізація хмари характерних точок

Хмара точок служить основою для AR-сцени. Слідкуючи за положенням та орієнтацією цих точок в реальному часу, AR-система може зрозуміти, як змінюється перспектива користувача. Це дозволяє системі відповідним чином коригувати становище і орієнтацію віртуальних об'єктів в AR-сцені, створюючи ілюзію, що вони прив'язані до реального світу.

Більше того, хмара точок може бути використана для створення більш детальної 3D-моделі навколишнього середовища, якщо це необхідно. З допомогою процесу, відомого як реконструкція поверхні, система AR може оцінити форму поверхонь в навколишньому середовищі на основі розподілу характерних точок. Це може підвищити реалістичність AR-досвіду, дозволяючи віртуальним об'єктам взаємодіяти з навколишнім середовищем більш складними способами, наприклад, відкидати реалістичні тіні або відбиватися від поверхонь.

### 3.1.3 Використання сенсорів мобільних пристроїв

Створення сцен доповненою реальності – це складний процес, який в значною ступеня залежить від можливостей сучасних мобільних пристроїв. Ці пристрої оснащені різними датчиками, які в режимі реального часу збирають дані про навколишнього середовища і переміщення користувача. Потім ці дані обробляються і використовуються для побудови та оновлення AR-сцени.

Одним з основних датчиків, використовуваних в цьому процесі, є камера пристрої. Камера захоплює візуальні дані з навколишнього середовища, які використовуються для створення цифрового уявлення реального світу. Це подання служить тлом для AR-сцени. Камера також грає важливу роль в відстеженні положення та орієнтації пристрої в просторі, цей процес відомий як оцінка пози. Крім камери, для відстеження рухів пристрої використовуються датчики руху, такі як акселерометри і гіроскопи. Акселерометр вимірює лінійне прискорення пристрої, а гіроскоп - його

обертальний рух. Ці датчики надають застосункові дані, які можуть підвищити точність оцінки пози, особливо в ситуаціях, коли огляд камери загороджений або умови освітлення погані.

Деякі AR-системи також використовують датчики глибини для створення більш точної 3D-карти навколишнього середовища. Датчики глибини, наприклад, використовувані в сканері LiDAR компанії Apple, випромінюють інфрачервоний світло і вимірюють час, необхідне для відображення світла після влучення на об'єкт. Ця інформація о часу прольоту може бути використана для розрахунку відстані до об'єкта, що дозволяє AR-системі створити докладну карту глибини навколишнього середовища. Після отримання даних з датчиків вони обробляються AR-системою для створення і оновлення AR-сцени. Для цього використовуються складні алгоритми обробки зображень, злиття датчиків і 3D-рендерінг. Кінцевим результатом є динамічна AR-сцена, яка реагує на рух користувача та зміни в навколишньому середовищі в режимі реального часу.

Слід відзначити, що створення AR-сцен – це складний процес, використовує передові сенсорні можливості сучасних мобільних пристроїв. Отримуючи і обробляючи дані з навколишнього середовища в режимі реального часу, системи AR можуть створювати захоплюючі і інтерактивні враження, які поєднують реальний та віртуальний світи.

#### 3.1.4 Доповнена реальність в приміщенні та на вулиці

Технологія доповненою реальності здатна змінити нашу взаємодію з навколишнім світом, забезпечуючи захоплюючий досвід, поєднуючи фізичну та цифрову сфери. Ці враження можуть суттєво відрізнитися в залежності від середовища, в якій вони застосовуються, причому AR в приміщенні та на вулиці представляють собою різні проблеми та можливості.

AR-експерименти в приміщеннях часто мають на увазі більш контрольоване середовище, що може спростити деякі аспекти реалізації AR.

Наприклад, умови освітлення в приміщеннях зазвичай більше стабільні, що знижує складність візуалізації реалістичних віртуальних об'єктів.

AR в приміщенні також може використовувати існуючу інфраструктуру для підвищення точності. Наприклад, системи позиціонування в приміщеннях можуть надавати точні дані о місцезнаходження, а плани будівель можуть використовуватися для створення докладних 3D-карт навколишнього середовища [15]. Це дозволяє створювати складні AR-застосунки, такі, як навігація всередині приміщень або віртуальні екскурсії по музеям та галереям.

Але близьке розташування стін і інших об'єктів може ускладнити розміщення віртуальних об'єктів без оклюзії. Крім того, внутрішнє середовище часто містить більше детальні текстури і візерунки, що може підвищити обчислювальну складність обробки зображень та оцінки пози. З іншого боку, AR-експерименти на відкритому повітрі пропонують більше широке і динамічне полотно для AR-застосунків. Це може дозволити реалізувати такі цікаві сценарії використання, як віртуальні екскурсії по місту, ігри на свіжому повітрі або AR-навігація.

Зовнішнє середовище також надає більше простору для розміщення та взаємодії віртуальних об'єктів, що потенційно може призвести до більш захоплюючого досвіду. Використання GPS та інших систем глобального позиціонування може дати приблизну оцінку розташування користувача, що допомагає розміщувати AR-контент.

Однак AR на відкритому повітрі представляє свій власний набір проблем. Великі масштаби зовнішній середовища можуть утруднити створення точних 3D-карт, а мінливість умов зовнішнього освітлення може ускладнити візуалізацію віртуальних об'єктів. Дані GPS також можуть бути менше точними в міських умовах через ефекту "міського каньйону", коли сигнали блокуються або відбиваються від будівель [16].

Отже, що AR-простір як в приміщенні, так і на відкритому повітрі пропонує захоплюючі можливості, але в той же час ставить різні технічні

завдання. Розуміння цих відмінностей має вирішальне значення для розробки ефективних і захоплюючих AR-застосунків.

### 3.2 Сутність віртуального об'єкту та його властивості

У застосунках доповненою реальності віртуальні об'єкти – це цифрові об'єкти, які накладаються на реальне оточення. Щоб ці об'єкти виглядали реалістично і взаємодіяли з навколишнього середовищем і користувачем належним чином, вони повинні бути визначено набором параметрів, які визначають їх поведінка та зовнішній вигляд.

Найбільш фундаментальними параметрами віртуального об'єкта є його становище і орієнтація в просторі, часто звані позою. Становище зазвичай визначається набором координат в тривимірному просторі, а орієнтація – матрицею обертання або набором кутів Ейлер. Ці параметри визначають, де об'єкт з'являється в AR-сцені та в якому напрямку він звернений.

Розмір або масштаб віртуального об'єкта – ще один найважливіший параметр. Він визначає, наскільки великим буде об'єкт в AR-сцена. Масштаб повинен бути ретельно відкалібрований, щоб забезпечити правильний розмір об'єкта щодо реального оточення та інших віртуальних об'єктів.

Параметри матеріалу і текстури визначають зовнішній вид поверхні об'єкта. Властивості матеріалу визначають, як об'єкт взаємодіє зі світлом, впливаючи на його колір, блиск, прозорість і інші візуальні Показники. Текстура - це зображення або візерунок, який наноситься на поверхню об'єкта, надаючи йому детальний вид, що імітує справжні матеріали.

Для більше просунутих AR-застосунків віртуальні об'єкти можуть також визначатися набором фізичних властивостей, які регулюють їх взаємодія з навколишнього середовищем і іншими об'єктами. Вони можуть включати такі параметри, як маса, тертя і пружність, які визначають, як об'єкт рухається, стикається з іншими об'єктами або реагує на такі сили як гравітація.

Зрештою, якщо віртуальний об'єкт анімований або має рухомі частини, він також буде визначатися набором параметрів анімації. Вони можуть включати ключові кадри, інформацію о ригінге і інші дані, які керують рухом об'єкта во часу. Параметри віртуальних об'єктів в AR мають вирішальне значення для створення реалістичного і інтерактивного досвіду [5]. Ретельно визначаючи і керуючи цими параметрами, розробники можуть створювати віртуальні об'єкти, які органічно поєднуються з реальним світом, посилюючи почуття занурення і залучення користувача.

### 3.2.1 Вектор об'єктів

У доповненій реальності розміщення і орієнтація віртуальних об'єктів в реальною середовищі мають вирішальне значення для створення переконливого і інтерактивного досвіду AR. Одним з ключових понять, використовуваних при визначенні орієнтації цих об'єктів, є поняття векторів. Вектор в контексті AR – це спрямований вектор для орієнтації віртуального об'єкта в просторі AR-сцени. Зазвичай використовуються три ортогональних бічних вектори: вектор вгору, вектор праворуч і вектор вперед.

Вектор Up: Цей вектор спрямований в напрямі, яке вважається "вгору" для об'єкта. Зазвичай він вирівнюється з напрямом гравітації в реальному світі, що забезпечує вертикальне становище об'єкта з крапки зору користувача.

Вектор Right: Цей вектор вказує на "праву" бік об'єкта, перпендикулярно векторів "вгору" і "вперед". Він визначає горизонтальну орієнтацію об'єкта.

Вектор Forward: Цей вектор спрямований у той бік, куди звернено об'єкт. Він перпендикулярний векторів вгору і праворуч, завершуючи набір ортогональних векторів, визначальних орієнтацію об'єкта.

Ці бічні вектори важливі, оскільки вони дозволяють системі AR правильно орієнтувати віртуальний об'єкт в тривимірному просторі AR-

сцени, незалежно від перспективи користувача або орієнтації пристрої. Постійно оновлюючи ці вектори на основі даних датчиків пристрої, AR-система може гарантувати, що об'єкт зберігає правильну орієнтацію при переміщенні користувача (рисунок 3.3).

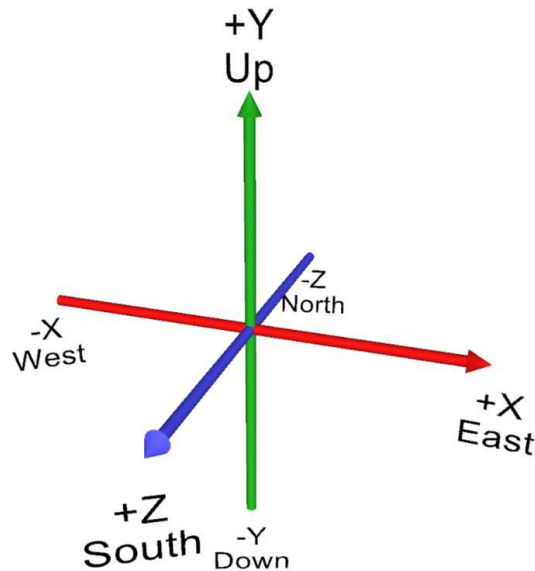


Рисунок 3.3 – Представлення 3D-вектора

Слід відзначити, що бічні вектори – це фундаментальна концепція 3D-розробки, яка дозволяє правильно орієнтувати віртуальні об'єкти. Розуміючи і ефективно використовуючи ці вектори, розробники можуть створювати AR-досвід, в якому віртуальні об'єкти виглядають природно існуючими в реальному середовищі.

### 3.2.2 Лінійні розміри об'єктів

У сфері доповненої реальності створення віртуальних об'єктів, органічно що поєднуються з реальним середовищем, є найважливішим аспектом. Одним з ключових параметрів, сприятливих реалістичності і функціональності цих віртуальних об'єктів, є їх лінійні розміри, які зазвичай визначаються в термінах довжини, ширини і висоти в тривимірному просторі AR-сцени.

Фундаментальним принципом багатьох AR-систем є еквівалентність однієї одиниці в AR-сцена одному метру в фізичному світі. Ця еквівалентність одиниці і метра є стандартним угодою, яке допомагає забезпечити послідовність та реалістичність в поданні віртуальних об'єктів.

Коли віртуальний об'єкт проектується за допомогою 3D-моделювання, його розміри визначаються в довільних одиницях. Однак, коли цей об'єкт імпортується до AR-сцени, система інтерпретує ці одиниці як метри. Тому віртуальний об'єкт заввишки 1 одиниця буде відображатися в AR-сцені як заввишки 1 метр.

Така еквівалентність одиниць і метрів має кілька переваг.

По-перше, це спрощує процес проектування віртуальних об'єктів в масштабі, так як дизайнери можуть безпосередньо використовувати реальні вимірювання.

По-друге, це гарантує, що віртуальні об'єкти будуть мати правильний розмір при перегляді через AR-систему, що підвищує реалістичність AR-досліду (рисунок 3.4).

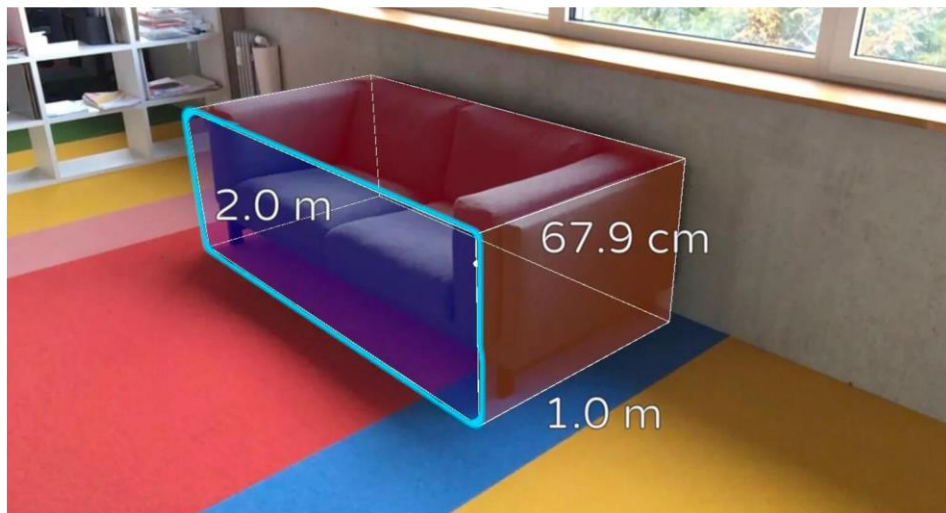


Рисунок 3.4 – Приклад вимірювання фізичних об'єктів

Крім того, еквівалентність одиниць вимірювання грає важливу роль во взаємодії між віртуальними об'єктами і реальним світом. Наприклад, вона дозволяє AR-системі точно визначити, чи поміститься віртуальний об'єкт в

певному просторі реального світу, або як їм повинен маніпулювати Користувач.

Таким чином, лінійні розміри віртуальних об'єктів, обумовлені в відповідно з еквівалентом одиниці вимірювання, є фундаментальним аспектом технології AR. Точно визначаючи і підтримуючи ці розміри, системи AR можуть створювати реалістичний і інтерактивний досвід, який посилює залучення та занурення користувача до віртуального світу.

### 3.3 Концепт оптимальної перцептивної відстані

У доповненій реальності центральне увага приділяється не тільки розташуванню об'єктів щодо користувача, але і їх взаємному становищу в просторі. Це забезпечує гармонійне поєднання віртуальних елементів з реальним світом, виключаючи візуальне перекриття і підтримуючи цілісність сприйняття. Під зоною просторової нейтральності або "дельта-відстанню" розуміється буферне простір, мінімізуюче ризик накладення віртуальних і фізичних об'єктів. Ця концепція сприяє утримання віртуальних об'єктів в межах безпечного і видимого простору, уникаючи створення ситуацій, які можуть порушити плавність і реалізм AR-досвіду або представляти небезпека для користувача. Принцип дельта-відстаней, зі своєю сторони, спрямований на визначення ідеального проміжок між об'єктами, щоб максимізувати зручність сприйняття і інтерактивність. Це відстань варіюється в залежності від контексту використання та характеристик віртуальних об'єктів, забезпечуючи кожному елементу достатньо місця для взаємодії без ризику конфлікту або дискомфорту. Термін «просторова узгодженість сприйняття», що вводиться – підкреслює важливість відповідності між віртуальними і реальними об'єктами для створення одноманітного сприйняття простору. Дана узгодженість може бути кількісно визначена через оптимальне перцептивне відстань, що передбачає оптимальну відстань чи розташування віртуальних об'єктів щодо

користувача і інших об'єктів в фізичному просторі, що забезпечує найкраще сприйняття та взаємодія без виклику дискомфорту, порушення ілюзії присутності або візуальної навантаження. Розробка ефективного AR-досвіду вимагає інтеграції цих принципів: врахування просторового розмежування і оптимального розташування об'єктів. Такий підхід дозволяє створювати інтуїтивно зрозумілі, безпечні і візуально привабливі віртуальні середовища, сприяючі природному взаємодії користувача з доповненою реальністю.

### 3.3.1 Віртуальна модель в контексті розроблюваного концепту

Для досягнення найкращого користувальницького досвіду у доповненій реальності критично важливо забезпечити оптимальну відстань між віртуальними об'єктами і користувачем. Це відстань повинно бути визначено таким чином, щоб максимізувати зручність сприйняття і мінімізувати потенційний дискомфорт. У доповнення до цього необхідно забезпечити просторову узгодженість сприйняття, гарантуючи, що віртуальні об'єкти гармонійно інтегруються в реальне оточення, зміцнюючи тим самим загальне враження від присутності в доповненою реальності. Використання цих принципів в сукупності дозволяє створити ефективні і естетично приємні AR-сценарії, покращена взаємодія користувача з віртуальними елементами. Для побудови математичної моделі пропонується прийняти нижчезазначені необхідні фактори для віртуально розташованих об'єктів:

- тривимірні лінійні розміри (довжина, ширина, висота);
- зона просторової нейтральності навколо об'єкта, сприятлива позитивному досвіду взаємодії користувача з об'єктом.

Щоб окреслити межі віртуального об'єкта доповненою реальності, вбудовуємо його в кубічну структуру, центровану відповідно до початку координатної сітки (0, 0, 0) (рисунок 3.5).

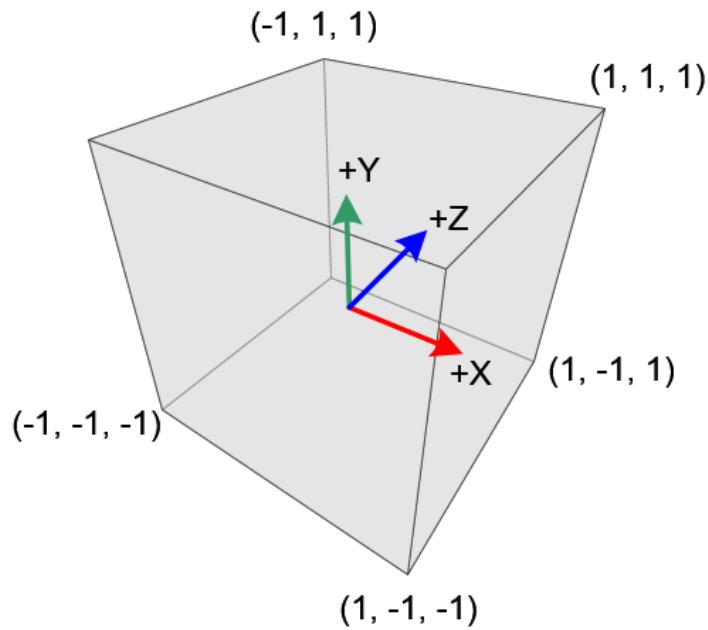


Рисунок 3.5 – Вектори для трансформації об'єктів

Передбачається, що вісь  $X$  відображає бічні зміщення об'єкта праворуч (додатний напрямок) і вліво (від'ємний напрямок). Відповідно, вісь  $Y$  ілюструє вертикальні зміщення об'єкта вгору (додатний напрямок) і вниз (від'ємний напрямок). Ось  $Z$ , тим часом, позначає поздовжні переміщення об'єкта, або видаляються від користувача (додатний напрямок), або наближення до нього (від'ємний напрямок).

### 3.3.2 Зона просторової нейтральності в математичній моделі

У процесі розробки застосунку доповненої реальності розробник часто візуалізує сценарій використання, в якому віртуальний об'єкт позиціонується на горизонтальною поверхні, такий як стіл або підлогу. Щоб забезпечити безперервне взаємодія з користувачем, критично важливо, щоб доступ до цього об'єкту був забезпечений з передньої сторони. Ідеально, якби користувачі мали можливість оглядати об'єкт з різних точок зору, включаючи вид зверху. Для структурованого опису характеристик об'єкта та гарантії його комплексного сприйняття була розроблена програмна модель, детально

відбиваюча ці атрибути. Приклад такої моделі, як це може виглядати для розробника, демонструється в формі таблиці (таблиця 3.1).

Таблиця 3.1 – Параметри дельта-відстаней моделі

Вектор (сторона)	Пріоритет	Розмір (м)
Праворуч, +X	Середній	0.5
Ліворуч, -X	Середній	0.5
Вгору +Y	Середній	0.5
Вниз, -Y	Низький	0
Вперед +Z	Високий	1
Назад, -Z	Середній	0.5

Дана таблиця представляє собою упорядковане опис віртуального об'єкта, згаданого вище. Для застосункового уточнення і підвищення точності введені три категорії пріоритетів, відбивають важливість кожною сторони об'єкта в контексті користувальницького взаємодії. З обліком глибокого розуміння геометрії об'єкта і передбачуваних сценаріїв використання, були визначено точні параметри для ширини просторово-нейтральний зони для кожною сторони.

При аналізі результатів стало очевидно, що нижня сторона об'єкта має мінімальне значення. Це визначення пов'язано з тим, що об'єкт розташований на горизонтальною площині, що робить нижню бік практично невидимою для користувача. І навпаки, передній боці сцени був привласнений найвищий пріоритет. Як наслідок, необхідно виділити максимальну кількість вільного простору вздовж цього вектору, щоб забезпечити безперешкодний огляд та взаємодію з об'єктом (рисунок 3.6).

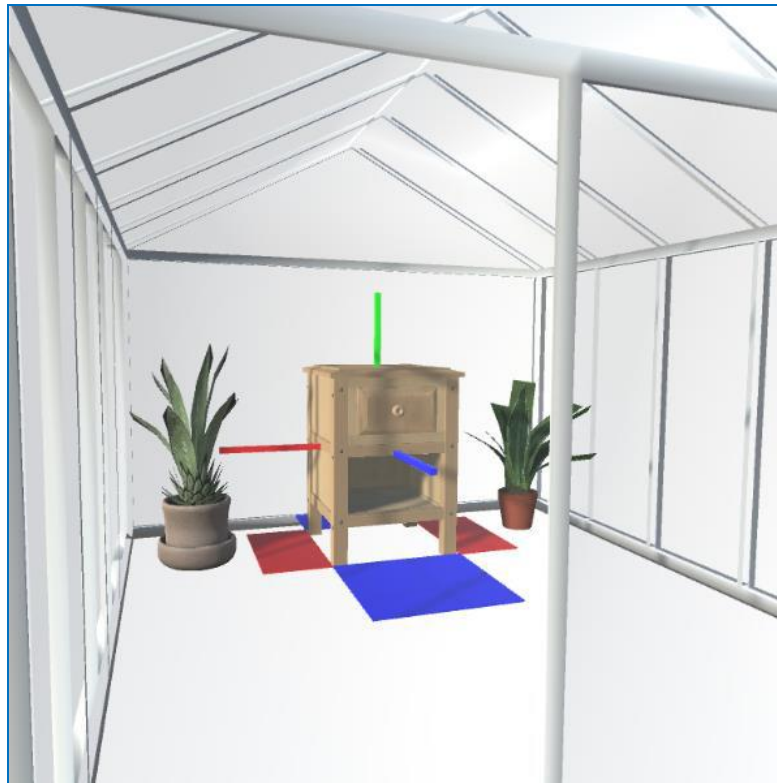


Рисунок 3.6 – Візуалізація установки об'єкта з урахуванням зон просторової нейтральності

Слідуючи цьому підходу, була створено надійна основа для проектування і реалізації AR-застосунку. Це дозволяє оптимізувати користувальницький досвід шляхом стратегічного розподілу пріоритетів між різними сторонами віртуального об'єкту.

### 3.3.3 Критерій оптимальності

Для забезпечення користувачів ефективними підказками і рекомендаціями по організації віртуальної сцени в інтерфейсі, критично важливо провести аналіз даних, що надходять від датчиків мобільного пристрою, про віртуальні площин. Ці дані слід зіставити з габаритами об'єктів доповненої реальності і асоційованими з ними буферними зонами за низкою критеріїв.

Перший критерій, що позначається як K1, визначає попередні умови для розміщення віртуального об'єкта. Він є необхідною умовою для

виконання наступного завдання оптимізації розміщення. Для того щоб установка об'єкта була можлива, лінійні розміри доступного фізичного простору повинні перевищувати або дорівнювати розмірам об'єкта, що розміщується. Ця попередня умова може бути сформульована через такі співвідношення для кожної з осей:

$$K_{1X} = \frac{X_0}{X_P} \leq 1; \quad K_{1Y} = \frac{Y_0}{Y_P} \leq 1; \quad K_{1Z} = \frac{Z_0}{Z_P} \leq 1, \quad (3.1)$$

де  $X_0$  та  $Z_0$  представляють лінійні розміри (ширину та глибину відповідно) віртуального об'єкта;  $X_P$  та  $Z_P$  є лінійними розмірами (шириною та глибиною, відповідно) доступної площини у просторі;  $Y_0$  позначає лінійний розмір висоти об'єкта, а  $Y_P$  представляє доступну висоту у фізичному просторі.

Другий критерій, що позначається як  $K_2$  є критерієм оптимальності, який оцінює, наскільки обсяг вільного простору навколо віртуального об'єкта відповідає встановленому розробником параметру просторової нейтральності. Для наочності розглянемо формування критерію  $K_2$  на прикладі осі  $X$  (з аналогічним застосуванням до інших осей). Відстань до об'єкта, віднормована на зону просторової нейтральності, називатимемо перцептивною відстанню. Тоді перцептивна відстань  $K$  у правій частині заданого макету об'єкта може бути визначена таким чином:

$$K_+(X_+, D_+) = \begin{cases} \frac{X_+}{D_+}, & \text{якщо } X_+ < D_+; \\ 1, & \text{якщо } X_+ \geq D_+, \end{cases} \quad (3.2)$$

де  $X_+$  є фактичною відстанню по осі  $x$  від краю об'єкта до правого краю площини сканування, а  $D_+$  позначає задану буферну відстань для досліджуваного об'єкта. Перцептивна відстань з лівого боку може бути визначена аналогічним чином (3.3):

$$K_-(X_-, D_-) = \begin{cases} \frac{X_-}{D_-}, & \text{якщо } X_- < D_-; \\ 1, & \text{якщо } X_- \geq D_-, \end{cases} \quad (3.3)$$

Ідеальна перцептивна відстань по осі  $X$  може бути досягнута, якщо виконується така умова;

$$K_-(X_-, D_-) = K_+(X_+, D_+) = 1, \quad (3.4)$$

хоча це не завжди можливо. Якщо виконано умову

$$X_P - D_+ - D_- < X_0 < X_P, \quad (3.5)$$

то розмір об'єкта менше розміру області, в яку цей об'єкт вбудовується, але разом з обома зонами комфорту він туди вже не поміщається.

Для досягнення збалансованої взаємодії та виключення ситуацій, коли збільшення відстані, з одного боку, призводить до зменшення його з протилежної, введемо таку цільову функцію:

$$K_2 = (K_- - K_+)^2. \quad (3.6)$$

Оптимальним вважається таке розміщення, яке мінімізує цю функцію. Очевидно, що мінімум  $K_2$  досягається при виконанні такої умови:

$$K_- = K_+ \quad (3.7)$$

Це співвідношення є критерієм оптимальності. Перцептивні відстані  $K_-$  і  $K_+$ , що задовольняють рівнянню 3.7, є оптимальними перцептивними відстанями (ОПВ).

Нехай  $X_P$  – лінійний розмір доступного вільного простору,  $X_0$  – лінійний розмір об'єкта вздовж обраної осі,  $L - l$  – довжина вільного

простору. Тоді із критерію оптимальності (3.7) можна розрахувати оптимальне розміщення об'єкта по даній осі:

$$X_- = (L - l) \cdot \frac{D_-}{D_+ + D_-}; \quad (3.8)$$

$$X_+ = L - X_- = (L - l) \cdot \frac{D_+}{D_+ + D_-}. \quad (3.9)$$

Аналогічний розрахунок виконується для кожного вектора  $(X, Y, Z)$  у додатному (+) та від'ємному (-) напрямках.

#### 3.4 Визначення відстані між віртуальними об'єктами та границями площин

Модель оптимального позиціонування віртуальних об'єктів включає різноманітні параметри, які виступають в якості показників адекватності поточного місця розташування для віртуального контенту з урахуванням просторової узгодженості. Місце розташування вважається ідеальним, коли границі віртуального об'єкта, включаючи його буферну зону, повністю укладаються в границі просторової області.

Модель, що описується, застосовує математичні методики для оцінки розмірів просторової зони, лінійних габаритів віртуального об'єкта та обсягу вільного простору навколо нього. AR-застосунок, інтегрований з фізичним двигуном, задіює ці розрахунки для знаходження балансу між вимогами просторової гармонії та обмеженнями реального світу. Основне завдання – розробити AR-взаємодія, що максимізує ефективність розміщення віртуальних елементів у користувача. Це припущення веде до певної обчислювальної задачі: визначення простору між віртуальним об'єктом з огляду на його просторово-нейтральні зони та краями сканованої віртуальної площини, на якій здійснюється розміщення. Для цього потрібно активувати

основні функції ігрових або фізичних движків, що використовуються у розробці застосунків доповненої реальності.

### 3.4.1 Геометрія площини

Встановлення віртуальних об'єктів та сканування площини демонструють чудову паралель: і ті, й інші працюють у межах тривимірного простору. Враховуючи цей загальний розмірний ландшафт, ці об'єкти пропонують потенціал для отримання та аналізу геометричних даних, безцінного ресурсу в області AR. Такі геометричні дані дозволяють створити складну сітку, взаємозалежну структурну мережу, яка визначає форму об'єкта.

Архітектура сітки в основному складається з двох фундаментальних елементів: вершин, або наріжних точок у тривимірному просторі, та трикутників - геометричних одиниць, породжених взаємозв'язками вершин. Кожна вершина пов'язана з окремим індексом, числовим ідентифікатором, що ефективно відображає геометрію об'єкта. Трикутники, з іншого боку, виникають із зв'язків між цими індексованими вершинами. Вони в сукупності створюють видиму поверхню 3D-об'єкта, сприяючи сприйняттю масивності та форми віртуального об'єкта.

Особливу увагу слід приділяти складній геометрії віртуальних площин, створених бібліотекою AR без маркерів. У якості інструментів для аналізу обрані бібліотека ARKit і її оболонка ARFoundation. ARKit славиться своїми потужними можливостями по створенню AR- середовища, а ARFoundation виступає в якості універсального API, спрощуючи розробку AR, надаючи загальну основу для безлічі AR-платформ. При використанні в співпраці з ігровим двигуном Unity, відомим своїм універсальним і повним набором інструментів для створення інтерактивного 3D контенту, ці ресурси утворюють грізну тріаду для розробки AR-застосунків.

Наведений для довідки рисунок 3.7 служить наочною моделлю, що ілюструє конфігурацію, окреслену шістьма вершинами, позначеними індексами від 0 до 5.

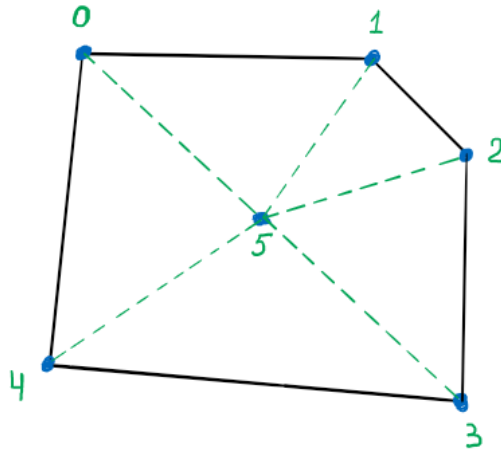


Рисунок 3.7 – Схематичне зображення віртуальної площини

Таке розташування, як на рисунку 3.7, втілює унікальні геометричні відносини, коли вершини на периферії пов'язані з центральною вершиною. Внаслідок такої конструкції виникає освіта п'яти різних трикутників. прикладами таких трикутних утворень є структури, позначаються 0-5-1, 1-5-2 і таке інше. Ці трикутники, виступаючи в якості основних одиниць сітки, створюють відчутну структуру 3D-об'єкт, формуючи сприйняття та взаємодію користувача з віртуальним об'єктом у AR-середовищі.

#### 3.4.2 Геометрія 3D об'єкту

Розглянемо сценарій, в якому віртуальний об'єкт розміщується на раніше розглянутій площині. Це розміщення візуально представлено на рисунку 3.8, який ілюструє схему виду зверху, розташовану у координатній площині XY.

На схемі віртуальний об'єкт зображений у вигляді квадрата – двовимірною представлення тривимірною об'єкту.

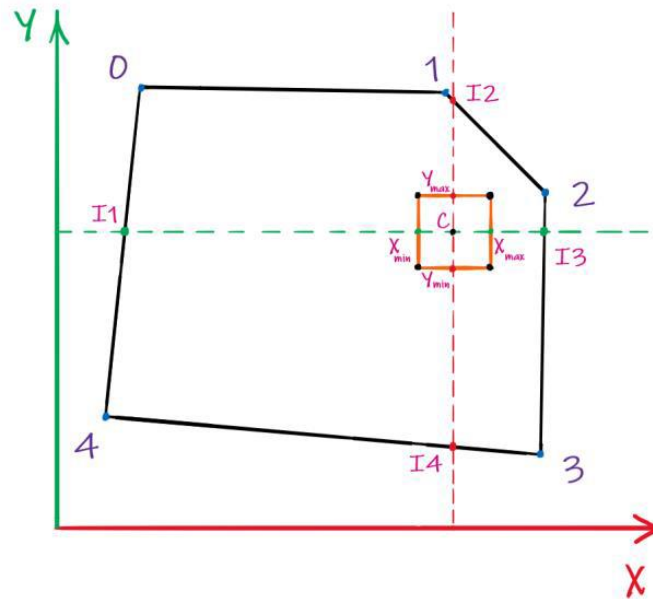


Рисунок 3.8 – Розташування віртуального об'єкта на площині

Вибір квадрата символізує концепцію "границь", принцип архітектури ігрових двигунів. Незалежно від своєї форми, кожен тривимірний об'єкт має границі. У ігрових двигунах вони часто представлені в вигляді паралелепіпеда – тривимірної геометричної фігури, грані якої представляють собою паралельні і рівні прямокутники, всередині яких знаходиться віртуальний контент. Цей метод спрощує складність тривимірної геометрії до загальнозрозумілої форми, зберігаючи при цьому важливу інформацію про форму об'єкту.

Уклавши тривимірний контент в рамки, можна отримати точні вимірювання максимальних лінійних розмірів об'єкт. Цей механізм дозволяє визначити центральну точку об'єкта, позначену на рисунку літерою "С", і наступні координати вершин, що визначають його об'ємний куб.

### 3.4.3 Опис методу рішення

Спостереження, відмічені на рисунку 3.8, допомагають сформулювати підхід до рішення поставленою завдання. Один з можливих підходів полягає в визначенні точок перетину перпендикулярів, проведених з центру

обмежуючого паралелепіпеда по координатним осям, з гранями площині сканування, позначеними як 0-1-2-3-4. Потім необхідні відстані можуть бути визначено з інтервалів  $I_1X_{\min}$ ,  $I_2Y_{\max}$ ,  $I_3X_{\max}$  та  $I_4Y_{\min}$ .

Запропоноване рішення має ряд переваг. Головною з них є його простота, що зводить завдання до елементарної геометричної вправи, яка робить обчислення менше складними. Крім того, простота алгоритму дозволяє швидко його реалізувати, що дуже цінується в бізнес-застосунках, де швидкість і ефективність часто схиляють чашу ваг в користь прийняття рішення.

Тим не менше метод не позбавлений обмежень. Його основний недолік полягає в недостатній точності розрахунків при застосуванні до приміщень неправильної форми і сканованим нішам. Для поверхонь складної форми розрахунки відстані, як правило, дають збої, не дозволяючи точно виміряти просторове ставлення об'єкта до поверхні. Яскравий приклад цього ілюструє вершина L, яка лежить значно ближче до краю поверхні, ніж  $Y_{\max}$ . Отже, фактичний вільний простір на цьому боці об'єкта необхідно розраховувати по відрізьку  $LI'2$ , як показано на рисунку 3.9.

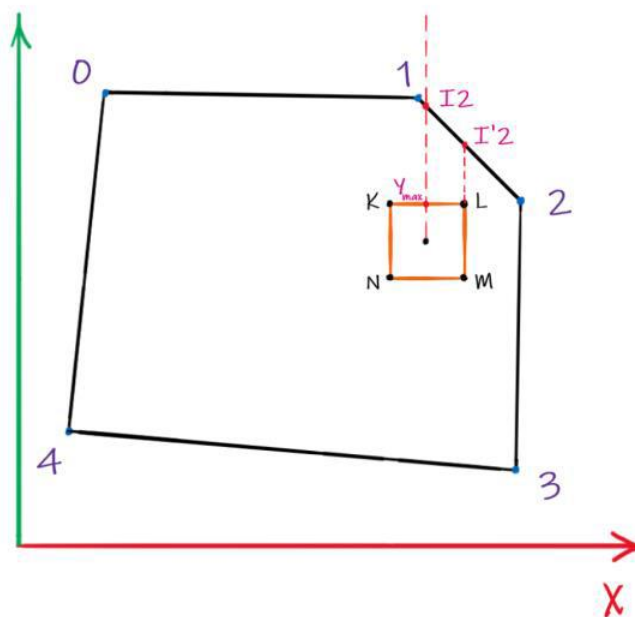


Рисунок 3.9 – Порівняння дистанцій між центральним і крайнім перпендикуляром

Тим не менше важливо відзначити, що частіше всього користувачі стикаються з прямокутними областями, для яких даний алгоритм видає точні значення відстані. Тому в рамках даного методу рішення рекомендується не звертати уваги на нестандартні поверхні. Пріоритет швидкості і простоти реалізації виправдовує цей компроміс, визнаючи, що в практичних застосунках ефективність часто перевершує ідеальну точність.

### 3.5 Метод оптимального розташування віртуальних об'єктів

Алгоритм, що використан для систематичного розташування віртуального об'єкта, в першу чергу заснований на безперервній оцінці відсканованого простору і наступному порівнянні його параметрів із заданими атрибутами віртуального об'єкта.

Послідовність дій при застосуванні даного алгоритму наведена на рисунку 3.10.

Отримані значення коефіцієнтів служать цінними індикаторами, які можуть бути використані для візуалізації підказок у користувацькому інтерфейс, а також для регулювання розміщення сцени доповненою реальності. Ілюстративне застосування цієї концепції включає в себе розфарбовування простору навколо моделі, в зокрема областей, вирівняних за напрямками векторів. Ця схема забарвлення може бути досягнуто шляхом використання червоно-зеленого градієнта, який змінюється в залежності від наявності незайнятою ніші, що підходить для установки AR-об'єкт.

Завдяки такому систематичному підходу користувачі отримують візуальне подання о просторової придатності для розміщення об'єкта, що покращує їх розуміння планування віртуальною сцени. Використовуючи оцінку алгоритмом відсканованого простору і порівняння зі властивостями віртуального об'єкта, можна досягти більше інтуїтивного і оптимізованого сприйняття доповненою реальності.

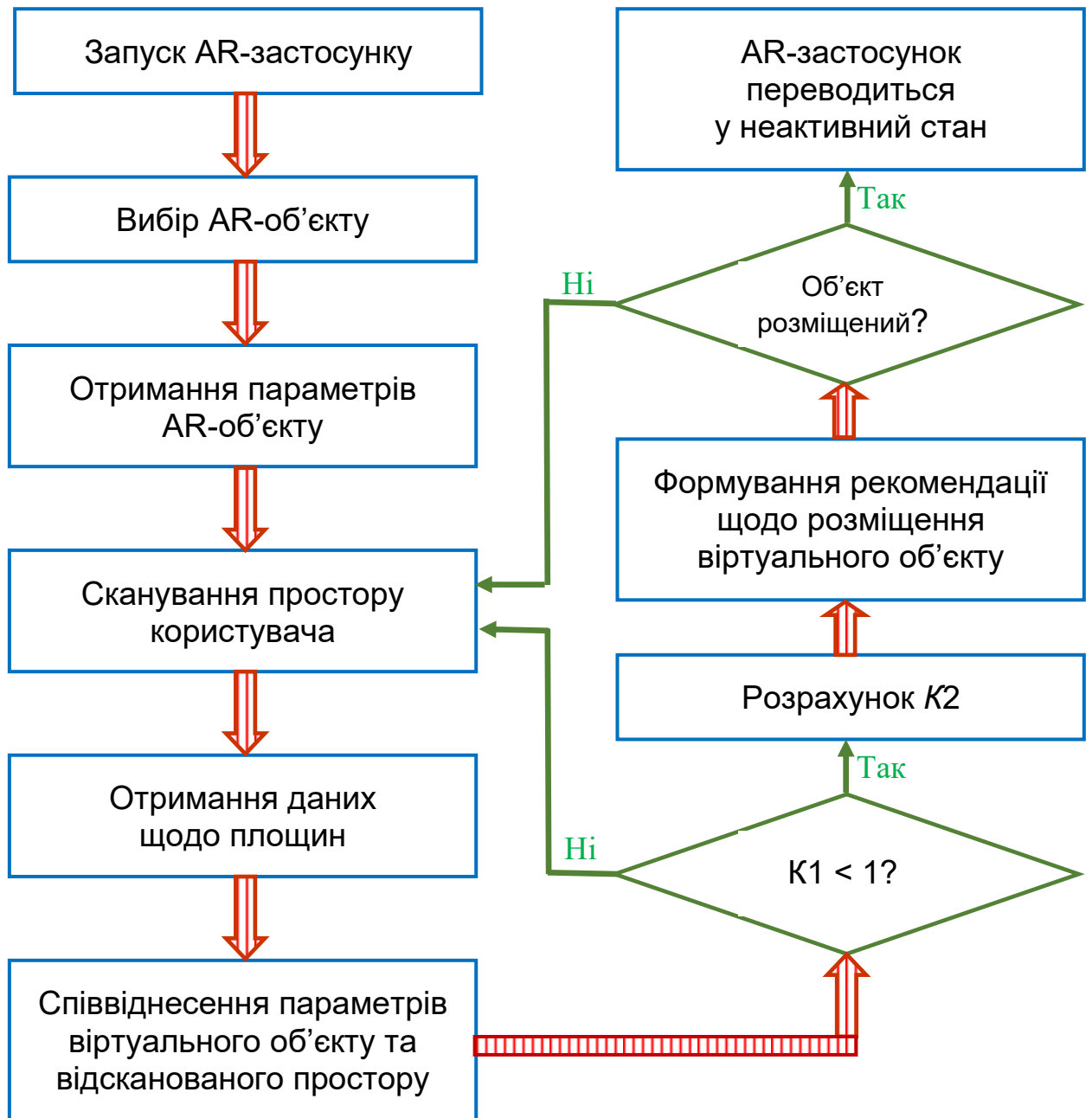


Рисунок 3.10 – Послідовність дій при використанні алгоритму розташування віртуального об'єкта

Далі розглянемо питання щодо оптимального розподілу по площі. Кожен віртуальний об'єкт характеризується своїми габаритами і вимагає виділення навколо себе просторово-нейтральній зони. Ця зона виконує дві ключові функції: по-перше, вона гарантує наявність достатнього простору для того, щоб користувачі могли вільно підходити до віртуальних об'єктів і взаємодіяти з ними. По-друге, вона перешкоджає перекриттю віртуальних об'єктів між собою, підтримуючи таким чином безперервність і

реалістичність сприйняття, що є критично важливим для ефективного застосування застосунків доповненої реальності.

Алгоритм, описаний далі, є узагальненням на двовимірний випадок одновимірного алгоритму розташування об'єктів. Попередній алгоритм чудово справляється з вибудовуванням об'єктів по заданій лінії в просторі, беручи до уваги як розміри, і необхідні вільну зону навколо. Однак йому не вистачає можливості заповнювати об'єктами весь доступний двовимірний простір, адже об'єкти можуть розташовуватися не тільки ліворуч і праворуч, але й далі або ближче до користувача. Новий алгоритм усуває цей недолік.

На початковому етапі роботи алгоритму в лівому нижньому кутку кожного об'єкта визначається точка прив'язки. Ця точка має першорядне значення, так як вона визначає координати розташування об'єкту. Після цього всі об'єкти упорядковуються у спадаючу послідовність в залежності від їх сумарної довжини вздовж осі  $Z$  в сукупності з розмірами вільних зон цього ж вектору, тобто в даному випадку фронтальна та задня зони просторової узгодженості.

Потім формується партія з кількох об'єктів. Формування цієї партії регулюється певним правилом. Як тільки загальна ширина вздовж осі  $X$  цих об'єктів – ця ширина включає в себе як їх лінійні розміри, так і розміри буферних зон вздовж горизонтальною осі - починає перевищувати задану ширину простору, призначеного для розміщення об'єктів, додавання нових об'єктів в партію припиняється.

У цей момент запускається алгоритм лінійного розміщення, який застосовується до всіх об'єктів в партії. Результатом цієї процедури є розташування об'єктів на першій лінії вздовж осі  $X$ . При такому розміщенні горизонтальний проміжок між об'єктами визначається параметром перцептивної відстані  $K$ . Цей параметр підтримується однаковим і постійним для всіх об'єктів, упорядкованих в лінію. Потім процес розміщення вздовж осі  $Z$  ініціюється від верхнього краю площині. За допомогою базової математичної операції – множення  $K$  на величину передньої дельта-відстані

(позначається як  $Z^+$ ) – встановлюється величина відступу кожного об'єкта від верхньої границі площини. Потім з решти об'єктів збирається інша партія, і для цих об'єктів повторюється процес розрахунку горизонтального проміжного відстані.

Після цього розраховується зміщення по осі  $Z$  щодо положення об'єктів в попередньої лінії. Цей процес розрахунку складається з кількох етапів. По-перше, вибирається максимальний коефіцієнт  $K$  між поточною і попередньою рядком. По-друге, для кожного об'єкта в поточному ряду визначаються потенційні верхні сусіди з попереднього ряду, то є об'єкти, мають загальні області вздовж координати  $X$ . Якщо такі сусіди існують, то враховується становище сусіда з найменшою координатою  $Z$ . При відсутності таких сусідів приймається сама низька координата  $Z$  попереднього ряду. Зрештою, обчислюється підсумкове зміщення по вертикалі. При цьому приймається до уваги не тільки передня зона буферного відстані поточного об'єкта, але і нижня зона оптимального відстані об'єкта, розташованого вище, якщо такий є.

Алгоритм продовжує цикл до тих пір, поки не буде досягнуто позиціонування всіх об'єктів. Важливо додати, що алгоритм обробляє об'єкти зліва праворуч для всіх ліній з непарними номерами і справа наліво для всіх ліній з парними номерами. Така схема розташування називається човниковим рухом. Даний підхід дозволяє більше рівномірно розподіляти об'єкти по їх габаритів, комбінуючи більше великі з більше дрібними. Описувана циклічна операція забезпечує щодо просте у реалізації і високопродуктивне розташування віртуальних об'єктів, при забезпечуючи комфорт користувача та ефективно використання простору.

Схематичний приклад результату роботи описаного алгоритму зображений на рисунку 3.12. Сіра область на ньому представляє собою область площині, на яку розміщуються віртуальні об'єкти.

Як доповнення до раніше описаних результатів, на рисунку 3.13 представлено кілька додаткових візуалізацій, які грають ключову роль в розумінні загальної картини.

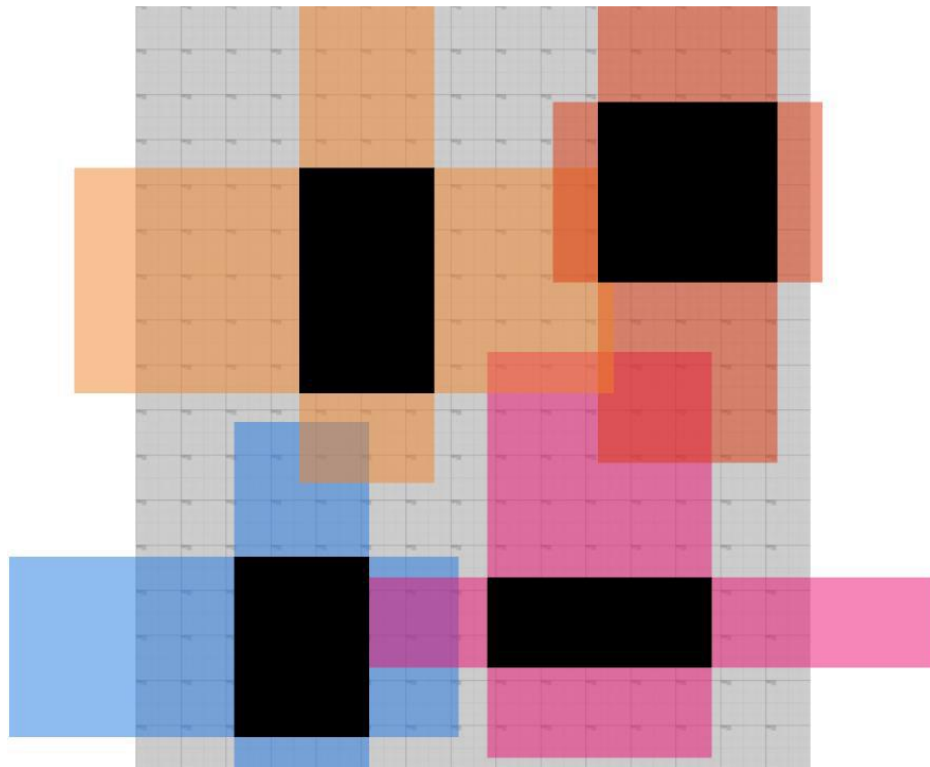


Рисунок 3.11 – Схема розташування об'єктів

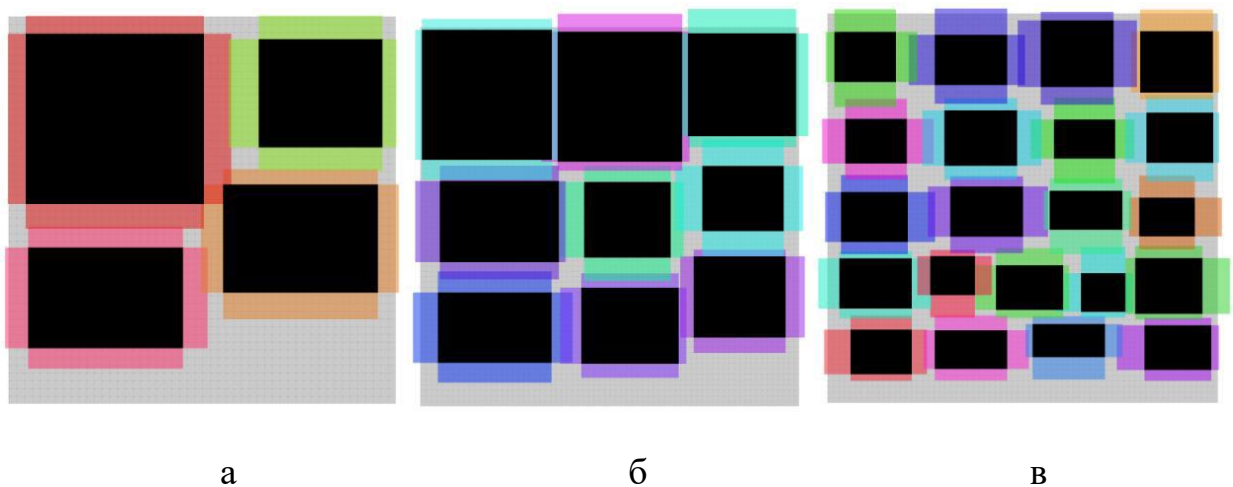


Рисунок 3.12 – Візуальні приклади розміщення різного кількості об'єктів:

а – 4 об'єкти; б – 9 об'єктів; в – 21 об'єкт

Ці візуалізації містять різноманітні схеми розміщення, ілюструючи як розподіл різних об'єктів в просторі, так і їх взаємодія в залежності від кількості і конкретних параметрів кожного об'єкт. Ці схеми дозволяють наочно побачити, як змінюється загальна композиція і динаміка простору при зміні кількості об'єктів або їх індивідуальних показників. Важливо

відзначити, що кожна з цих візуалізацій спеціально розроблено для демонстрації певних аспектів проведеного дослідження, забезпечуючи більше глибоке розуміння досліджуваних процесів.

Далі розглянемо реальний сценарій, в якому є вільний простір розміром 30 одиниць по осі  $X$  і 80 одиниць по осі  $Z$ . Користувач хоче розташувати набір з 7 об'єктів із розмірами і буферними зонами, заданими в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Вхідні дані прикладу

Номер об'єкту	Розмір	Буфер
1	(3, 4.7)	(11.1, 8.7, 10, 17)
2	(3, 5.0)	(11.9, 9.4, 16.1, 9.7)
3	(3, 4.9)	(6.9, 8.9, 15.7, 6.8)
4	(3, 4.5)	(8.6, 10, 11.5, 13.9)
5	(3, 4.6)	(7.6, 11.7, 5.2, 17.5)
6	(3, 4.8)	(9.5, 7.3, 14.8, 6.8)
7	(3, 4.4)	(6.3, 7.4, 5.9, 14.2)

Крок 1: Сортування об'єктів.

Об'єкти сортуються в порядку зменшення їх довжини  $Z$ , включаючи просторово-нейтральні зони:

1. Об'єкт 1:  $Z = 3 + 10 + 17 = 31,70$ .
2. Об'єкт 2:  $Z = 3 + 16,1 + 9,7 = 30,80$ .
3. Об'єкт 4:  $Z = 3 + 11,5 + 13,9 = 29,90$ .
4. Об'єкт 3:  $Z = 3 + 15,7 + 6,8 = 27,40$ .
5. Об'єкт 5:  $Z = 3 + 5,2 + 17,5 = 27,30$ .
6. Об'єкт 6:  $Z = 3 + 14,8 + 6,8 = 26,40$ .
7. Об'єкт 7:  $Z = 3 + 5,9 + 14,2 = 24,50$ .

Крок 2: Формування партії.

Починаємо формувати першу партію об'єктів: додаємо перший об'єкт і обчислюємо загальне кількість його ширини по  $X$  (включаючи буферні зони).

Продовжуємо додавати об'єкти до тих пір, поки загальне  $X$  не почне перевищувати задану ширину простору. У цьому випадку ми можемо додати об'єкти 1 та 2 в першу партію.

Крок 3: Лінійне упорядкування.

Потім застосовуємо алгоритм лінійного розміщення до сформованої партії, щоб розташувати її об'єкти вздовж осі  $X$ . Розташування починається з верхньої частини площині, рухаючись зліва праворуч. Перший об'єкт буде розташований на координаті 6.48, а другий на 21.51.

Крок 4: Пошук вертикального інтервалу.

Розраховуємо вертикальну відстань (відступ) від верхньої границі площини шляхом множення коефіцієнта  $K$  на розмір передньої буферної зони  $Z+$ . Отримуємо значення 65.3 і 69.33 відповідно.

Крок 5: Наступна партія та обчислення зміщення по осі  $Z$ .

Формування наступної групи об'єктів йде до створення нової лінії, але на цей раз справа ліворуч, для чого також проводиться розрахунок зміщення по осі  $Z$ . Цей розрахунок ґрунтується на максимальному параметрі  $K$  між поточним і попереднім рядами, розташування сусідніх об'єктів з попереднього ряду і нижній зоні буферного відстані верхнього сусіднього об'єкта (при його наявності). У цьому прикладі наступна група включає об'єкти 4 та 3. Їх горизонтальне розміщення відповідає координатам 4.81 і 20.02 при параметрі  $K$  рівному 0.697. Враховуючи, що попередній параметр був 0.58, для подальших розрахунків приймається нове, більше висока значення. Потім проводиться перевірка сусідів зверху: для об'єкта 3 виявляється перекриття з об'єктом 1, отже, відступ від його нижній кордону складає 65.37, в той час як об'єкт 4 межує з об'єктом 2, для якого відступ обчислюється від координати  $Z$ , рівною 69.33. Щоб уникнути взаємного "придушення" зон оптимальної відстані, при обчисленні відступу підсумовуються розміри відповідних зон та множаться на коефіцієнт 0.697. Підсумкові координати складають: [4.81, 48.75] та [20.02, 43.9].

Крок 6. Дії, описані в кроці 6, повторюються для решти об'єктів. 3-тя партія буде складатися з об'єктів 5 і 6. 4-та, завершальна партія, буде утримувати тільки один об'єкт решти – 7. Підсумковий результат всіх обчислень зібраний в таблиці 3.3, а візуалізація представлена на рисунку 3.13.

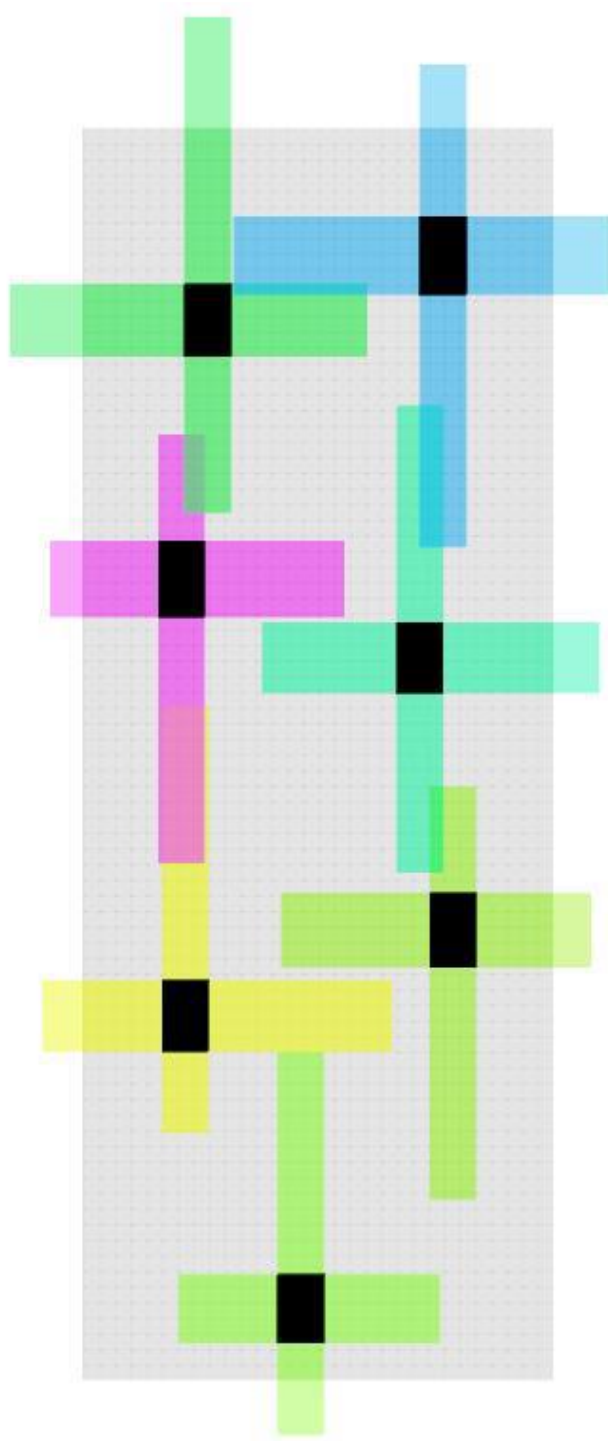


Рисунок 3.13 – Візуалізація розставлення об'єктів прикладу

Таблиця 3.3 – Результати обчислення розташування об'єктів

Номер	Розміри (лінійний, з/к)	К	Рядок	Розташування
1	[3, 4.7], [11.1, 8.7, 10, 17]	0.58	1	[6.48, 65.3]
2	[3, 5.0], [11.9, 9.4, 16.1, 9.7]	0.58	1	[21.51, 69.33]
4	[3, 4.9], [6.9, 8.9, 15.7, 6.8]	0.697	2	[4.81, 48.75]
3	[3, 4.5], [8.6, 10, 11.5, 13.9]	0.697	2	[20.02, 43.90]
5	[3, 4.6], [7.6, 11.7, 5.2, 17.5]	0.697	3	[5.05, 20.99]
6	[3, 4.8], [9.5, 7.3, 14.8, 6.8]	0.697	3	[22.1, 26.33]
7	[3, 4.4], [6.3, 7.4, 5.9, 14.2]	1	4	[12.41, 2.38]

Отже, у доповненій реальності віртуальні об'єкти є ключовими елементами, які взаємодіють з реальною середовищем. Ці об'єкти визначаються набором параметрів, які регулюють їх поведінка і зовнішній вигляд, забезпечуючи реалістичне та захоплююче сприйняття AR.

Найбільш фундаментальними параметрами віртуального об'єкта є його положення і орієнтація в просторі, які визначають, де об'єкт з'являється в AR-сцені і в якому напрямку він повернений. Розмір або масштаб віртуального об'єкта – ще один найважливіший параметр, який забезпечує правильний розмір об'єкта по відношенню до реального оточення та інших віртуальних об'єктів.

## ВИСНОВКИ

Сукупність отриманих у кваліфікаційній роботі результатів дозволяє вирішити актуальне науково-технічне завдання, спрямоване на оптимальне розташування віртуальних об'єктів у системах комп'ютерного зору.

В результаті проведених досліджень отримані такі наукові та практичні результати:

1. Проведений аналіз сучасного стану розвитку технології доповненої реальності. Віртуальна і доповнена реальність дедалі більше інтегруються у різні професійні галузі. Згідно з прогнозами, технологія VR набуде широкого поширення в найближчі 2-5 років, у той час як для впровадження AR може знадобитися близько 5-10 років. В даний час технологія AR знаходиться на стадії "прірви розчарування", що характеризується розбіжністю очікувань між масовим тестуванням дизайну та програмного забезпечення доповненої дійсності. Ця стадія часто виявляє недоліки складних технологій.

2. Визначені підходи до оптимального розташування об'єкта доповненої реальності. Необхідність оптимального розташування в AR-застосунках обумовлена декількома факторами, включаючи зручність і безпека користувача, реалістичність і занурення, інтерактивність, продуктивність і ефективність, а також конкретні цілі програми. Досягнення оптимального розташування включає в себе подолання кількох проблем, таких як підтримка реалізму і узгодженості, забезпечення комфортного користувальницького досвіду, полегшення інтерактивності і оптимізація продуктивність. Оптимальне розташування об'єктів AR є ключовим аспектом технології AR, сприятливим створенню реалістичні, комфортних і захоплюючих вражень від AR.

3. Обґрунтований критерій для визначення оптимальної перцептивної відстані розміщення об'єкта, з урахуванням яких формується цільова функція і розробляється метод її оптимізації. Критерій оптимальності визначається як

обсяг вільного простору навколо віртуального об'єкта відповідає заздалегідь призначеним розробником параметрам зони просторової нейтральності. Цей аспект оцінки враховує не тільки простір, займане об'єктом, але і необхідну зону буферного відстані навколо нього. Це забезпечує достатня простір для взаємодії, як для користувачів, так і для віртуальних персонажів, що особливо важливо для ігрових додатків у доповненою реальності.

4. Удосконалений метод оптимального розташування віртуальних об'єктів у системах комп'ютерного зору за рахунок попереднього знаходження мінімального за об'ємом описаного навкруги об'єкту доповненої реальності паралелепіпеда та застосування при розміщенні у просторі даного об'єкту концепта оптимальної перцептивної відстані.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Кучук Г. А., Ірха Д. А., Кириленко Д. В. Аналіз розташування об'єкта доповненої реальності у фізичному просторі. Системи управління, навігації та зв'язку. Полтава : Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», 2025. Вип. 2(80). С. 150–156.
2. Tahara T., Seno T., Narita G., Ishikawa T. Retargetable AR: Context-aware Augmented Reality in Indoor Scenes based on 3D Scene Graph. // 2020 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality Adjunct (ISMAR-Adjunct). – Recife, Brazil: IEEE, 09.11.2020 - 13.11.2020. С. 249–255.
3. Tan Z., Chu D., Zhong L. Vision. // the fifth international workshop. / Под ред. Yuvraj Agarwal, Lin Zhong. – Bretton Woods, New Hampshire, USA: ACM Press, 16.06.2014 - 16.06.2014. С. 23–27.
4. Turk M., Fragoso V. Computer Vision for Mobile Augmented Reality. // Mobile Cloud Visual Media Computing / G. Hua [и др.]. Cham: Springer International Publishing, 2015. С. 3–42.
5. van Krevelen D., Poelman R. A Survey of Augmented Reality Technologies, Applications and Limitations // International Journal of Virtual Reality. 2019. 9. № 2. С. 1–20.
6. Wang J., Wang Q., Saeed U. A visual-GPS fusion based outdoor augmented reality method. // VRCAI '18: International Conference on Virtual Reality Continuum and its Applications in Industry. / Под ред. Koji Mikami, Zhigeng Pan, Matt Adcock, Daniel Thalmann, Xubo Yang, Tomoki Itamiya, Enhua Wu. – Tokyo Japan: ACM, 02 12 2018 03 12 2018. С. 1–4.
7. Wang J., Wang Q., Saeed U. A visual-GPS fusion based outdoor augmented reality method. // VRCAI '18: International Conference on Virtual Reality Continuum and its Applications in Industry. / Под ред. Koji Mikami, Zhigeng Pan, Matt Adcock, Daniel Thalmann, Xubo Yang, Tomoki Itamiya, Enhua Wu. – Tokyo Japan: ACM, 02 12 2018 03 12 2018. С. 1–4.

8. Papadopoulos T., Evangelidis K., Kaskalis T. H., Evangelidis G., Sylaiou S. Interactions in Augmented and Mixed Reality: An Overview // Applied Sciences. 2021. 11. № 18. C. 8752.

9. Rovira A., Fatah Gen Schieck A., Blume P., Julier S. Guidance and surroundings awareness in outdoor handheld augmented reality // PloS one. 2020. 15. № 3. e0230518.

10. Samini A., Palmerius K. L. A study on improving close and distant device movement pose manipulation for hand-held augmented reality. // VRST '16: 22th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology. / Dieter Kranzlmüller, Gudrun Klinker. – Munich Germany: ACM, 02 11 2016 04 11 2016. C. 121–128.

11. Oufqir Z., El Abderrahmani A., Satori K. From Marker to Markerless in Augmented Reality. // Embedded Systems and Artificial Intelligence / V. Bhateja [и др.]. Singapore: Springer Singapore, 2020. C. 599–612.

12. El Barhoumi N., Hajji R., Bouali Z., Ben Brahim Y., Kharroubi A. Assessment of 3D Models Placement Methods in Augmented Reality // Applied Sciences. 2022. 12. № 20. C. 106-120.

13. Nick Day. 5 Problems With Augmented Reality Training And Solutions To Tackle Them. URL: <https://roundtablelearning.com/5-problems-with-augmented-reality-training-and-solutions>

14. Papadopoulos T., Evangelidis K., Kaskalis T. H., Evangelidis G., Sylaiou S. Interactions in Augmented and Mixed Reality: An Overview // Applied Sciences. 2021. 11. № 18. C. 187-212.

15. Rovira A., Fatah Gen Schieck A., Blume P., Julier S. Guidance and surroundings awareness in outdoor handheld augmented reality // PloS one. 2020. 15. № 3. e0230518.

16. Neshov N., Manolova A. Objects distance measurement in augmented reality for providing better user experience // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. 1032. № 1. C. 120-140

17. Müller J., Butscher S., Feyer S. P., Reiterer H. Studying collaborative object positioning in distributed augmented realities. // MUM 2017: The 16th International Conference on Mobile and Ubiquitous Multimedia. / Под ред. Niels Henze, Paweł Woźniak, Kaisa Väänänen, Julie Williamson, Stefan Schneegass. – Stuttgart Germany: ACM, 26 11 2017 29 11 2017. С. 123–132.