

**БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА**

**БР. ІІІ - 49.00.00.000 ІІЗ**

**Група ІІІ-21-2**

**Провальний Олександр**

**2025**

**Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу**  
**Інститут інформаційних технологій**  
**Кафедра інженерії програмного забезпечення**

**Провальний Олександр Володимирович**

---

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 004.942  
(індекс)

**БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА**

**Програмування доповненої реальності**

(назва роботи)

Інженерія програмного забезпечення

---

(назва освітньої програми)

121– Інженерія програмного забезпечення

---

(шифр і назва спеціальності)

**Робота містить результати власних досліджень, використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело:**

Здобувач освітнього ступеня Провальний О. В.  
(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник Піх Марія Михайлівна, асистент  
(підпис, прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання керівника)

Допущено до захисту  
Завідувач кафедри

доц. Бандура В.В.  
(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)



## 6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв

2. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_ 2025 р.

Керівник \_\_\_\_\_

(підпис)

Завдання прийняв до виконання \_\_\_\_\_

(підпис)

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту	Примітка
1	Визначення та обґрунтування теми роботи	15.02.2025	виконано
2	Огляд існуючих концепцій, рішень та сервісів в даній області	25.02.2025	виконано
3	Побудова моделі або алгоритму власного рішення	15.03.2025	виконано
4	Документування реалізації власного оригінального рішення вибраними засобами	25.04.2025	виконано
5	Оформлення пояснювальної записки бакалаврської роботи	10.06.2025	виконано

Студент \_\_\_\_\_

(підпис)

Керівник роботи \_\_\_\_\_

(підпис)

## АНОТАЦІЯ

Бакалаврська робота містить 60 сторінок, список використаних джерел із 26 найменування,

**Метою роботи** є аналіз програмування доповненої реальності, включаючи теоретичні основи, методології розробки та практичні аспекти інтеграції AR у програмування та інженерні системи

**Об'єкт дослідження:** Процес програмування робототехнічних систем із використанням технологій доповненої реальності (AR).

**Предмет дослідження:** Методи та архітектура інтерактивної AR-системи, що забезпечує візуальне програмування реактивної поведінки роботів-маніпуляторів на основі TAP-правил у реальному часі.

**Результати дослідження:** Виявлено, що застосування AR дозволяє значно зменшити час навчання користувачів, покращити точність програмування та уникнути колізій у траєкторіях.

**У першому розділі** - розглядаються теоретичні основи та технологічне підґрунтя AR, включаючи концепцію доповненої реальності, сучасний стан технологій і огляд обладнання.

**Другий розділ** - присвячений методології розробки та інженерному підходу до AR-систем, з фокусом на матеріали дослідження, архітектуру програмування AR-роботів і проектування інтерактивних систем управління

**Третій розділ** - аналізує інтеграцію доповненої реальності в програмування та інженерні системи, включаючи AR-платформи, візуалізацію траєкторій, аналіз застосунків і узгодження рішень із галузевими вимогами

**Висновок:** висновках узагальнено ключові результати та окреслено перспективи розвитку програмування доповненої реальності

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** ДОПОВНЕНА РЕАЛЬНІСТЬ, ПРОГРАМУВАННЯ, AR-ПЛАТФОРМИ, РОБОТОТЕХНІКА, UNITY, ARKIT, ARCORE, ІНТЕРАКТИВНІ СИСТЕМИ, ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ,

## ABSTRACT

The bachelor's thesis contains 60 pages, , a list of used sources with 26 titles,

**The purpose of the work** is to analyze augmented reality programming, including theoretical foundations, development methodologies and practical aspects of AR integration into programming and engineering systems

**Object of research:** The process of programming robotic systems using augmented reality (AR) technologies.

**Subject of research:** Methods and architecture of an interactive AR system that provides visual programming of reactive behavior of manipulator robots based on TAP rules in real time.

**Research results:** It was found that the use of AR allows to significantly reduce user training time, improve programming accuracy and avoid collisions in trajectories.

**The first section** considers the theoretical foundations and technological basis of AR, including the concept of augmented reality, the current state of technology and an overview of equipment.

**The second section** is devoted to the development methodology and engineering approach to AR systems, with a focus on research materials, programming architecture of AR robots and design of interactive control systems

**The third section** analyzes the integration of augmented reality into programming and engineering systems, including AR platforms, visualization of trajectories, application analysis and coordination of solutions with industry requirements

**Conclusion:** the conclusions summarize the key results and outline the prospects for the development of augmented reality programming

**KEYWORDS:** AUGMENTED REALITY, PROGRAMMING, AR PLATFORMS, ROBOTICS, UNITY, ARKIT, ARCORE, INTERACTIVE SYSTEMS, COMPARATIVE ANALYSIS,

## **ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ**

**AR** - доповнена реальність

**HDM** - Шлеми для доповненої реальності

**HUD** - проекційні дисплеї

**VST** - відео-прозорі

**OST** - оптичні-прозорі

**HMD** - віртуальної реальності

**API** - інтерфейсу протоколу додатків

**IMU** - інерціальний вимірювальний блок

**GPU** - спеціалізованими графічними процесорами

**КТ** - комп'ютерної томографії

**FOV** - велике поле зору

## ЗМІСТ

<b>ВСТУП</b> .....	8
<b>РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТА ТЕХНОЛОГІЧНЕ ПІДґРУНТЯ AR</b> .....	10
1.1. Вступ до концепції доповненої реальності .....	10
1.2. Сучасний стан доповненої реальності .....	14
1.3. Огляд обладнання доповненої реальності .....	19
1.4 Висновки по розділу.....	24
<b>РОЗДІЛ 2. МЕТОДОЛОГІЯ РОЗРОБКИ ТА ІНЖЕНЕРНИЙ ПІДХІД ДО AR-СИСТЕМ</b> .....	25
2.1. Матеріали дослідження та експериментальні методи .....	25
2.2. Архітектура та реалізація програмування AR-роботів .....	29
2.3. Проектування інтерактивної AR-системи управління .....	31
2.4 Висновки по розділу.....	35
<b>РОЗДІЛ 3. ІНТЕГРАЦІЯ ДОПОВНЕНОЇ РЕАЛЬНОСТІ У ПРОГРАМУВАННЯ ТА ІНЖЕНЕРНІ СИСТЕМИ</b> .....	36
3.1. AR-платформи для програмування робототехнічних систем .....	36
3.2. Побудова та візуалізація траєкторії за допомогою AR .....	39
3.3. Аналіз AR-застосунків та коментарі .....	44
3.4. Узгодження AR-рішень з галузевими вимогами: виклики та перспективи	53
3.5 Висновки по до розділу.....	58
<b>ВИСНОВКИ</b> .....	59
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ</b> .....	61

					<b>БР.ІП – 49.00.00.000 ПЗ</b>			
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>	<b>Програмування доповненої реальності Пояснювальна записка</b>	<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Акрушів</i>
Розроб.		Провальний О. В						
Перевір.		Піх М.М.					9	
Реценз.		Дмитрик Т.Б.				<b>ІФНТУНГ ІП-21-2</b>		
Н. Контр.		Піх М.М.						
Затверд.		Бандура В. В.						

## ВСТУП

Програмування доповненої реальності (AR) є однією з передових галузей сучасної інформатики, що поєднує інноваційні технології візуалізації, обробки даних і взаємодії людини з комп'ютером для створення іммерсивних цифрових середовищ. AR дозволяє накладати цифровий контент, такий як 3D-моделі, текст чи анімацію, на реальний світ у реальному часі, що знаходить застосування в робототехніці, промислових системах, освіті, медицині та розвагах. Використання інструментів, таких як Unity, ARKit, ARCore, і мов програмування, зокрема C# і Python, забезпечує розробку складних AR-систем, які інтегруються з апаратним забезпеченням, наприклад, окулярами HoloLens або мобільними пристроями.

**Актуальність теми** зумовлена швидким розвитком AR-технологій у контексті цифрової трансформації. За даними Statista, ринок доповненої реальності до 2025 року може досягти обсягу в десятки мільярдів доларів, що підкреслює потребу в кваліфікованих розробниках і стандартизованих підходах до програмування AR. Водночас виклики, пов'язані з оптимізацією продуктивності, сумісністю обладнання та відповідністю галузевим стандартам, вказують на необхідність глибшого дослідження методологій розробки AR-систем.

Дипломна робота присвячена дослідженню програмування доповненої реальності (AR) як інструменту для створення інноваційних інтерактивних систем у робототехніці та інженерії. Метою роботи є аналіз сучасних підходів до розробки AR-систем, їх архітектури, платформ і методів інтеграції в програмування та промислові системи. Дослідження зосереджується на теоретичних основах AR, інженерних методах і практичних аспектах створення AR-застосунків.

У роботі розглянуто теоретичні основи та технологічне підґрунтя AR, включаючи концепцію доповненої реальності, сучасний стан технологій і огляд обладнання, такого як HoloLens. Проаналізовано методологію розробки, зокрема

					БР.ІІІ - 49.00.00.000 ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

експериментальні методи, архітектуру програмування AR-роботів і проектування інтерактивних систем управління. Окремо досліджено інтеграцію AR у програмування, включаючи платформи, такі як Unity і Vuforia, побудову траєкторій, аналіз застосунків і відповідність галузевим вимогам.

Практична частина дослідження включає розробку прототипу AR-застосунку, наприклад, для візуалізації траєкторії робота або керування промисловою системою. Оцінюються такі аспекти, як продуктивність, сумісність із обладнанням, зручність використання та адаптивність. Додатково проведено порівняльний аналіз AR-платформ за критеріями ефективності та гнучкості.

**Метою цього дослідження** є аналіз програмування доповненої реальності, включаючи теоретичні основи, методології розробки та практичні аспекти інтеграції AR у програмування та інженерні системи. Робота спрямована на систематизацію знань про AR-технології, інструменти програмування та їх застосування в робототехнічних і промислових системах, а також на надання рекомендацій для розробників і інженерів. Дослідження охоплює як теоретичні аспекти, так і практичні підходи до створення AR-застосунків.

Ця робота має на меті надати комплексне уявлення про програмування доповненої реальності, а також практичні рекомендації для фахівців, які прагнуть створювати інноваційні AR-системи в умовах швидкого технологічного прогресу.

**Завданнями дослідження:** Проаналізувати сучасний стан технологій доповненої реальності у сфері робототехніки. Вивчити доступне обладнання та програмне забезпечення для реалізації AR-систем. Розробити архітектуру AR-системи для програмування поведінки робота. Реалізувати механізм створення та оцінки TAP-правил у доповненій реальності. Оцінити ефективність запропонованого підходу порівняно з традиційними методами програмування.

**Об'єкт дослідження:** процес програмування робототехнічних систем із використанням технологій доповненої реальності (AR).

					БР.ІІІ - 49.00.00.000 ПЗ	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

**Предмет дослідження:** методи та архітектура інтерактивної AR-системи, що забезпечує візуальне програмування реактивної поведінки роботів-маніпуляторів на основі TAP-правил у реальному часі.

**Методи дослідження:** Аналіз та систематизація літературних джерел; методи проєктування, технології комп'ютерного зору та AR-візуалізації, симуляційне моделювання, експериментальні випробування

**Наукова новизна:** Уперше запропоновано систему програмування роботів, яка поєднує TAP-правила, повноцінну 3D-візуалізацію робочого середовища за допомогою ARHMD та механізм редагування поведінки в реальному часі.

Бакалаврська робота містить 55 сторінок, 20 рисунків, три розділи, список використаних джерел із 26 найменуванням.

					БР.ІІІ - 49.00.00.000 ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

# РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТА ТЕХНОЛОГІЧНЕ ПІДҐРУНТЯ AR

## 1.1 Вступ до концепції доповненої реальності

Кілька визначень доповненої реальності (AR) були включені до наукових праць, починаючи з 1990-х років [ 1 ]. AR можна стиснути як комп'ютерну графічну техніку, де штучний "віртуальний" об'єкт (модель САD, символ, зображення, текст) додається до потокового відео зовнішнього реального середовища в режимі реального часу. Апаратне та програмне забезпечення, необхідні для його реалізації, залежать від внутрішнього/зовнішнього застосування, складності віртуальної сцени, яку потрібно додати, пристрою, що використовується користувачем, реального часу та чіткості, необхідної для застосування.

Однак мінімальне обладнання, необхідне для запуску AR-застосунку, забезпечується камерою, що обрамляє зовнішній світ, екраном або об'єктивом для проектування потокового відео та обчислювальними ресурсами (ПК, процесор смартфона, мікроконтролер), необхідними для обробки відеозапису, визначення пози та накладання візуальних символів на нього. AR є одним із стовпів програми "Промисловість 4.0", метою якої є впровадження нових та передових технологій у виробничі системи та заводи. Деякі приклади інших технологій, запропонованих Індустрією 4.0 (I4.0), включають великі дані, аналітику, Інтернет речей, адитивне виробництво, інтелектуальні датчики, мережеве машинобудування та саомоніторинг. Як доповнена реальність (AR), так і Індустрія 4.0 привернули увагу дослідників в останні роки.

Як видно з першого прикладу, мало дослідників займаються інтеграцією доповненої реальності (AR) у фабрики Індустрії 4.0. Якщо розглянути базу даних SCOPUS та перевірити кількість статей лише з ключовими словами «Доповнена реальність» та «Індустрія 4.0», то виявиться, що щороку з обох тем пишеться понад 2000 статей (дані отримані станом на 6 квітня 2021 року, а дані за 2021 рік

					БР.ІІІ - 49.00.00.000 ПЗ	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

є прогнозами на основі тенденції на цю дату). Однак, якщо подивитися на кількість статей з ключовими словами «Доповнена реальність» ТА «Індустрія 4.0», то виявиться, що дуже обмежена кількість робіт, близько 100 на рік.

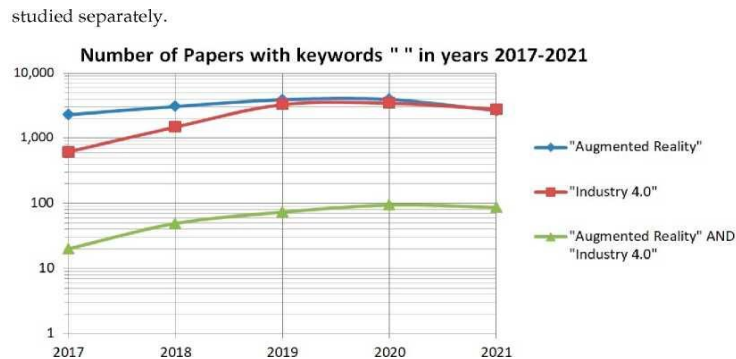


Рисунок 1.1 Тенденція кількості опублікованих статей з ключовими словами «Доповнена реальність?», «Промисловість? 4.0» та «Доповнена реальність» ТА «Промисловість 4.0» з бази даних Scopus .

Ще одну цікаву статистику можна отримати, перевіривши інші ключові слова статей, де принаймні одне з них - «Доповнена реальність» у базі даних SCOPUS. База даних SCOPUS показує, що станом на 7 квітня 2021 року 26 621 стаття (як на конференціях, так і в журналах) містить принаймні одне ключове слово, що дорівнює «доповненій реальності». Рисунок На рисунку 1.2 показано кількість сторінок, де одне ключове слово – «Доповнена реальність», а одне – «що вказано у першому стовпці».

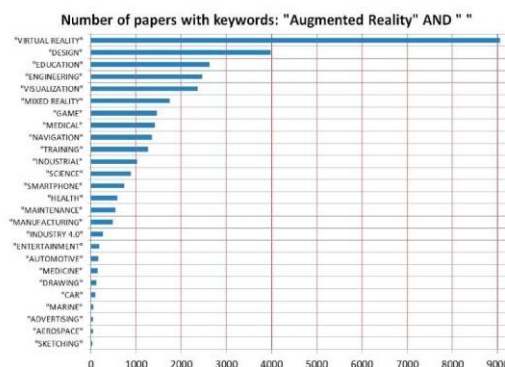


Рисунок 1.2. Кількість статей із ключовими словами «Доповнена реальність» та виразами в «», переліченими у першому стовпці.

Досить розчаровує те, що ключові слова, такі як технічне обслуговування, виробництво та Індустрія 4.0, значно рідше цитуються в статтях порівняно з іншими, такими як «Віртуальна реальність», «Дизайн», «Освіта». Лише 270 статей містять одночасно ключові слова доповненої реальності та Індустрії 4.0, а такі теми, як технічне обслуговування та виробництво, також мають низькі значення (550 та 480 відповідно). Ці цифри свідчать про те, що література висвітлює більше теоретичних аспектів, де доповнена реальність порівнюється з віртуальною або змішаною реальністю, або досліджень загального призначення, де доповнена реальність виявляється потенційно корисною для підтримки дизайну, освіти, інженерії або візуалізації.

У цій статті зроблено спробу зосередити увагу на практичному використанні доповненої реальності (AR) у заводському/виробничому середовищі, описуючи потенціал цієї технології, а також проблеми, які все ще залишаються відкритими та обмежують поширення AR у виробничих контекстах.

Коментарі щодо доповненої реальності (AR) та її впровадження в контексті Індустрії 4.0 базуються на експериментах, проведених авторами та літературою. База даних Scopus була обрана основним джерелом для статей, що розглядаються в цьому дослідженні. Через величезну кількість статей за темами AR та Індустрії 4.0, було використано комбінацію ключових слів, таких як «Доповнена реальність», плюс інше ключове слово (див. список на рисунку 1.2) було встановлено як основний критерій для виявлення найкращих промислових застосувань доповненої реальності. Зокрема, для пошуку відповідної літератури використовувалися такі ключові слова, як «технічне обслуговування», «навчання», «виробництво» та «медицина».

Фігура на рис 1.3 показано логічну структуру статті. Проведено перший аналіз сучасного стану доповненої реальності (AR), який показує найкраще апаратне та програмне забезпечення, доступне для будь-якого застосування AR. Після цього поглибленого дослідження аналізуються промислові застосування з урахуванням комбінації обмежень, зумовлених не лише апаратним/програмним

забезпеченням, але й умовами роботи в реальних середовищах. Після цього, у розділі висновків, надається відповідь на питання, чи є ця AR зрілою технологією для промислового застосування, де наводяться основні принципи, що роблять AR придатною технологією для AR4.0 та інших платформ .

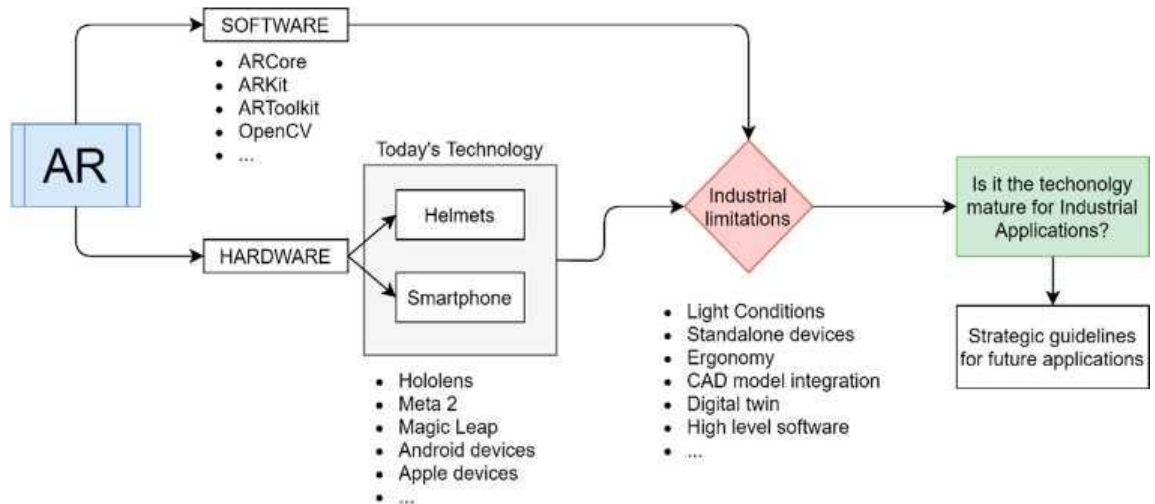


Рисунок 1.3 Робочий процес методології підготовки документів, починаючи від існуючої технології, застосованої до промислового застосування для виробництва стратегічних рекомендацій.

## 1.2 Сучасний стан доповненої реальності

Сьогодні існує багато програмних пакетів та інструментів, які дозволяють створювати AR та VR-додатки [ 2 , 3 ]. Згідно з літературою [ 4 ], існують три можливі види комбінацій реальностей: доповнена реальність, доповнена віртуальність (AV) та віртуальна реальність. Перший - це інтеграція віртуальних об'єктів у реальне життя завдяки прозорим пристроям, що кріпляться на голові. Ця технологія дозволяє взаємодіяти між двома світами, поєднуючи реальне та ні, таким чином забезпечуючи більш детальне сприйняття реальності [ 5 ]. Другий базується на об'єднанні реальних об'єктів у віртуальному середовищі. Застосування цієї технології в технічному обслуговуванні можна знайти в [ 6 ], де читач може знайти більш детальний опис AV. Нарешті, віртуальна реальність

- це повністю оцифрований світ, де спостерігач стоїть від першої особи в повністю віртуальній середовищі, населеному цифровими елементами.

VR вимагає використання імерсивних пристроїв, таких як HMD або Oculus Rift та Playstation VR. У цій концепції визначення «змішаної реальності» стосується взаємозв'язку між реальним та віртуальним. Міст, що з'єднує реальне та віртуальне, заповнений технологіями змішаної реальності, які здатні поєднувати віртуальний контент із реальним світом і навпаки. Значним внеском у цю тему є фундаментальна робота Пола Мілгрема та ін. [X], що описує «континуум реальності-віртуальності».

Цей континуум охоплює від реального середовища до повністю віртуального середовища: доповнену реальність та доповнену віртуальність можна вважати проміжними кроками між зовнішніми межами (див. рисунок 1.4). Скорочення цього мосту означає отримання найкращого захопливого досвіду, оскільки оптимальні результати будуть досягнуті, коли кінцевий користувач не сприйматиме жодної різниці між реальним та віртуальним (див. рис. 1.5)

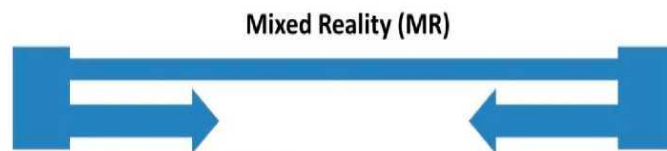


Рисунок 1.4 Спрощена ептесеріація континууму RV.

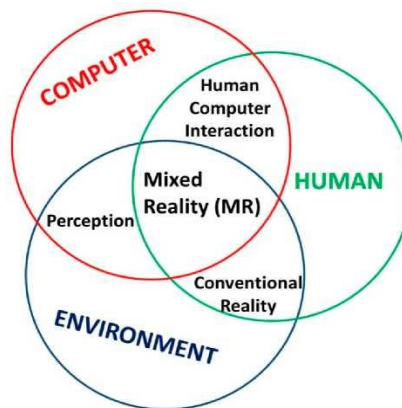


Рисунок 1.5 Взаємодія людина-комп'ютер-середовище для створення MR.

У наступних двох підрозділах буде детальніше описано аспекти, пов'язані з програмними інструментами та апаратними пристроями, розробленими для підтримки доповненої реальності (AR). програмного забезпечення доповненої реальності ZL

Існує багато бібліотек, присвячених віртуальній та доповненій реальності: детальне порівняння різних комплектів розробки програмного забезпечення (SDK) можна знайти в [ 9 ]. На ринку доступні інструменти на основі маркерів, такі як ARToolkit: вони використовують білі та чорні маркери [ 10 , 11 ] для отримання орієнтації камери, яка використовується для кадрування зовнішнього світу, та для правильного посилення на кілька систем відліку (камера, маркер, об'єкт), необхідних для реалізації AR. Ринок пропонує інші програми, такі як Vuforia, яка дозволяє використовувати більш просунуті технології, такі як стратегія AR без маркерів. В останньому випадку не потрібно використовувати заздалегідь визначений маркер, а сама зовнішня сцена використовується для виявлення: орієнтації та положення камери. Ця бібліотека може розпізнавати візерунки на реальних 2D (відстеження зображення) та 3D об'єктах (відстеження об'єктів) [12], перетворюючи їх на маркер , надаючи кінцевому користувачеві більшу гнучкість. На рисунку 6 представлено приклад використання Vuforia для розробки AR-додатку, де віртуальні зображення посиляються на реальний контролер, що використовує технологію без маркерів.



Рисунок 1.6 Застосування конструкції для розбирання, розробленої в Університеті Болоньї.

					БР.ІІІ - 49.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

Наприклад, у програмах технічного обслуговування об'єкт, який потрібно обслуговувати, може використовуватися як маркер, уникаючи використання маркерів уваги чи інших складних пристроїв відстеження для підтримки доповненої реальності (AR): цей підхід є важливим для перетворення доповненої реальності (AR) з лабораторної цікавості на гнучкий інструмент, зручний у реальних промислових застосуваннях [ 113 ]. Нещодавно було випущено важливі інструменти під комерційними назвами ARCore [ 14 ] та ARKit [ 15 ] від Google та Apple відповідно. Обидва інструменти відстежують середовище за допомогою своїх веб-камер. Перший (розроблений на основі так званого "Проекту Tango") працює на пристроях Google Pixel, а тепер і на інших провідних гамма-пристроях. На відміну від ARCore, ARKit працює лише з пристроями iOS (операційна система iPhone). Ці інструменти можуть прив'язувати голограми до горизонтальних відображених середовищ (останні оновлення також досліджують можливість роботи з вертикальними площинами), і вони можуть відображати 3D-об'єкти як тіні. Бібліотеки обробки зображень, такі як OpenCV, є важливими: цей тип інструментів може отримувати зображення з веб-камер і застосовувати фільтри та математичні алгоритми для розпізнавання образів, які є основою відстеження зображень. Варто згадати Unity та Unreal Engine, які є програмними пакетами, здатними обробляти всі ці бібліотеки аналізу зображень у зручний для користувача спосіб. Unreal Engine є відносно новим для світу AR/VR, тоді як розробники Unity мають більше досвіду в розробці ефективних інструментів інтеграції. У цьому контексті Unity можна розглядати як контейнер, що дає експериментатору можливість використовувати багато інструментів одночасно та створювати найкращий результат. `scene` ]що запустить AR-додаток.

Це програмне забезпечення може компілювати додатки або працювати на різних платформах: від Windows до Mac OS, а також Linux, IOS та Android. Сильною стороною, і водночас головною слабкістю цієї програми, є те, що вона була спочатку розроблена для універсальних комп'ютерних графічних програм: це включає механізм рендерингу в реальному часі, який допомагає користувачеві легко взаємодіяти з AR або VR найприроднішим чином, але він не підходить для

					БР.ІІІ - 49.00.00.000 ПЗ	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

механічних та промислових застосувань. Unity - це не САПР. Неможливо обробляти параметричні об'єкти (як це робить зараз навіть базова 3D-САПР) або модифіковані системи. Мета цього програмного забезпечення - збирати моделі, створювати сцени з взаємодією між об'єктами та компілювати додаток для їх кінцевого використання: воно може обробляти прості об'єкти, які можуть підійти для розваг або дослідницьких тематичних досліджень, але наразі не підтримує складність реальної САПР-моделі.

Це твердження ґрунтується на експериментах, проведених авторами. Для оцінки було реалізовано AR-додаток для смартфонів на базі Unity, а саме додаток ARdroid. Він може накладати CAD-моделі у форматі OBJ на зовнішній вигляд, обрамлений смартфоном, за умови, що маркер астронавта з Unity знаходиться в сцені. Коли завантажується OBJ-модель з малою вагою (1 МБ), все працює нормально, але коли завантажуються більші моделі (наприклад, >3 МБ), спостерігаються проблеми з візуалізацією, як показано на рисунку. 1.7 показано. На цьому зображенні показано результат експерименту, проведеного з моделлю CAD, збереженою в STL з низькою та високою якістю (див. верхній малюнок), а потім збереженою у форматі OBJ. Модель з низькою роздільною здатністю важить 142 кб, тоді як модель з високою роздільною здатністю важить 2729 кб. Результати візуалізації є зрозумілими, оскільки важча модель страждає від проблем візуалізації, коли частина моделі прихована кодом, а також є інші дефекти поверхні. Ці проблеми також пов'язані з максимальною кількістю полігонів, які може обробити Unity

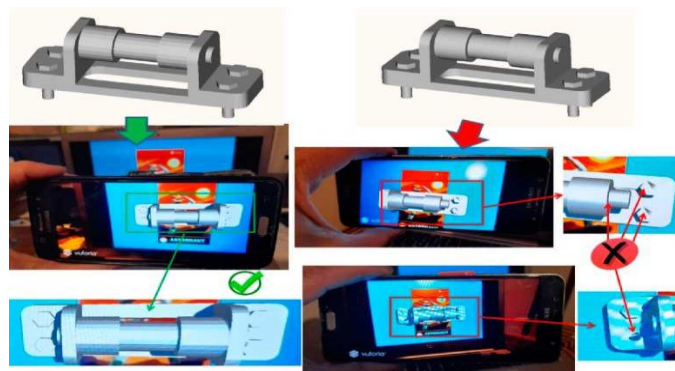


Рисунок 1.7 Додаток ARdroid, розроблений авторами в Unity.

					БР.ІІІ - 49.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

Вгорі ліворуч та праворуч: CAD-модель з високою та низькою роздільною здатністю. Внизу ліворуч та праворуч: OBJ-модель з низькою та високою вагою у додатку ARdroid.

### 1.3 Огляд обладнання доповненої реальності

Сфера кінцевого застосування є основним фактором у виборі обладнання для AR-додатків. Якщо розглядати обладнання, спеціально розроблене для адаптації AR-навичок, то головні дисплеї (HMD) відіграють вирішальну роль. Шлеми для доповненої реальності (HDM) можна класифікувати на два основні типи: відео-прозорі (VST) та оптичні-прозорі (OST). Технологія VST базується на використанні камери, яка кадрує зовнішню сцену. Далі віртуальні символи або моделі додаються в режимі реального часу до потокового відео. Пристрої OST працюють по-іншому, проектуючи синтетичні віртуальні моделі на напівпрозорі лінзи: у цьому випадку користувач бачить реальний зовнішній світ, доданий віртуальною моделлю. З іншого боку, використовуючи апаратне забезпечення VST, користувач бачить реальний світ на дисплеї пристрою [ 16 ]: додатки для смартфонів є типовими прикладами технології VST. Подальшу класифікацію апаратного забезпечення доповненої реальності можна здійснити, розділивши апаратне забезпечення на дві категорії на основі процесора: автономні пристрої включають електронні плати та процесори, здатні кадрувати зовнішній світ, накладати моделі та візуалізувати кінцеве потокове передавання; інші пристрої потребують додаткового обладнання для належної роботи, яке має бути підключено через кабелі, Bluetooth або Wi-Fi.

#### Пристрої для прозорого відео

Шлеми віртуальної реальності (VST) зазвичай не підключаються до віртуальної реальності (HMD), оскільки їм не потрібні вбудовані камери, щоб бачити реальність та обробляти зображення на екрані, створені стандартними пікселями. Тим не менш, варто згадати Oculus Rift S та HTC Vive PRO, оскільки вони вже мають можливість стереозображення завдяки двом камерам,

					БР.ІІІ - 49.00.00.000 ПЗ	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

встановленим перед гарнітурою. Незважаючи на це, вони в основному використовуються для VR-додатків, що призводить до незначного використання ресурсів. VST HDM дійсно може стати проривом у середовищі змішаної реальності, оскільки вони можуть поєднати потужну поведінку віртуальної реальності та сприйняття простору доповненої реальності (AR). На жаль, вони не є автономними, але у них немає конкурентів, якщо враховувати характеристики дисплея. Як Oculus Rift, так і HTC Vive пропонують роздільну здатність 1080 x 1200 пікселів для кожного ока; загалом 2160 x 1200.

Вони мають частоту оновлення 90 Гц, що забезпечує достатньо високу частоту кадрів, щоб запобігти заколисуванню та забезпечити плавний перегляд загалом. Вони пропонують кут огляду 110 градусів. HTC Vive та Oculus Rift S підтримують стереографічний 3D-вигляд, а велике поле зору (FOV) забезпечує користувачам більш захопливий досвід. Обидва пристрої оснащені контролерами, які можуть взаємодіяти з середовищем віртуальної реальності. Через свої характеристики VST-пристрої зазвичай обирають для застосувань віртуальної реальності, але це не виключає можливого застосування в доповненій реальності з різними цілями. З іншого боку, смартфони можуть представляти альтернативу іншим VST-пристроєм, оскільки вони зазвичай оснащені однією або навіть кількома камерами та екраном, і писати мобільні додатки досить просто. Apple відкрила для широкого спектру застосувань, впроваджуючи Lidar (Light Detection and Ranging) у своєму iPad Pro 2020, покращуючи виявлення поверхні та забезпечуючи краще відображення середовища, де розміщені голограми.

### **Оптичні прозорі пристрої**

OST може використовувати набір технологій, спеціально розроблених для підтримки потреб доповненої реальності (AR). Зокрема, увага досліджень та промисловості була спрямована на методи проєкцій, які, ймовірно, можна вважати серцем OST HMD [ 17 ]. Найпростішим рішенням, розробленим для проєктування зображень у HMD, є технологія напівдзеркала, але вона має обмежене поле зору (FoV). Зі збільшенням складності можна використовувати

					БР.ІІІ - 49.00.00.000 ПЗ	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

опуклі або довільної форми дзеркала: це корисно для збільшення FoV. Для прикладу, пристрій Meta2 використовує цей тип дзеркала для досягнення великого FoV та отримання хорошої роздільної здатності дисплея. Хвилеводна решітка, яка базується на голографічній та дифракційній оптиці, є найновішою технологією, доступною на ринку. Дифракційна решітка працює, імітуючи те, що відбувається в лінзі: у цій технології світло зміщується з тонким шаром пластику або скла. Світлові промені відбиваються через канал вгору до ока користувача. Таке рішення було прийнято сімейством пристроїв HoloLens. В останні роки велика кількість компаній розробила власні пристрої доповненої реальності.

Спочатку Google представив Google Glass; Wuzix випустив на ринок широкий набір окулярів, як автономних, так і тих, що потребують хост-пристрою. Microsoft розробила власні рішення, і варто згадати продукти Meta2 та HoloLens. Meta2 не має вбудованих обчислювальних можливостей; навпаки, Microsoft HoloLens та деякі моделі сімейства окулярів Vuzix інтегрують обчислювальну потужність. Для прикладу, Microsoft HoloLens використовує обчислювальну потужність процесора Intel Atom, який також використовується розумними окулярами Vuzix M300. З одного боку, Meta2 - це гарнітури, які покладаються на зовнішній ПК для запуску будь-яких типів програм, з іншого боку, Microsoft HoloLens можна визначити як автономний комп'ютер, який експериментатор може носити на голові. Розумні окуляри Vuzix M300 підтримують операційну систему Android і, отже, підтримують не лише спеціальні програми для окулярів, але й мобільні програми. HoloLens від Microsoft використовує голографічні лінзи, засновані на принципі хвилеводу; з іншого боку, такі пристрої, як Meta2, працюють завдяки опуклому дзеркалу, яке необхідно для проектування зображень безпосередньо перед полем зору експериментатора.

Якщо порівняти ці два пристрої, то виявиться, що рішення, прийняте Meta2, може гарантувати поле зору 90 градусів, що корисно для отримання кращого враження від імерсивного зображення порівняно з HoloLens. Основним

					БР.ІІІ - 49.00.00.000 ПЗ	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

обмежувальним фактором HoloLens є поле зору 30 градусів: це правда, що отримується стереографічний 3D-зображення, але експериментатор повинен спрямовувати свої очі у фронтальний напрямок через погане поле зору. Крім того, більше поле зору Meta2 може бути небезпечним під час використання в польових умовах, оскільки поле зору користувача може бути закрите голограмами. Як найважливіший пристрій Vuzix, що зараз представлений на ринку, розумні окуляри Vuzix M300 є монокулярними, з невеликим екраном, який займає не все поле зору, а лише невелике вікно.

Ще однією відмінністю між Meta2 та HoloLens, яку слід виділити, є керування жестами. Meta2 демонструє чудову продуктивність, оскільки жести, реалізовані в ньому, є більш інтуїтивними, ніж рухи, необхідні для керування HoloLens. Автори оцінили обидва ці пристрої, і ми вважаємо, що рішення Meta2, засноване на використанні всієї руки для обробки голограм та кінчика пальця для вибору та переміщення значків на екрані, є ефективнішим, ніж те, що пропонує HoloLens. У HoloLens користувач повинен виконувати жест, який у літературі описується як «цвітіння», оскільки він імітує розпускання квітів: це досить незручний та неінтуїтивний рух. Альтернативний спосіб керування вибором в HoloLens базується на русі пальця «повітряного постукування»: цей вид керування також викликає критику, на особисту думку авторів.

Одна з головних проблем цього жесту полягає в тому, що він добре фіксується, якщо його виконувати за допомогою вказівного та великого пальців. Крім того, вказівний палець повинні бути прямо паралельними та перед датчиками HoloLens у неприродному положенні, оскільки пальці зазвичай злегка вигнуті. Зрештою, «постукування повітрям» не завжди зручне для користувача, оскільки воно змушує користувача тримати руку прямо перед головою, і іноді цього положення може бути важко досягти в промисловому застосуванні. Розумні окуляри Vuzix M300 постачаються з програмним забезпеченням, сумісним з Android та iOS, яке можна встановити на планшети або мобільні телефони, щоб вони могли функціонувати як контролери для окулярів: це тому, що багатьом мобільним програмам може знадобитися інтерфейс людина-

					БР.ІІІ - 49.00.00.000 ПЗ	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

машина, такий як сенсорна панель або клавіатура.

### **Вбудовані системи та інструменти відстеження**

Система відстеження підкреслює, що пристрої, проаналізовані в останньому розділі, відрізняються. HTC Vive має шість ступенів свободи завдяки ІЧ- датчику, який може відстежувати на 360 градусів та охоплювати площу 4,5 x 4,5 м, де користувач може вільно пересуватися; Oculus Rift оснащений аналогічною кількістю датчиків (ІЧ-світлодіодів), які можуть відстежувати користувача на 360 градусів, але в меншій площі, визначеній 2,5 квадратними метрами. З іншого боку, HoloLens не має обмежень простору, оскільки його датчик постійно відображає ігрову зону. Це величезна перевага, оскільки HoloLens не потребує налаштування області. Його система відстеження базується на двох «камерах розуміння навколишнього середовища» з кожного боку. « Камери розуміння навколишнього середовища» у поєднанні з датчиком глибини забезпечують відстеження голови та виявлення навколишнього середовища.

Ця остання функція дозволяє користувачеві позиціонувати об'єкт у 3D-просторі. Meta2 виконує подібну функцію відстеження порівняно з HoloLens, оскільки вона базується на веб-камерах, датчиках глибини та IMU. Об'єднання даних здійснюється за допомогою алгоритму, подібного до SLAM (одночасна локалізація та картографування) [ 16 ]. Окрім цих вбудованих пристроїв, існують чисті датчики, такі як Microsoft Kinect, Leap Motion та 3D-сканер Occipital Structure Sensor. Ці пристрої потребують інтеграції з комп'ютером, але за умови правильного підключення можуть досягати аналогічних результатів за доступною ціною. Варто зазначити, що ці пристрої старіші за вбудовані шоломи та зробили розробку програмного забезпечення можливою ще на ранніх етапах.

Зокрема, Microsoft Kinect є прямим зв'язком з Microsoft HoloLens, оскільки використовує схожу технологію (веб-камеру та ІЧ-датчик). Більше того, алгоритми жестів використовують знання, отримані завдяки Leap Motion, пристрою, розробленому для розпізнавання рук для взаємодії з об'єктами. Цей пристрій може точно розпізнавати кожен палець людської руки, пов'язуючи

					БР.ІІІ - 49.00.00.000 ПЗ	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

завдання з кожним рухом. Це можливо завдяки поєднанню даних з двох камер та трьох ІЧ-датчиків. Завдяки своїй точності в діапазоні 0,40 м над датчиком, Leap Motion часто використовувався як допоміжний інструмент для старих шоломів, щоб мати точнішу інтеграцію з доповненим середовищем [ 17 ]. Structure Sensor – це подібний пристрій, який можна підключити до широкого спектру портативних пристроїв, таких як смартфони та планшети: це перший 3D-датчик, розроблений спеціально для мобільних пристроїв. Можна робити детальні, повнокольорові 3D-сканування об'єктів або людей у режимі реального часу, підключивши датчик до сумісного мобільного пристрою. Його можна використовувати для VR та змішаної реальності за допомогою наданого SDK в Unity 3D. Пристрій Structure Sensor можна використовувати для отримання позиційного відстеження, подібно до HTC Vive, без необхідності налаштування або калібрування стаціонарних маяків, щоб не вимагати високої обчислювальної потужності.

Майбутня тенденція еволюції апаратного забезпечення доповненої реальності вказує на скорочення розриву між віртуальним та автентичним світом. Більше того, більше уваги буде приділено можливості реалізації концепції цифрового двійника [ 18 ]: майбутнє обладнання дозволить надійно перемикатися в режимі реального часу між справжнім реальним об'єктом та його віртуальним факсиміле. Це полегшить взаємодію людини та робота, прийме кращі інженерні рішення з використанням даних реального світу та підтримає системи управління сповіщеннями в режимі реального часу для підвищення безпеки [ 19 ].

#### 1.4 Висновки по розділу

Доповнена реальність, незважаючи на активні дослідження, поки що має обмежене впровадження в Індустрії 4.0, проте її потенціал для практичного застосування у виробництві та технічному обслуговуванні є значним і потребує подальшого розвитку та адаптації.

					БР.ІІІ - 49.00.00.000 ПЗ	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

учасний стан доповненої реальності демонструє широкий вибір програмних інструментів для створення AR-додатків, однак для промислового використання залишаються виклики, пов'язані з обмеженнями графічних рушіїв та недостатньою інтеграцією з інженерними САПР-системами.

Огляд обладнання доповненої реальності свідчить про значну різноманітність та швидке розвиток технологій НМД, де кожен тип пристрою має свої переваги для конкретних застосувань, а майбутнє спрямоване на інтеграцію з концепцією цифрових двійників та покращення взаємодії людини з машиною.

					БР.ІІІ - 49.00.00.000 ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## РОЗДІЛ 2 . МЕТОДОЛОГІЯ РОЗРОБКИ ТА ІНЖЕНЕРНИЙ ПІДХІД ДО AR-СИСТЕМ

### 2.1 Матеріали дослідження та експериментальні методи

Система, розроблена для програмування роботів за допомогою доповненої реальності (AR), була розділена на дві різні підсистеми: ту, де збиралися дані про шлях, і ту, яка відповідає за перетворення координат руки на мову робота та їх надсилання роботу. Головною метою першої було забезпечення простого та зручного інтерфейсу, який мав бути інтуїтивно зрозумілим і не міг містити жодних відволікаючих факторів, інакше оператор міг би заплутатися через надмірну інформацію. Друга була зосереджена на розробці трансляторів, які перетворювали отримані координати руки на різні мови програмування роботів. Оскільки для реалізації використовувалися роботи Universal Robots UR5 та ABB IRB 2600, розроблені транслятори могли генерувати код для мов URScript та RAPID. Було вирішено розробляти ці транслятори в операційній системі роботів (ROS). Рисунок. 1 представляє огляд системи.

- Рухи рук були фіксовані за допомогою Microsoft HoloLens 2 (HL2) з використанням платформ Unity та Visual Studio для програмування застосунку, а потім дані були належним чином передані через тему операційної системи робота (ROS);
- У ROS деякі вузли могли підписуватися на дані, отримані в певній темі, та перетворювати список отриманих координат на мову робота перед надсиланням роботу;
- Зрештою, вузол ROS підключився до робота через сокет, і згенерована програма була надіслана роботу, який виконав раніше записаний рух.

					БР.ІІІ - 49.00.00.000 ПЗ	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 2.1 Огляд системи.

Взаємодію з користувачем було розроблено максимально простою. Тому для її реалізації було обрано використання спливаючих вікон. Таким чином, вони завжди з'являлися посередині поля зору користувача, а не були закріплені в одному місці, як це трапляється з кнопками, що могло викликати певну плутанину у користувача. Крім того, коли з'являлися ці спливаючі вікна, вони видавали звук, попереджаючи користувача про зміну стану програми.

Запропонована методологія показана на рис. 2.3 На першому кроці користувач повинен ознайомитися з рухом робота в середовищі. На наступному кроці користувач вручну генерує об'єм без зіткнень (CFV), використовуючи об'єм сфери, прикріпленої до зонда (Розділ III, частина II). Потім шлях(и) планується(ються) шляхом інтерактивного вибору допустимих початкових та проміжних цільових конфігурацій послідовно. Алгоритм пошуку променя (Розділ I, частина I) використовується для автоматичної генерації відповідного(их) шляху(ів) без зіткнень для суглобів робота (на відміну від одноразової прямої демонстрації). Далі ця інформація використовується для моделювання віртуального робота, який виконує шлях(и) в середовищі, щоб користувач міг візуально оцінити плавність шляху(ів) та будь-які потенційні зіткнення. Якщо результати незадовільні, користувач може повторити процес.

Запропонований підхід включає здатність людини швидко планувати шляхи без зіткнень. Переміщуючи зонд кінцевого ефектора, користувач може переміщувати віртуального робота в середовищі, що складається з реальних об'єктів, для виконання планування шляху. CFV, яка визначає підмножину всього вільного простору, що стосується завдання, генерується вручну, подібно до того, як художник «малює на 3D-полотні». Цей підхід відрізняється від

					БР.ІІІ - 49.00.00.000 ПЗ	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

використання кількох прямих демонстрацій для визначення вільного простору, прийнятого Делсоном та Вестом [15, 16]. CFV дозволяє зосередити пошук шляхів лише на областях, які вважаються важливими для завдань. На відміну від офлайн-планувальників, CFV уникає необхідності моделювати об'єкти середовища, оскільки ця інформація неявно міститься в CFV. Таким чином, робот не зіткнеться з жодними перешкодами в середовищі, якщо залишиться в межах об'єму.

Методологія спрямована на стабільне та надійніше створення гладких траєкторій порівняно зі траєкторіями, демонстрованими безпосередньо людиною. Тому використання однієї прямої демонстрації (використання зонда кінцевого ефектора для переміщення робота вздовж траєкторії) як остаточної траєкторії є небажаним. Це пояснюється тим, що роздільна здатність та гладкість узагальнених профілів координат для результуючої траєкторії будуть нестабільними через одну з причин або їх комбінацію: (1) нестабільність рухів руки, (2) нестабільність частоти дискретизації та (3) низька частота дискретизації. Хоча згладжування може бути виконано як крок постобробки, важко визначити відповідний рівень гладкості, щоб гарантувати, що траєкторія не містить колізій [15]. З цих причин траєкторії без колізій, обмежені CFV, що генеруються користувачами, автоматично генеруються за допомогою алгоритму пошуку променя.

					БР.ІІІ - 49.00.00.000 ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

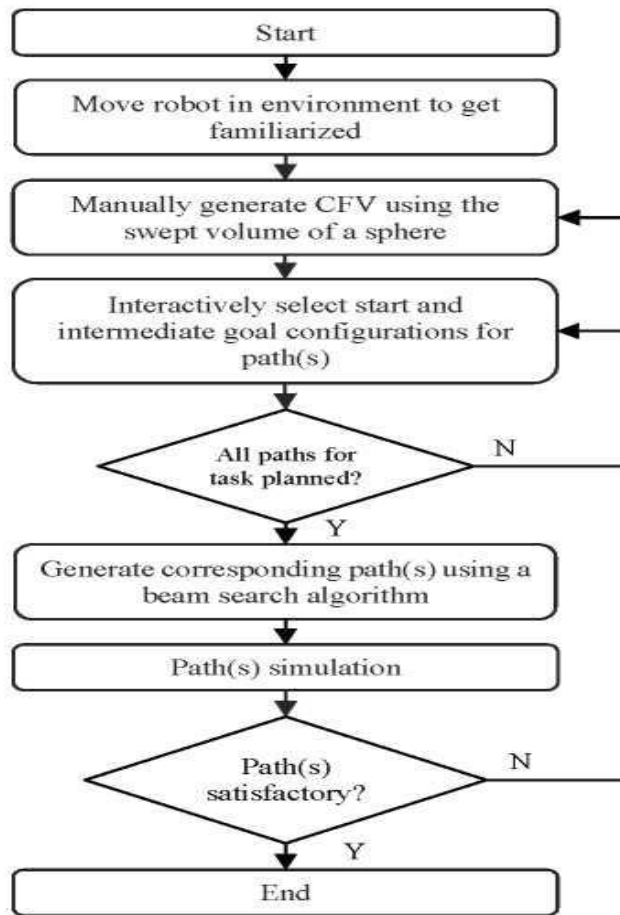


Рисунок 2.2 Запропонована методологія для завдань I класу.

## 2.2 Архітектура та реалізація програмування AR-роботів

Доповнена реальність (AR) здобула популярність у робототехніці завдяки своїй здатності надавати контекстну інформацію на місці в середовищі користувача, потенційно покращуючи ситуаційну обізнаність, зручність використання системи та загальну взаємодію з користувачем (див. інші роботи [ 1 , 5 , 7] для нещодавніх досліджень робототехніки змішаної реальності). Попередні дослідження досліджували різні форми доповненої реальності (AR), включаючи 2D-дисплеї з накладанням, проєкційні дисплеї та планшети доповненої реальності. 2D-дисплеї з накладанням представляють фіксоване зображення робочого простору робота на 2D-екрані комп'ютера, поверх якого можна відображати контекстну інформацію [ 2 , 13 ].

Проекційні дисплеї безпосередньо проєктують 2D-візуалізації в робочий простір користувача, часто включаючи механізми взаємодії, такі як відстеження

					БР.ІІІ - 49.00.00.000 ПЗ	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

жестів, інтелектуальні сенсорні столи або програмні палички [ 3 , 20 , 21, 5]. Планшети пропонують мобільність, накладаючи AR-контент на зображення з камери планшета, дозволяючи користувачам спостерігати за сценою з будь-якої точки зору [17 , 26]. Використовуючи переваги AR, що виникають завдяки накладенню віртуальної інформації на реальний світ, кожен із цих способів перегляду покращив процес програмування роботів для користувачів. Однак 2D-накладання мають обмежене поле зору, а також обмежують здатність користувача передавати параметри глибини, а візуальний зворотний зв'язок відображається окремо від реального світу. Проекційні дисплеї важко переносити в нові середовища, і вони обмежують мобільність, тоді як планшети займають руки користувача та обмежують інтерфейс невеликим розміром екрана.

Тому для вирішення цих проблем використовуються ARHMD. ARHMD звільняють руки користувача від апаратного забезпечення, сприяють необмеженій мобільності та взаємодії в усьому робочому просторі, а також надають інформацію безпосередньо в контексті реального світу користувача. Як результат, ARHMD використовуються, щоб допомогти промисловим працівникам визначити траєкторії роботів та примітиви дій [ 18 , 25 , 8 ]. ARHMD також використовуються для передачі інформації низького рівня від датчиків роботів експертам [ 19 , 5 ] та для полегшення налагодження програм роботів для досвідчених робототехніків [ 2 ]. Однак такі системи були розроблені для конкретних професійних працівників, а не для неекспертних кінцевих користувачів. В інших дослідженнях намір руху робота повідомлявся користувачам через цифрового двійника робота , але не пропонує простий спосіб створення реактивних дій робота для завдань HRC [ 7, 8 ]. Наш підхід до розробки PProgramAR натхненний роботою Kragic та ін. [ 26 ], Bambusek та ін. [ 7 ] та Gadre та ін. [ 29 ], які використовують AR, щоб допомогти користувачам у виконанні спільних завдань з роботами, до чого ми додаємо призму TAP для визначення реактивної поведінки роботів.

					БР.ІІІ - 49.00.00.000 ПЗ	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

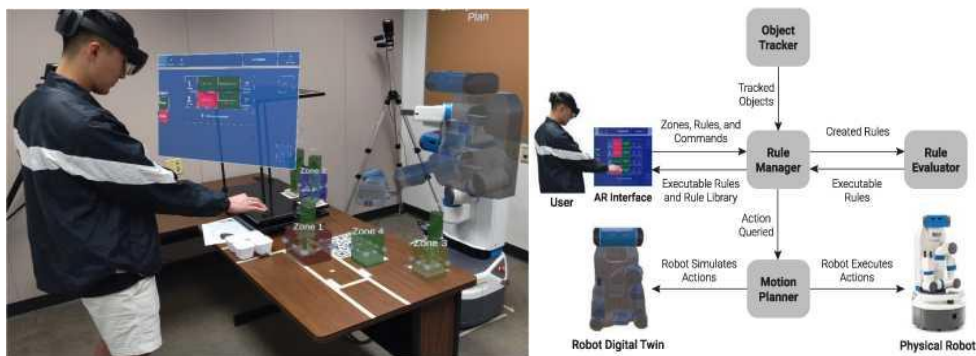


Рисунок 2.3 Ми представляємо PRogramAR, систему доповненої реальності  
ТАР

яка дозволяє користувачам, що не є експертами, програмувати реактивну поведінку роботів. Ми описуємо переваги поєднання доповненої реальності з ТАР, щоб обґрунтувати розробку програми в контексті її виконання (а), як це реалізовано в архітектурі нашої системи (б).

### 2.3 Проектування інтерактивної AR-системи управління

PROgramAR розроблено для спрощення програмування роботів-маніпуляторів шляхом застосування контекстуалізації на основі доповненої реальності (AR) та оцінки правил на основі моделювання в поєднанні з перевагами ТАР. Наша система, яка спирається на прототипи та результати попередніх дослідницьких проектів (наприклад, [ 9 , 15 , 8 , 2 ]), складається з семи компонентів: (1) Інтерфейс доповненої реальності (AR), (2) Менеджер правил, (3) Відстежувач об'єктів, (4) Оцінювач правил, (5) Планувальник рухів, (6) Фізичний робот та (6) Цифровий двійник робота (Рисунок 1 (б)). Приклад повного робочого процесу з нашої системної валідації (Розділ 1.4 ) зображено на рисунку 2.2 У наступних підрозділах ми опишемо кожен компонент нашого системного проекту.

Користувачі взаємодіють з PRgramAR через інтерфейс доповненої реальності (AR-інтерфейс), вбудований безпосередньо в робоче середовище людини-робота (див. рисунок 2.1 (а)). Цей інтерфейс допомагає користувачам

створювати правила, що визначаються тригерами та парними діями, що диктують, коли і як робот повинен виконувати завдання. Щоб закріпити правила ТАР у реальному світі, користувачі створюють, переміщують, змінюють розмір та видаляють 3D-зони в реальному середовищі, щоб позначити області, що стосуються тригерів або дій (після створення кожна зона має різний попередньо встановлений колір та унікальний номер зони, що відображається над нею для зручності). Використовуючи 3D-зони, користувачі отримують повну виразність, оскільки вони можуть передавати інформацію про глибину в 3D-просторах, таких як полиці. Це відрізняється від попередньої роботи, яка спиралася на 2D-зони, що обмежувало можливості користувачів вказувати інформацію про глибину. Завдяки нашому інтерфейсу PRgramAR підтримує як традиційні процеси програмування, де користувачі визначають свою повну програму перед виконанням, так і програмування в реальному часі. У програмуванні в реальному часі користувачі можуть програмувати правила ТАР, поки робот планує (незалежно від часу планування) або виконує дії, хоча редагування може вимагати перепланування.

PROgramAR наразі підтримує об'єднання тригерів та дій у два типи правил ТАР, які підтримують ментальну модель програми користувача: правила «Якщо-Тоді», як раніше підтримували Senft та ін.

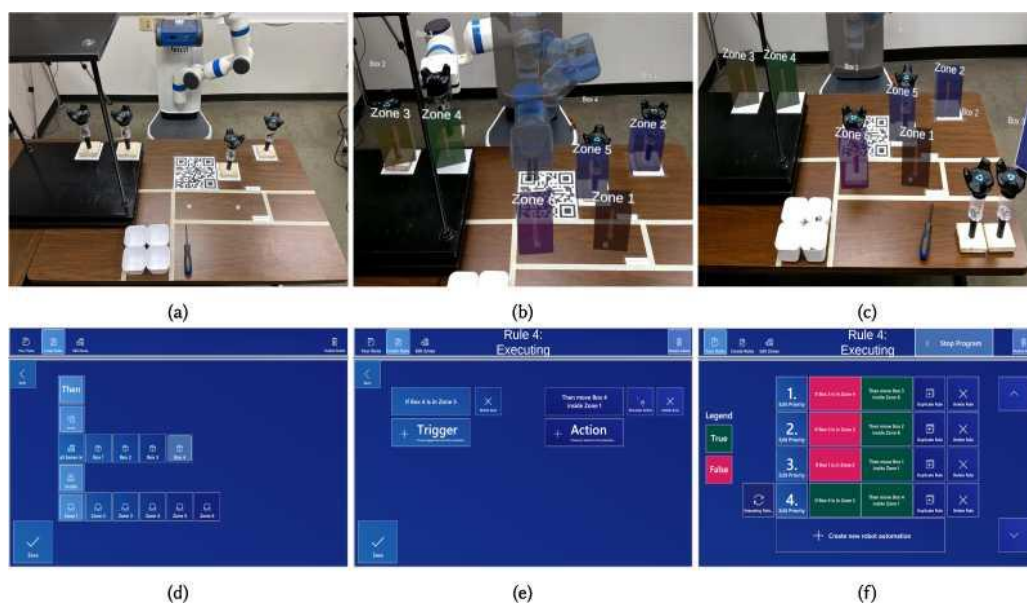


Рисунок 2.4 Учасники почали з усіх об'єктів у робочому просторі робота (а)

					БР.ІІІ - 49.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

потім створили зони для кожного блоку та кожної позиції місця (b). Метою було перемістити блоки в зону обміну, щоб учасник міг зібрати деталі всередині блоків (c). Учасники використовували інтерфейс доповненої реальності для створення різних правил ТАР, які слід було виконати на роботу (df).

Тригери параметризуються об'єктами, розпізнаними елементами, відомими системі, умови (наприклад, «є», «в») та зони. У нашій системі наразі підтримувані тригери включають випадки, коли (1) об'єкти знаходяться в зоні (наприклад, Коробка 1 знаходиться в Зоні 2) або (2) об'єкти не знаходяться в зоні (наприклад, Коробка 2 не знаходиться в Зоні 3). Дії параметризовані дією робота (наприклад, «перемістити»), об'єкти та зони. Через обмежені можливості нашого робота єдиною підтримуваною дією є переміщення об'єкта із зони або його поточного розташування в іншу зону (наприклад, перемістити Коробку 2 всередину Зони 3). Коли визначений тригер має значення істинності, правило «Якщо-тоді» виконує свої дії один раз, перш ніж перейти до наступного правила. Правило «Поки-виконання» виконує пов'язані з ним дії безперервно, поки умова є істинною, перш ніж перейти до наступного правила. Наприклад, у сценарії, коли потрібно перенести кілька об'єктів з однієї зони в іншу, правило «Якщо-тоді» може перемістити лише один об'єкт, перш ніж перейти до наступного правила. Навпаки, правило «Поки-виконання» може перемістити всі об'єкти, перш ніж перейти до виконання наступного правила. Підсумовуючи, поточні правила, тригери та дії, що підтримуються PRgramAR, такі:

- Правила : Якщо-Тоді та Поки-Ді
- Тригер, об'єкти, присутні в зоні
- Тригер, Відсутність об'єктів у зоні
- Дія, Переміщення об'єктів з однієї зони всередину іншої зони
- Дія, переміщення об'єктів з будь-якого місця всередину зони.

Найпростіше правило складатиметься з одного тригера, що містить одну пару об'єкт-зона, та однієї дії, також з однією парою об'єкт-зона. Наприклад, правило може мати вигляд: «Якщо [Поле 1] знаходиться [в] [Зоні 1], то [перемістити] [Поле 1] всередину [Зони 2]». Користувачі також можуть

					БР.ІІІ - 49.00.00.000 ПЗ	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

вказувати правила довільної складності, використовуючи додаткові умови, з'єднані логічними операторами «І» або «АБО» у тригерах правил.

Кожен тригер також може мати кілька дій, з'єднаних операторами "І" . Подібно до SLP [ 7 ], PProgramAR дозволяє користувачам визначати, редагувати та видаляти правила TAP у будь-який час (до, під час або після виконання робота). Це створює середовище програмування в реальному часі , яке допомагає з налагодженням та поступовим створенням реактивних програм робіт під час виконання. На відміну від SLP [ 7 ], який пропонує користувачам виправити конфлікти пріоритетів правил, PProgramAR виконує правила TAP у визначеному користувачем порядку, який можна налаштувати за потреби (див . Рисунок 2 (f)). Крім того, PProgramAR використовує AR для використання всіх трьох вимірів робочого простору користувача. Це дозволяє користувачам вказувати програми для розміщення коробки на полиці або, в майбутніх реальних сценаріях, переміщення тарілки з полиці для посуду в шафу. Такі програми складно виразити в SLP [ 73 ], який спирається на вигляд зверху вниз, оскільки йому бракує сприйняття глибини, що ускладнює точну передачу просторових зв'язків.

Коли користувачі створюють правила, вони зберігаються в бібліотеці в Менеджері правил, який взаємодіє з іншими компонентами системи для керування параметрами правил, доступними зонами та відстежуваними об'єктами, одночасно надсилаючи оновлення до інтерфейсу AR. Однією з ключових функцій, яка виходить за рамки попередніх систем TAP, таких як SLP [ 7 ] або Leonardi et al. [ 4 ], є Оцінювач правил. Цей компонент постійно перевіряє, чи поточний стан світу відповідає умовам правила. Потім Менеджер правил надсилає оновлення до інтерфейсу AR, щоб відобразити стан кожного правила. Мета цього зворотного зв'язку - допомогти користувачам налагодити створені правила, чітко вказуючи, чи слід виконувати правило, чи ні. Якщо результат Оцінювача правил суперечить очікуванням користувача, йому може знадобитися або відредагувати свої правила, або перевірити поточний стан світу чи віртуальних зон. Тригери та дії, які оцінюються як «true» і тому знаходяться в черзі на виконання, позначені зеленим кольором. Правила, які оцінюються як

					БР.ІІІ - 49.00.00.000 ПЗ	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

«false» і тому не будуть виконані, позначені червоним кольором (див. рис. 2 (f)). Червоно-зелені відтінки були обрані з палітри, доступної для дальтоніків, щоб забезпечити рівень контрасту, який легко розрізняють усі користувачі [ 6 ].

**AR- апарат та відстеження.** PRogramAR використовує ARHMD для представлення користувачам основного інтерфейсу AR та візуалізацій. Хоча наша поточна реалізація використовує HoloLens 2, PRogramAR побудовано на основі інтерфейсу протоколу додатків (API) OpenXR, який дозволяє будь-якому сумісному пристрою змішаної реальності, такому як MagicLeap або Meta Quest, запускати наш застосунок. PRogramAR спирається на наявність одного опорного маркера, розміщеного в робочій області, для вирівнювання координатних систем віртуального середовища з реальним світом. Трекер об'єктів наразі спирається на зовнішні маркери (у нашій валідації ми використовували чотири трекери Vive з базовими станціями маяків); у майбутньому це може бути виконано безпосередньо за допомогою візуальної обробки сигналів камер від ARHMD та/або робота. Ми отримали матриці переміщення та обертання, необхідні для вирівнювання та калібрування наших різних систем координат (ARHMD, відстеження об'єктів та робота), як описано Піром та ін. [ 65 ], таким чином, щоб дії користувача та специфікації програми могли бути точно відображені в планах робота, а візуальний зворотний зв'язок AR відображався належним чином.

## 2.4 Висновки по розділу

Запропонована система програмування роботів за допомогою AR забезпечує інтуїтивну взаємодію з користувачем і дозволяє надійно створювати гладкі, безколізійні траєкторії, використовуючи гнучке планування шляхів у реальному середовищі без необхідності попереднього моделювання. Архітектура PRogramAR демонструє ефективність поєднання доповненої реальності та ТАР, забезпечуючи інтуїтивне програмування реактивної поведінки роботів навіть для неекспертних користувачів у реальному контексті робочого середовища. PRogramAR забезпечує інтуїтивне та гнучке середовище для інтерактивного програмування роботів у реальному часі.

					БР.ІІІ - 49.00.00.000 ПЗ	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## РОЗДІЛ 3. ІНТЕГРАЦІЯ ДОПОВНЕНОЇ РЕАЛЬНОСТІ У ПРОГРАМУВАННЯ ТА ІНЖЕНЕРНІ СИСТЕМИ

### 3.1 AR-платформи для програмування робототехнічних систем

Інтерфейс був розділений на три різні частини; перша була місцем, де користувач вибирав робота для програмування, друга частина визначала систему координат робота, а третя визначала робоче середовище робота. Для цієї роботи було обрано два різні типи роботів для тестування розробленої системи: колаборативний (Universal Robots UR5) та традиційний промисловий робот (ABB IRB 2600). Метою було інтегрувати два різні типи роботів та продемонструвати, що запропонована методологія програмування шляхом демонстрації може бути узагальнена для будь-якого типу промислового маніпулятора, що спрощує роботу оператора у виробничому цеху.

Щоб розрізнити тип робота, якого користувач хоче запрограмувати, під час запуску програми відстеження з'являлося спливаюче діалогове вікно з проханням вибрати тип робота. Цей вибір впливав на майбутні конфігурації програми, такі як робоче середовище робота.

Щоб мати змогу правильно запрограмувати робота, системи координат робота та HoloLens 2 мали збігатися. Система координат HoloLens 2 визначалася під час запуску програми на певній відстані від гарнітури, і вона відрізнялася кожного разу, коли програма запускалася. Щоб вирішити цю проблему, користувач мав вручну визначити систему координат. Програмне забезпечення HoloLens 2 не дозволяло нам визначити другу систему координат, тому знайдений метод вирішення цієї проблеми полягав у розміщенні об'єкта в потрібній позі, а потім оцінці координат руки відносно цього об'єкта, а не відносно гарнітури. Обраним об'єктом був Gizmo, який представляв собою тривісний орієнтир і міг перевірити, чи система координат була визначена правильно.

HoloLens 2 мав інерціальний вимірювальний блок (IMU), який визначав

					БР.ІІІ - 49.00.00.000 ПЗ	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

вісь Y завжди спрямованою вгору (незважаючи на орієнтацію, в якій було запущено програму), що дозволяло визначити систему координат лише за двома точками - початком координат та орієнтацією осі Z (рис. 3.1). Щоб мінімізувати помилки збігу обох систем координат, було важливо враховувати, що точки визначалися проектованою голограмою руки, а не реальною рукою. Підсумовуючи, система координат програми була визначена шляхом розміщення Gizmo в положенні першої точки, визначеної користувачем, та застосування повороту так, щоб вісь Y була спрямована вперед. Таким чином, система координат, визначена в інтерфейсі, була такою, де площина YZ відповідала базовій площині робота, а вісь X була спрямована вгору.

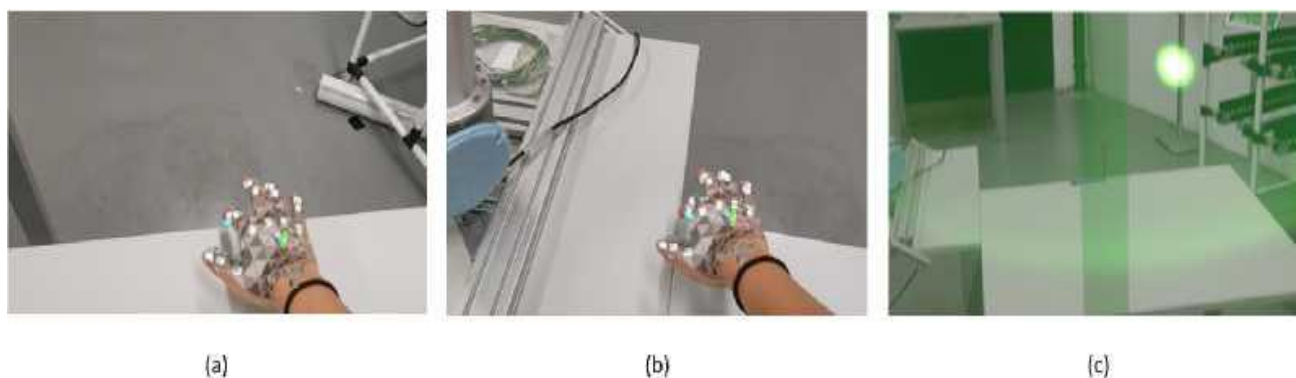


Рисунок 3.1 Визначення системи координат: ( а ) палець, що позначає місце початку координат. ( б ) Палець, що позначає точку, яка визначатиме орієнтацію опорної системи. ( с ) Налаштування завершено.

У попередньому дослідженні [ 13 ] експериментально оцінювалася точність відстеження руки Hololens 2 за допомогою системи захоплення руху OptiTrack (система з субміліметровою точністю) як еталонного показника. Експерименти проводилися різними користувачами для оцінки поведінки Hololens 2 з різними розмірами та формами рук, а також різними рухами та швидкостями рук. Результати продемонстрували точність від 1 до 3 см, що вказує на те, що ця система підходить для застосувань, які не потребують високих стандартів точності.

Щоб запобігти виконанню оператором рухів, які робот не міг відтворити,

					БР.ІІІ - 49.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

у навколишнє середовище проектувалася голограма робочого простору робота. Окрім цієї візуальної допомоги, додаток також відстежував рухи оператора та попереджав його/її про порушення робочого простору робота.

Робоче середовище робота було адаптовано відповідно до того, якого робота визначав користувач, а саме, розмірів об'єктів, що обмежували робочу область. Робоче середовище проектувалося, коли користувач завершував визначення системи координат, і матеріали об'єкта були зеленими, лише тоді, коли користувач здійснював запис, а коли обмеження порушувалися, матеріали ставали червоними, повертаючись до зеленого кольору після підтвердження в діалоговому вікні необхідності виконання ще одного запису.

Для Universal Robots UR5 робоче місце робота було досить легко намалювати (рис. 3.1 а ). Отже, для створення робочого простору було використано циліндр усередині сфери. Діаметр сфери становив 1,7 м, оскільки це була рекомендована зона досяжності, а циліндр мав діаметр 0,151 м та загальну висоту 1,621 м. Доступним простором для запису руху був той, що перетинав область зовні циліндра та всередині сфери.

Користувач виходив з робочої області робота, коли відстань від кінчика його/її правого вказівного пальця до Гізмо (розрахована за рівнянням ( 1 ) ) перевищувала 0,85 м (радіус сфери) або була меншою за 0,0755 м (радіус циліндра). Розрахунок, щоб перевірити, чи користувач увійшов у циліндр, проводився лише за вимірами x та z, оскільки, оскільки об'єкт був циліндром, висота була обмежена сферою

$$Sphere\_distance = \sqrt{x_{Gizmo}^2 + y_{Gizmo}^2 + z_{Gizmo}^2}$$

$$Cylinder\_distance = \sqrt{x_{Gizmo}^2 + z_{Gizmo}^2}$$

де  $XG_{izmo}$ ,  $yG_{izmo}$ ,  $ZG_{izmo}$  – координати кінчика вказівного пальця правої руки користувача відносно Гізмо.

Робоче середовище ABB IRB 2600 було не таким простим, як UR5. Щоб спростити малювання 3D-об'єкта, що представляє робоче середовище, робоче середовище робота було апроксимовано двома сферами, одна всередині іншої,

як показано на рисунку. 3 б . Діаметри сфер були встановлені на рівні 2,90 м для максимальної межі та 0,94 м для мінімальної межі.

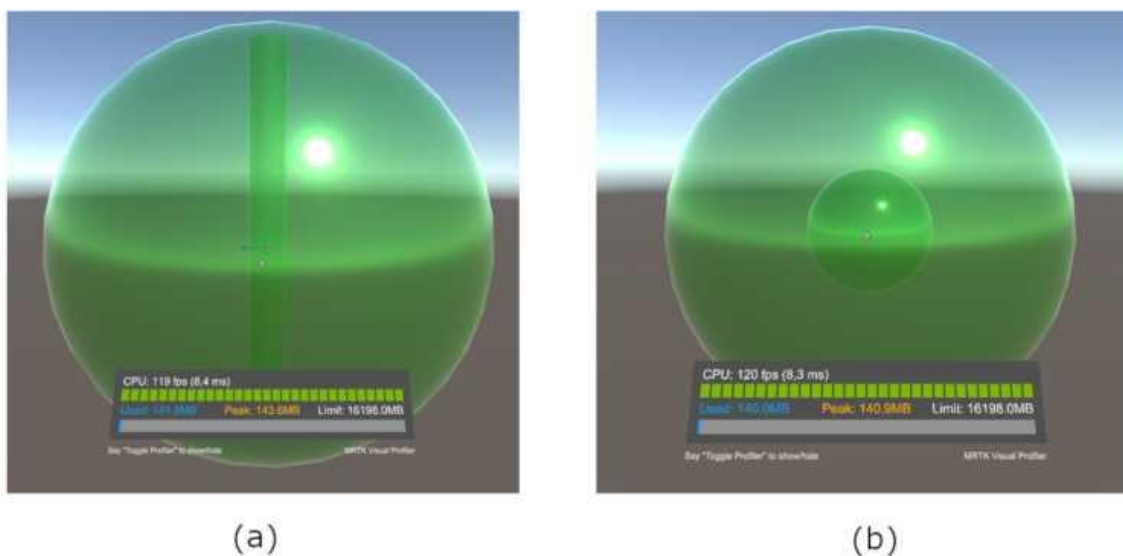


Рисунок 3.2 Проектований робочий простір: ( а ) Universal Robots UR5. ( б ) ABB IRB 2600.

Метод, який використовувався для перевірки того, чи записував користувач рух у робочій області робота, був подібним до того, що використовувався для UR5, але, оскільки в цьому випадку робоча область складається з двох сфер, рівняння, яке використовувалося для розрахунку максимальної та мінімальної відстані, було рівнянням ( 1 ) . Варто наголосити на тому, що ця конструкція була наближенням моделі робота, оскільки малювання 3D-об'єкта не було основою цієї роботи.

### 3.2 Побудова та візуалізація траєкторії за допомогою AR

Цей додаток вимагав максимальної простоти та гнучкості. У цьому сенсі використання кнопок було уникнуто, оскільки це могло б призвести до певної плутанини для оператора. Тому перевага була надана використанню жестів. Для зручності для початку та завершення запису шляху було обрано жест Air Tap [ 14 ]. Цей рух починається з розкриття руки, потім торкання великого пальця

					БР.ІІІ - 49.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

вказівним пальцем і, нарешті, знову спрямовання вказівного пальця прямо вгору до стелі. Алгоритм міг розпізнавати жести Air Tap обох рук (правої та лівої), тому користувач міг вибрати бажану.

Щоб спростити усвідомлення користувачем стану системи, на кінчик правого вказівного пальця було додано невелику сферу; вона була червоного кольору, коли система не записувала, і зеленого під час запису. Крім того, щоб покращити сприйняття записаного руху, під час виконання користувачем руху система малювала лінію, що представляє шлях. Таким чином, коли користувач закінчував запис, він/вона міг перевірити, чи рух було виконано правильно, чи ні, і його потрібно повторити. На відміну від типових матеріалів, що зустрічаються в промислових умовах, записаний шлях представлений яскраво-рожевим кольором. Рисунок На рисунку зображено приклади двох записаних шляхів.

Координати, які потрібно надіслати роботу, це ті, що відносяться до об'єкта Gizmo , що представляють початок координат робота. Функція, розроблена для виконання перетворення, мала два основні кроки: перший полягав у обчисленні вектора відстані між абсолютною координатою ( point2transform) та положенням Gizmo (origin Gizmo \_f rame ) – рівняння ( 3 ) , а другий – у обчисленні відносного положення (relative\_coordinates), як показано в рівнянні ( 4 ) , на добуток матриці перетворення обертання ( $R_{Gizmo\_frame}$ ) системи відліку Gizmo та vector\_distance, плюс вектор переміщення Gizmo ( $T_{Gizmo\_frame}$ ). Варто зазначити , що система координат HoloLens 2 була лівосторонньою, тоді як та, що використовувалася в роботу, була правосторонньою.



(a)



(b)

Рисунок 3.3 Приклад записаних шляхів: ( a ) трикутник. ( b ) Квадрат.

					БР.ІІІ - 49.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

Отже, одну з осей було інвертовано шляхом множення на -1; таким чином, система відліку застосунку призвела до правостороннього положення.

$$\text{vector\_distance} = \text{point2transform} - \text{origin}_{\text{Gizmo\_frame}}$$

$$\text{relative\_coordinates} = R_{\text{Gizmo\_frame}} \cdot \text{vector\_distance} + T_{\text{Gizmo\_frame}}$$

Після збору координат шляху, для підвищення рівня абстракції та сумісності, їх було надіслано до операційної системи роботів (ROS), оскільки драйвери ROS вже існують для кількох моделей роботів.

Для реалізації двох програмних трансляторів, по одному для кожної необхідної мови програмування роботів (URScript та RAPID), було створено ROS-пакет. Потрібно було внести ще одне коригування до координат, оскільки в застосунку HoloLens 2 система координат була визначена так, що вісь X була спрямована вгору, тоді як система координат роботів мала вісь Z, спрямовану вгору. Таким чином, координати були зіставлені, як показано в рівнянні (5), де між обома опорними точками була застосована матриця обертання (Рисунок 3.5 представляє це збіг графічно).

$$\begin{bmatrix} x_{\text{robot}} \\ y_{\text{robot}} \\ z_{\text{robot}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{\text{HoloLens}} \\ y_{\text{HoloLens}} \\ z_{\text{HoloLens}} \end{bmatrix} \quad (5)$$

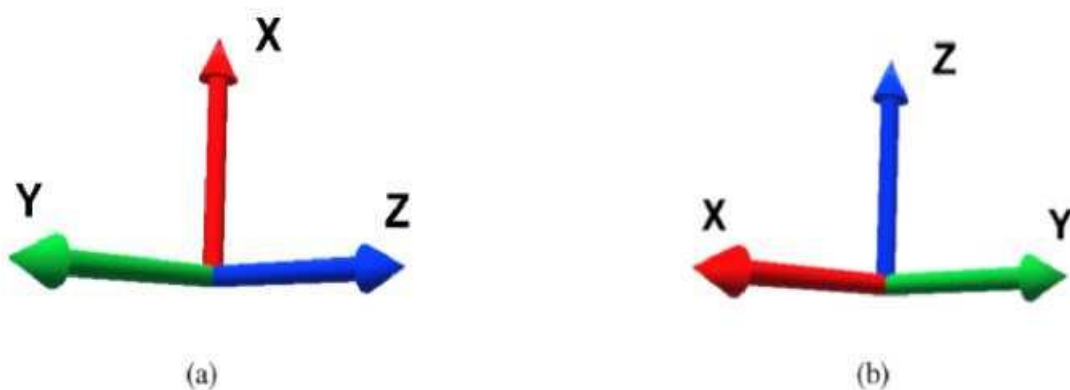


Рисунок 3.4 Порівняння систем координат: ( а ) Система координат застосунку AR. ( б ) Система координат роботів .

Програми на C++ виконували три основні кроки для перетворення координат на мову програмування роботів. По-перше, коли тема ROS отримувала сигнал про передачу списку координат, програма робота ініціалізувалася. Потім, коли тема починала отримувати записані координати руки, їх додавали до програми робота з коригуваннями, поясненими раніше (рівняння ( 5 ) ). Нарешті, коли тема отримувала сигнал про кінець передачі, програма робота завершувалася та закривалася. Ця процедура мала деякі незначні відмінності залежно від робота, який програмував, що буде пояснено в наступних підрозділах.

Головною метою цих експериментів було продемонструвати концепцію програмування робота шляхом демонстрації з використанням доповненої реальності (AR). Після аналізу результатів цих п'яти експериментів можна зробити висновок, що мети було досягнуто з обома роботами. Було вирішено використовувати роботів різних брендів, щоб продемонструвати можливе узагальнення. Тим не менш, завжди є простір для вдосконалення. У цьому сенсі в цьому розділі мається на меті перерахувати можливі вдосконалення для покращення розробленого продукту з метою кращого користувацького досвіду та простоти.

Перше просте покращення, яке можна було б впровадити, — це швидкість запису координат. На цьому етапі програми записують координати в кожному кадрі, але це можна спростити, записуючи з фіксованою частотою та з більш тривалим періодом вибірки. Фактично, цю частоту дискретизації можна навіть регулювати відповідно до застосування, в якому система буде застосовуватися.

Одним із можливих удосконалень може бути проектування стрілки в гарнітурі, яка вказує на рух наступного робота. Таким чином, оператор зможе передбачити можливі реакції та почуватися комфортніше поруч із роботом. Можливим доповненням, яке можна інтегрувати, є врахування орієнтації руки під час запису. Як було пояснено, у цьому випадку враховувалося лише положення, тому використання орієнтації руки розширило б діапазон можливих застосувань продукту. Наприклад, дозволило б використовувати його для

					БР.ІІІ - 49.00.00.000 ПЗ	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

операцій з захопленням та розміщенням, де для виконання деяких об'єктів потрібні певні рухи. Наслідуючи цей приклад операції з захопленням та розміщенням, чудовим доповненням також було б можливість керування кінцевим виконавчим механізмом робота.

Крім того, можливість виключення посередника всього процесу, у цьому випадку ROS, спростила б взаємодію з користувачем для оператора без будь-яких знань програмування. Для цього необхідно було б реалізувати транслятори в Додаток AR разом із розетками для зв'язку з роботами. Ці доповнення можуть дещо уповільнити роботу застосунку, але переваги, які вони нададуть, є більш значними. Головною перевагою є те, що система може працювати лише з HoloLens 2 та роботами, що дозволяє уникнути використання зовнішнього комп'ютера.

Експеримент було проведено у тривимірному просторі. На рисунку 3.5а показано різні напрямки малюнка вздовж трьох осей. У цьому сенсі було намальовано тривимірну фігуру, подібну до рисунка 3.5b. Робот почав рухатися в точці 1 та рухався вздовж осі Z до точки 2; потім, вздовж осі Y, досяг точки 3; далі, щоб перейти до точки 4, рухався вздовж осі X; після цього, щоб перейти до точки 5, просувався вздовж осі Y;

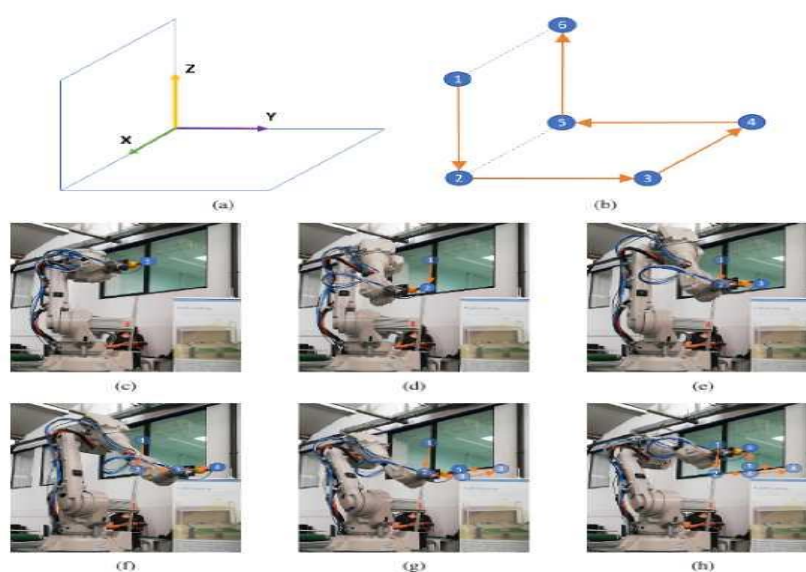


Рисунок 3.5 Виконання шляху ABB IRB 2600 (тривимірне твердотільне зображення):

					БР.ІІІ - 49.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

( a ) опорна система шляху. ( b ) Послідовність шляхів. ( c ) Робот у початковій точці. ( d ) Робот у другій точці. ( e ) Робот у третій точці. ( f ) Робот у четвертій точці. ( g ) Робот у п'ятій точці. ( h ) Робот у кінцевій точці.

### 3.3 Аналіз AR-застосунків та коментарі

Кілька статей присвячені опису простих тематичних досліджень, де доповнена реальність (AR) застосовується в промисловому середовищі для підтримки технічного обслуговування [ 20 , 21 ]. Накладання віртуальних моделей на складні вироби [ 22 ] може допомогти у визначенні правильної деталі для роботи; з іншого боку, збагачення реальної сцени [ 23 ] текстами та анімацією, що показують процедури складання/розбирання, може бути корисним для вирішення складних інженерних проблем некваліфікованими операторами. AR також може бути корисним для зменшення складності інструкцій користувача/технічного обслуговування [ 24]. У цьому випадку, замість сторінок і сторінок невеликих складних креслень, які часто незрозумілі або важко розпізнати, контакт з реальним світом може бути корисним для економії часу та підвищення ефективності процесу. Дотримання літератури, а також навчання з технічного обслуговування [25] , може скористатися перевагами AR: операторів можна навчити працювати на реальній машині, діючи на віртуальній моделі, щоб не було потреби бути перед об'єктом для ознайомлення, а можливі помилки не призвели до пошкоджень. Можливості віддаленої співпраці були запропоновані в посиланні [ 26 ], де віддалений центр обслуговування може керувати оператором у складних завданнях, готуючи необхідну анімацію для підтримки його/її роботи в польових умовах. Зоровий підбір – ще одна цікава концепція, розглянута в літературі: було запропоновано керувати операторами у виборі елементів для забирання під час складальних завдань або логістики. Як зазначається в посиланнях [27-29] , доповнена реальність (AR) може бути використана для проектування «віртуального окубика» або «тунелю», щоб направити оператора до компонента для вибору.

					БР.ІІІ - 49.00.00.000 ПЗ	Арк.
						46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Промислове середовище є особливо вигідним для AR, оскільки на заводі є багато легко розпізнаваних символів, які можна використовувати як маркер. З іншого боку, застосування на відкритому повітрі вимагає використання GPS, інерціальних вимірювальних пристроїв (IMU) та інших пристроїв для фіксації положення та точки зору оператора: громіздкий рюкзак з компасом, IMU та GPS може бути необхідним, коли для AR потрібне дослідження невідомого реального світу.

Медицина – це ще один сценарій, детально описаний у літературі, для тестування та застосування доповненої реальності (AR). Для хірургів-навчальників точне позиціонування голок та медичних пристроїв під час операції, покращений огляд, вирівнювання зображень комп'ютерної томографії (КТ) та реального пацієнта – це не вичерпний перелік запропонованих завдань, які слід виконувати за допомогою AR [ 30 ]. У цьому випадку точність, яку можна досягти за допомогою AR при вирівнюванні віртуальної моделі з реальним пацієнтом, та необхідність систем доповнення, здатних продовжувати відстеження, навіть коли медичний оператор перекриває поле зору камер або маркерів, є основними обмеженнями сучасних технологій. Більше того, потреба в хорошій контрастності зображення в реальній операційній, де світло можна вмикати та вимикати залежно від потреб хірургів, може бути досить складною проблемою. Нещодавні дослідження [ 31 ] намагалися впровадити AR, особливо з OST HMD, у медичне середовище, щоб допомогти лікарям у хірургії [ 32 ].

Розваги забезпечують високий обсяг доходів для електронної промисловості. По-перше, Ігри з персонажами та ігри з доповненням сцен розробляються як для смартфонів, так і для домашніх розважальних ігрових платформ протягом багатьох років. У цьому випадку немає потреби в точному позиціонуванні чи високій продуктивності, і доповнена реальність (AR) може являти собою зрілу, навіть якщо дорогу, технологію для впровадження в ігри.

Для смартфонів було розроблено кілька систем навігації на відкритому повітрі для підтримки туризму та надання опису реального середовища. У цьому випадку можна відстежувати відомі зображення (наприклад, силует гори чи

					БР.ІІІ - 49.00.00.000 ПЗ	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

будівлі). Більше того, ці програми вимагають точності, яку неможливо порівняти з тією, що потрібна в медицині. Зосередження уваги на дороговартісному обладнанні, такому як проєкційні дисплеї (HUD), з інформацією для пілотів є стандартом для високопродуктивних літаків; автомобільна промисловість також оцінює пристрої доповненої реальності, такі як проєкційні дисплеї, для підтримки водія та відображення довідкової інформації на лобовому склі. Таким чином, не потрібно переміщувати зір до панелі, щоб зчитувати дані про швидкість, оберти на хвилину, паливо, налаштування та положення ручки.

Проєкція символів та написів на зовнішнє середовище для реклами – це поширена можливість, яку використовують виробники іграшок для відображення вмісту коробок або для отримання доповнених візиток, що відображають інформацію у 3D. Існують AR-додатки, де, коли вивіска магазину знаходиться в кадрі, на смартфоні клієнта з'являються додаткові повідомлення. У цих випадках необхідність запуску AR-додатків на смартфонах або недорогих пристроях є більш важливою з огляду на високу частоту оновлення або хорошу точність позиціонування: символи та анімацію можна підготувати один раз, і немає потреби змінювати їх залежно від конкретних завдань: це простий спливаючий контент, коли зображення або символ поміщається в рамку.

### **Обмеження апаратного забезпечення**

Існують різні переваги та недоліки при порівнянні та оцінці методів проєкцій, доступних на ринку. Рішення з напівдзеркалом пропонує обмежене поле зору (FoV) через свою легкість та малу геометрію; навпаки, більше поле зору вимагатиме більших та важчих апаратних пристроїв. Рішення на основі опуклого дзеркала забезпечує найширше поле зору (наприклад, 90° градусів у Meta2 HMD). Однак апаратне забезпечення цієї конфігурації є громіздким, і роздільна здатність може змінюватися залежно від того, як пластиковий матеріал об'єднувача (допоміжного пристрою, на якому відображаються зображення) зберігає свою якість. Крім того, хвилевід пропонує обмежене поле зору порівняно з конфігурацією опуклого дзеркала. Можна помітити проблему яскравості OST HMD. Тому поєднання віртуального зображення з реальним

					БР.ІІІ - 49.00.00.000 ПЗ	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

освітленим середовищем є головним недоліком прозорих пристроїв. Щоб підтвердити це твердження, важливо зазначити, що доповнені зображення бляклі та не перекривають і не блокують реальний світ (рис. 3.5) .

Завдяки прозорій оптиці AR багато підсвічування дисплеїв відкидаються, щоб підтримувати бачення реального світу, і користувачеві доводиться мати справу зі світлом, яке є в реальному світі. Користувач може вимкнути освітлення в кімнаті та використовувати темніший фон для голограм, щоб підкреслити яскравість 3D-об'єктів, але таким чином функція «прозорості» стає марною. Наприклад, HoloLens оснащений прозорим екраном, і він може лише додавати світло до поля зору користувача, надаючи віртуальним об'єктам бляклого вигляду. Немає додаткового шару, який міг би вимкнути екран і зробити його непрозорим піксель за пікселем. Екран настільки яскравий, що в контрольованому середовищі, такому як затемнені демонстраційні кімнати, фон ефективно стирається віртуальними об'єктами, але під час перегляду об'єктів поблизу яскравого фону (наприклад, настільної лампи, що лежить близько), вони стають ледь помітними. Згідно з описом функцій, доступних для додавання світла до поля зору користувача, неможливо відобразити повністю чорні 3D-об'єкти ( $RGB = [0,0,0]$ ) за допомогою оптичних прозорих пристроїв, оскільки чорний колір використовується як альфа-канал, тобто шар, що використовується для прозорості. Для прикладу HoloLens, спливаюче меню Clear Flag основної камери в редакторі Unity має бути встановлено на суцільний чорний колір, щоб встановити прозорий колір. Те саме стосується пристрою Meta2 (див. рисунки) 3.5 та 3.6 , наприклад).

Ця проблема яскравості також впливає на роздільну здатність зображень і є основною відмінністю від відеопрозорих HMD. Зокрема, в оптичних прозорих HMD голограми мають «світіння» навколо себе, тому 3D-об'єкти не мають чітких контурів і страждають від втрати деталей. З іншого боку, проблема яскравості не виникає в таких пристроях, як HTC Vive та Oculus Rift, завдяки використанню OLED-дисплеїв та окулярів. Крім того, проблема оклюзії в HMD була вирішена раніше та легше для технології VST, ніж для HMD OST. Як

					БР.ІІІ - 49.00.00.000 ПЗ	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

наслідок, використання окулярів необхідне для покриття периферійного зору, але це рішення не може бути використане з технологією OST. З VST-пристроями можна повністю вимкнути пікселі за допомогою бібліотек обробки зображень (наприклад, OpenCV), щоб видалити реальні об'єкти та замінити їх доповненими, або відобразити повністю чорні об'єкти. На відміну від цього, проекційна система Meta2 базується на РК-екрані, який проектує зображення на око користувача завдяки напівсрібному опуклому дзеркалу. Meta2 має ширше поле зору (FOV) завдяки використаній системі проекції. Однак, якщо відстань між оком і опуклим дзеркалом занадто велика, функція прозорості не працює через коефіцієнт спотворення лінз. Обчислювальна потужність – ще одна велика відмінність між оптичними прозорими та відеопрозорими HMD. Наразі лише Microsoft HoloLens та деякі моделі Vuzix мають вбудовану обчислювальну потужність завдяки своїм процесорам Intel Atom. HTC Vive та Oculus Rift підтримують лише програми, що працюють на зовнішніх ПК, і вони повинні бути підключені до ПК за допомогою дроту. Крім того, вони покладаються на зовнішні пристрої для системи відстеження. Тому вони не є ергономічними в промисловому сценарії. З іншого боку, продукт Microsoft набагато універсальніший у випадку портативного використання, оскільки для його використання не потрібне дротове з'єднання. Навпаки, він вимагає постійного та потужного бездротового з'єднання, оскільки його система просторового відстеження пов'язує кожне з середовищ, так звані "Простори", з мережею Wi-Fi. Ці сітки зберігаються у внутрішній пам'яті та завантажуються, коли HoloLens виявляє пов'язану мережу Wi-Fi. З вищезазначених причин використання Microsoft HoloLens у заводському середовищі не так просте.

					БР.ІІІ - 49.00.00.000 ПЗ	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 3.6 Суцільний червоний куб ліворуч та суцільний чорний куб (який прозорий, але видимий завдяки заломленню) праворуч на дисплеї Microsoft HoloLens.

### Обмеження програмного забезпечення

Говорячи про промислове застосування, досить амбітно стверджувати, що доповнена реальність, а не віртуальна реальність, є готовою до використання технологією для заводських застосувань, оскільки існує багато труднощів, з якими потрібно впоратися. Це відбувається через різноманітність програмних пакетів та бібліотек, які не завжди поєднуються, що може призвести до плутанини та втрати часу для кінцевого користувача. Для створення лише однієї анімації потрібен тривалий час підготовки. На думку автора, основними кроками в реальному промисловому застосуванні є створення 3D-параметричної CAD-моделі, експорт цих моделей у сітці, спрощення інструменту геометрії та імпорт у Unity, де потім можна розпочати написання сценаріїв доповненої реальності для фінальної сцени. Зрозуміло, що цей ланцюг подій вимагає не тільки багато часу, але й широких знань кожного окремого інструменту.

Крім того, обмеження полігонів для рендерингу в реальному часі змушують кінцевого користувача отримувати низько деталізовані моделі, які не підходять для всіх промислових застосувань. Ця втрата часу робить технологію неготовою для інструкцій з технічного обслуговування, оскільки практично неможливо підготувати анімацію для всіх можливих завдань операторів. У цьому контексті важливо підкреслити зусилля, докладені PTC Creo®, щоб надати

					БР.ІІІ - 49.00.00.000 ПЗ	Арк.
						51
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

користувачам єдину платформу для створення 3D-моделей та їх візуалізації в AR.

Ця функція була досягнута завдяки інтеграції Vuforia в Parametric PTC CAD та створенню сцени в програмному пакеті ThingWorx Studio. Навіть незважаючи на те, що сцена середовища обмежена порівняно з Unity Editor, ці зусилля можна оцінити як значний крок до впровадження AR у реальні промислові застосування, а не лише в ігри чи комп'ютерну графіку. Незважаючи на ці факти, AR наразі більше застосовується для навчання, ніж для технічного обслуговування чи впровадження віртуальних інструкцій. Як наслідок, завдяки AR більше не потрібна фізична присутність інструктора там і під час проведення навчального сеансу.

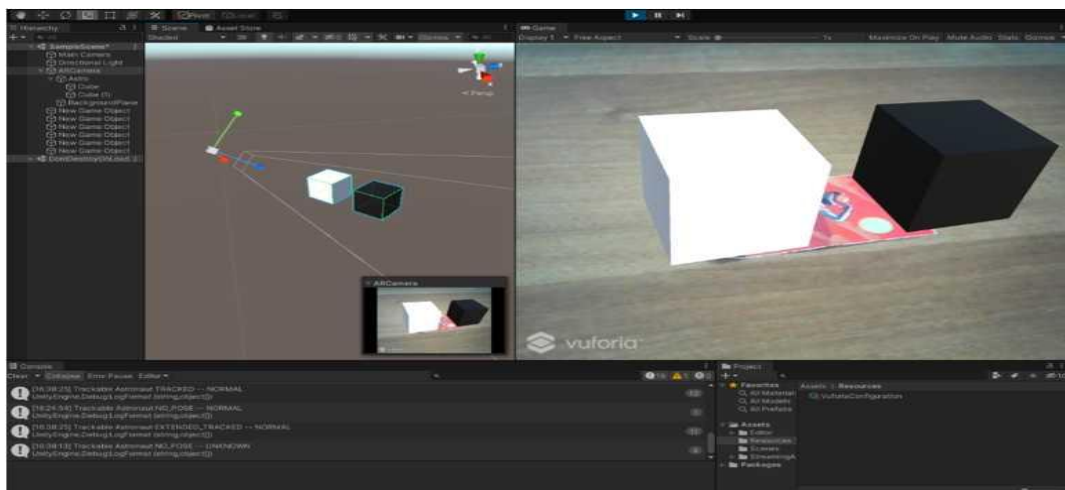


Рисунок 3.7 Суцільний чорний куб, обрамлений веб-камерою в редакторі Unity.

### **Обмеження зручності використання в промисловому середовищі**

Окрім обмежень програмного та апаратного забезпечення, під час розгляду використання доповненої реальності (AR) у промисловому середовищі слід враховувати кілька питань зручності використання. Сучасні AR-додатки часто вимагають налаштування перед початком роботи; робочий досвід: це може бути прийнятним у лабораторії, але неприйнятним для працівника, який не має досвіду роботи з комп'ютерною графікою. Більше того, промисловий робочий

					БР.ІІІ - 49.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

процес не допускає втрати часу на тривалі та досить складні операції налаштування. Ще однією проблемою, яку слід враховувати в промисловому середовищі, є те, що сучасним AR-додаткам бракує простих можливостей зіткнення/перекриття: цей ефект є фундаментальним для забезпечення відчуття глибини, реалізму та дозволяє виконувати операції з технічного обслуговування, де 3D-деталі необхідно переміщувати та орієнтувати в просторі. AR-пристрої чутливі до рівня освітлення: це може бути критичною проблемою на заводах, де є темні та світлі зони, і одна й та сама зона може переходити з одного рівня освітлення на інший, просто вмикаючи або вимикаючи світло або вимикаючи двері. Коли розглядаються інтерфейси людина-машина, варто зазначити, що сучасні вікна введення команд, засновані на автентичності, не є достатньо надійними для промислового застосування: у промисловому середовищі користувач не має часу використовувати складні пристрої введення [ 33 , 34 ]. У цьому випадку можливості вибору та перетягування пальцем можуть бути рішенням для підвищення зручності та доступності, але ці технології сьогодні не є стандартом для AR-застосунків. Що стосується окулярів, то наразі немає зручних AR-пристроїв для складних операцій, де потрібні високі обчислювальні зусилля: сьогодні окуляри можна розділити на ергономічні моделі, але з обмеженими обчислювальними можливостями та роздільною здатністю, та високопродуктивні головні дисплеї або громіздкі окуляри. Фактично, сьогодні окуляри з хорошою ергономікою, високою роздільною здатністю та високою обчислювальною потужністю недоступні. Наведене вище твердження є результатом низки експериментів «від першої особи», проведених авторами в промисловому середовищі. Щоб надати читачеві візуальний зворотний зв'язок, наступний малюнок На рис . 3.8а показано зображення оператора з прозорими окулярами в майстерні, де моделюється операція свердління за допомогою доповненої реальності (AR). 10b показує доповнений вигляд , зроблений користувачем

Фактично, необхідної точності свердління (0,05 мм), типової для механічного виробництва, навряд чи можна досягти: навіть для отримання

					БР.ІІІ - 49.00.00.000 ПЗ	Арк.
						53
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

точності 1 мм (як з маркерною, так і безмаркерною технологією) необхідний трудомісткий процес реєстрації, що є типовим значенням, очікуваним з сучасними можливостями доповненої реальності (AR). Крім того, умови освітлення впливають на яскравість сцени, що сприймається при триманні в руках окулярів: відкриття дверей (або ввімкнення лампочки) не компенсується програмним забезпеченням AR.



Рисунок 3.8 (а) Експеримент з використанням технології доповненої реальності для відтворення заводського середовища. (б) 3D-об'єкт, розміщений у реальному світі.

Нарешті, навіть проста альтернативна анімація, підготовлена за допомогою спеціального програмного інструменту AR, вимагає багато часу для підготовки сцени. На рисунку 3.9 додано віртуальну модель гвинта/болта, близьку до звичайної, щоб показати, як розібрати болт: модель CAD була

імпортована у Vuforia з правильною орієнтацією відносно маркера (див. рисунок 3.9a ), додано символ, і анімацію завантажено на окуляри Hololens.



Рисунок 3.9 Безмаркерна AR-сцена, ( а ) з маркером, li b ) без маркера.

Після серії тестів з кількома користувачами середній час, необхідний для підготовки анімації кваліфікованим оператором, було оцінено як 2 години; також можна застосувати безмаркерний підхід (див. рисунок 3.9 b). В останньому випадку саме середовище виконує одну роль маркера: тому чіткі робочі простори (наприклад, рівні підлоги та стіни без деталей та однорідного кольору) можуть бути непридатними для відстеження та позиціонування об'єкта. Однак типове середовище майстерні не створює цієї проблеми, оскільки машини зазвичай демонструють складну геометрію та легко впізнавані деталі з краями та багатоорієнтованими поверхнями.

### **3.4 Узгодження AR-рішень з галузевими вимогами: виклики та перспективи**

Ефективне та результативне використання можливостей доповненої реальності (AR) у промисловому середовищі стане можливим після впровадження повного континууму реальності та віртуальності. Ця концепція, запропонована Полом Мілгремом, передбачає вихід за межі розмежування між реальністю та віртуальністю та надає користувачеві можливість простим способом встановити рівень віртуальності, з яким він/вона хоче працювати. У

					БР.ІІІ - 49.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55

промислового застосуванні AR першочергове значення має можливість поєднувати реальність та віртуальність і перемикатися між ними простим способом, під повним контролем оператора, який повинен мати можливість вирішити, зосередити увагу на віртуальному чи реальному залежно від завдання, яке він/вона має виконати. Тіні, оклюзія, реалізована ефективно, візуалізовані віртуальні моделі, високопродуктивні інтерфейси людина-машина – це деякі з технологій, які повинні бути доступні користувачам, щоб подолати різницю між реальним та віртуальним. Ця технологічна зміна впливає на вимоги до апаратного та програмного забезпечення для роботи AR, як краще пояснено в наступних розділах.

### **Апаратне забезпечення**

Щодо апаратного забезпечення, потрібне покращення обчислювальних можливостей окулярів. Як згадувалося раніше, наразі лише Microsoft HoloLens та деякі моделі Vuzix реалізують вбудовану обчислювальну потужність. Інші пристрої зручні, але не забезпечують обчислювальної потужності та потребують підключення до зовнішнього обладнання. Крім того, обчислювальна потужність, встановлена в окулярах HoloLens та Vuzix, є обмеженою, і пристрої виходять з ладу, коли їм потрібно обробляти складні геометрії, і недостатньо спрощені, не кажучи вже про те, що вони досить громіздкі та незручні при використанні в промисловому сценарії. Портативність та свобода пересування у зовнішньому середовищі (тобто, в польових умовах) є головною перевагою внутрішньої обчислювальної потужності. Пристрої, такі як Meta2, які залежать від зовнішньої обчислювальної потужності, пропонують вищу продуктивність, але зменшують свободу пересування. Навіть якщо обладнання встановлено в рюкзаку, рекомендовані вимоги до апаратного забезпечення для використання підключених пристроїв є досить високими. Наприклад, Meta2 вимагає процесорів останнього покоління та спеціалізованих високоякісних відеокарт, які недоступні у звичайному ноутбучі помірному розміру та ваги. Крім того, інші пристрої, такі як HTC Vive та Oculus Rift, навіть у конфігурації рюкзака, не можуть використовуватися у зовнішньому середовищі через систему

					БР.ІІІ - 49.00.00.000 ПЗ	Арк.
						56
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

відстеження, яка вимагає зовнішніх датчиків. Відокремлення НМД від обчислювального обладнання можна вважати ще одним рішенням, запропонованим у літературі для збереження портативності. Для прикладу, рішення такого типу запропоновано Magic Leap [ 35 ], в якому обчислювальні операції виконуються легко носимим міні-ПК, відокремленим від дисплея. Цей підхід може бути резервним рішенням для вирішення компромісу між обчислювальними можливостями та портативністю: як тільки електронна інженерія забезпечить малі та потужні комп'ютери спеціалізованими графічними процесорами (GPU), процесор буде інтегрований у структуру окулярів. Нове покоління оптичних прозорих НМД має вирішити проблеми навколишнього освітлення, щоб зробити можливим їх використання навіть на відкритому повітрі. Крім того, вирішення проблеми блокування зовнішнього світла може призвести до ефективного перекриття реальних об'єктів, які можна замінити їх віртуальним аналогом, заповнюючи прогалину між реальним та віртуальним. Обмін даними між реальними та віртуальними об'єктами потребує покращення шляхом інтеграції апаратного забезпечення, необхідного для сканування реальних об'єктів та автоматичного імпорту їх у віртуальне середовище. Коли ці можливості будуть доступні, як передбачає Сеговія та ін. [ 36 ], доповнена реальність (AR) може бути використана для підтримки виробництва. Однак, робота з допусками на розміри виробництва передбачає точність реєстрації сцени AR, яка вища, ніж діапазон допусків для оцінки. Обмін даними між реальними та віртуальними об'єктами також впливає на те, як користувачі можуть працювати з реальними об'єктами під час їх звичайного використання. Концепція цифрового двійника є основою Індустрії 4.0: це означає взаємодію з віртуальною моделлю шляхом роботи над реальною моделлю (і навпаки) та негайне використання отриманих даних для прийняття кращих інженерних рішень та проектів з використанням даних реального світу. Також необхідні покращення роздільної здатності, FPS та частоти оновлення, щоб зменшити та мінімізувати ефект сліду під час руху точки огляду. Покращення чіткості відображення, а отже, і чіткості віртуальних об'єктів, особливо країв 3D-об'єктів,

					БР.ІІІ - 49.00.00.000 ПЗ	Арк.
						57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

дозволить точніше розміщувати 3D-об'єкти. Поточна частота оновлення 30 кадрів/с, яка сьогодні доступна в кількох апаратних пристроях, є доцільною, оскільки вона перевищує порогову частоту, сприйняту людським оком. Щодо роздільної здатності екрана, значущі значення залежать від кінцевого застосування. За словами Ферверди [ 37 ], у комп'ютерній графіці існує три рівні реалізму: фізичний реалізм (така ж візуальна стимуляція, як у сцени), фотореалізм (такий самий візуальний зворотний зв'язок, як у сцени) та функціональний реалізм (ідентична візуальна інформація, як у сцени). Під час обслуговування, де має бути забезпечений функціональний реалізм, має бути доцільною поточна роздільна здатність, що забезпечується такими пристроями, як HoloLens. Однак, коли йдеться про фотореалізм, необхідні набагато більші роздільні здатності. З огляду на вимоги до рендерингу, можливим рішенням для подолання проблеми рендерингу повністю чорних об'єктів може бути використання лінз або окулярів, здатних затемнювати чорні зони, та використання нових технологій, таких як використання електрохромних плівок РК-дисплеїв.

### **Програмне забезпечення**

Для промислових застосувань можна використовувати відстеження на основі символів (наприклад, дорожніх знаків) , оскільки на заводах відомих панелей; подібна технологія зараз використовується в лазерно-керованих транспортних засобах (LGV). SLAM (одночасна локалізація та картографування) – це ще одна технологія, яка може бути використана для розпізнавання середовища для автономних застосувань у промисловому середовищі без необхідності залучення оператора. Простота програмного забезпечення є ключовим моментом усіх цих застосувань: необхідна гнучка інтеграція між поширеними популярними програмами. Цю прогалину можна заповнити, впровадивши деякі плагінів, які можуть відкривати канали зв'язку між бібліотеками AR та комерційними САПР без необхідності ручного перетворення моделей та створення сцен у різних програмах. Щодо цього питання РТС вже представила свій інструмент відстеження об'єктів Vuforia [ 38 ]. Після придбання

					БР.ІІІ - 49.00.00.000 ПЗ	Арк.
						58
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

технології Vuforia, PTC створила прямий зв'язок між двома програмними продуктами, інтегруючи інструменти AR та CAD, що сприяло простому налаштуванню сцени доповненої реальності. Зокрема, завдяки відстеженню об'єктів тепер можливо безпосередньо зіставляти реальні об'єкти з моделями CAD без ручного виконання конвертації. Завдяки цьому зв'язку можна легко використовувати AR-додатки максимально природним чином. Окрім цього, важливо зазначити, що AR є більш перспективною, ніж VR, для промисловості.

Це правда, що віртуальну реальність можна використовувати на навчальних сесіях, але неможливо уявити VR-застосунки для реальних робочих сесій у промисловості, що є типовим сценарієм, де взаємодія з реальними об'єктами є фундаментальною. Перевага доповненої реальності над VR також помітна у вищій роздільній здатності зображень та голограм, які можна отримати за допомогою технології AR. Крім того, також дуже важливо подбати про якість зображення. Роками раніше, коли доповнена реальність була вперше розроблена, проблема реєстрації була ключовим моментом дослідження: сьогодні, завдяки вищій обчислювальній потужності та складним методам відстеження, можна зосередити зусилля на підвищенні реалістичності проєктованих об'єктів. Ознаки прогресу були досягнуті VTT [ 39 ] з їхньою пропозицією щодо вирішення проблеми освітлення в реальному часі. Звичайно, це не можна вважати стандартним рішенням, але це відправна точка для підвищення точності моделі. Нові програмні пакети повинні дозволяти зворотне проєктування об'єктів, обрамлених камерами, а реальні та віртуальні об'єкти повинні бути повністю взаємозамінними. Оптимізація проблеми реєстрації [ 40 ] та методів рендерингу призведе до реальних можливостей "цифрового двійника". Розуміння навколишнього середовища (з точки зору зворотного проєктування сцени та сканування) є ключовою особливістю для досягнення мети інтеграції реального та віртуального світу. І останнє, але не менш важливе: доповнена реальність (AR) також потребує легших пристроїв, що забезпечує більший комфорт та менше навантаження на операторів. Менш високі вимоги до обчислювальної потужності нададуть AR характеристики портативності, що дозволить їй

					БР.ІІІ - 49.00.00.000 ПЗ	Арк.
						59
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

охоплювати все більше сфер промислового застосування.

### 3.5 Висновки по розділу

У цьому розділі описано архітектуру AR-інтерфейсу, який дозволяє користувачам інтуїтивно програмувати різні типи промислових роботів, узгоджуючи координатні системи вручну та візуалізуючи робочий простір для запобігання помилок. Запропоноване рішення демонструє гнучкість методології для як колаборативних, так і традиційних роботів, таких як UR5 та ABB IRB 2600. продемонстровано ефективність AR-інтерфейсу для інтуїтивного програмування траєкторій роботів за допомогою жестів, візуального зворотного зв'язку та трансляції координат у відповідні мови програмування. Запропонована система показала свою універсальність і потенціал до подальших удосконалень, включаючи врахування орієнтації руки та автономну роботу без ROS.

Доповнена реальність має значний потенціал для промислового застосування, однак її широке впровадження наразі обмежене технічними, апаратними та програмними недоліками, зокрема недостатньою точністю, складністю підготовки контенту та чутливістю до освітлення. Попри це, AR вже ефективно використовується для навчання, візуалізації процесів та віддаленої підтримки, що вказує на її перспективність після подолання існуючих обмежень.

Узгодження AR-рішень з галузевими вимогами вимагає комплексного вдосконалення апаратного та програмного забезпечення, спрямованого на забезпечення портативності, продуктивності, точності та інтеграції з існуючими виробничими системами, що відкриває широкі перспективи для ефективного застосування доповненої реальності у промисловості.

					БР.ІІІ - 49.00.00.000 ПЗ	Арк.
						60
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## ВИСНОВКИ

Дослідження, проведене в рамках цієї роботи, підкреслює ключову роль програмування доповненої реальності (AR) у створенні інноваційних інтерактивних систем, які трансформують робототехніку, промислові процеси та інженерні рішення. Аналіз теоретичних основ і технологічного підґрунтя AR показав, що сучасні технології, такі як Unity, ARKit і ARCore, забезпечують гнучку основу для розробки AR-застосунків, що інтегрують цифровий контент із реальним світом. Огляд сучасного стану доповненої реальності та обладнання, такого як HoloLens і мобільні пристрої, підтвердив їхню здатність підтримувати складні інтерактивні сценарії, хоча обмеження продуктивності та сумісності залишаються викликами.

Методологічний розділ, присвячений розробці AR-систем, продемонстрував, що інженерний підхід, заснований на чітко визначених матеріалах дослідження, експериментальних методах і модульній архітектурі, дозволяє створювати ефективні AR-системи. Архітектура програмування AR-роботів, зокрема з використанням мов C# і Python, забезпечує гнучкість і масштабованість, тоді як проектування інтерактивних систем управління сприяє підвищенню точності та зручності взаємодії з робототехнічними системами.

Третій розділ, що аналізує інтеграцію AR у програмування та інженерні системи, виявив, що AR-платформи, такі як Vuforia та Unreal Engine, ефективно застосовуються для програмування робототехнічних систем, зокрема для керування рухом і візуалізації даних. Побудова та візуалізація траєкторій за допомогою AR покращує точність навігації роботів, тоді як аналіз AR-застосунків показав їхню високу адаптивність до різних галузевих потреб. Узгодження AR-рішень із галузевими вимогами, однак, потребує вирішення таких викликів, як стандартизація протоколів і забезпечення кросплатформної сумісності.

Узагальнюючи, програмування доповненої реальності є перспективним напрямом для створення інноваційних рішень у робототехніці та інженерії, що

					БР.ІІІ - 49.00.00.000 ПЗ	Арк.
						61
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

підвищують ефективність і точність систем. Результати дослідження можуть бути використані розробниками, інженерами та дослідниками для створення AR-застосунків, орієнтованих на промислові, освітні та медичні потреби. Перспективи подальших досліджень включають розробку ШІ-підтриманих AR-систем для автоматизації проектування, вдосконалення алгоритмів обробки сенсорних даних і створення універсальних стандартів для AR-обладнання та програмного забезпечення. Ці напрямки сприятимуть розвитку більш доступних і ефективних AR-рішень у майбутньому.

					БР.ІІІ - 49.00.00.000 ПЗ	Арк.
						62
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Apple. ARKit 5 Documentation. *developer.apple.com*, 2024. — Режим доступу: <https://developer.apple.com/documentation/arkit>
2. Azuma, R. T. A Survey of Augmented Reality. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 1997, 6(4), 355–385. — Режим доступу: <https://doi.org/10.1162/pres.1997.6.4.355>
3. Billinghurst, M., Clark, A., & Lee, G. A Survey of Augmented Reality. *Foundations and Trends in Human-Computer Interaction*, 2015, 8(2-3), 73–272. — Режим доступу: <https://doi.org/10.1561/11000000049>
4. Blender Foundation. Blender 3.6: AR Content Creation Guide. *blender.org*, 2023. — Режим доступу: <https://www.blender.org/features/ar-content-creation>
5. Carmigniani, J., & Furht, B. Augmented Reality: An Overview. In *Handbook of Augmented Reality* (pp. 3–46). — New York, NY: Springer, 2011. — Режим доступу: [https://doi.org/10.1007/978-1-4614-0064-6\\_1](https://doi.org/10.1007/978-1-4614-0064-6_1)
6. Craig, A. B. *Understanding Augmented Reality: Concepts and Applications*. — Waltham, MA: Morgan Kaufmann, 2013. — 296 с. — Режим доступу: <https://www.elsevier.com/books/understanding-augmented-reality/craig/978-0-240-82408-6>
7. DOU. Android XR: New OS for AR Development. *dou.ua*, 2024. — Режим доступу: <https://dou.ua/lenta/articles/android-xr>
8. Evergreens. Top AR Tools for Business: ARKit and ARCore. *evergreens.com.ua*, 2020. — Режим доступу: <https://evergreens.com.ua/ua/blog/top-ar-tools>
9. Fopi. Apple Vision Pro: AR Programming Capabilities. *fopi.ua*, 2023. — Режим доступу: <https://fopi.ua/apple-vision-pro>
10. Google. ARCore Developer Guide. *developers.google.com*, 2024. — Режим доступу: <https://developers.google.com/ar>
11. Imena. Five AR Apps Transforming Healthcare. *imena.ua*, 2021. —

					БР.ІІІ - 49.00.00.000 ПЗ	Арк.
						63
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Режим доступу: <https://www.imena.ua/blog/ar-in-healthcare>

12. Kipper, G., & Rampolla, J. *Augmented Reality: An Emerging Technologies Guide to AR*. — Waltham, MA: Syngress, 2012. — 208 с. — Режим доступу: <https://www.elsevier.com/books/augmented-reality/kipper/978-1-59749-733-6>

13. Markets and Markets. *Augmented Reality Market: 2020–2025 Forecast*. *marketsandmarkets.com*, 2020. — Режим доступу: <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/augmented-reality-market-82758548.html>

14. Meta. *Orion AR Glasses: Developer Preview*. *meta.com*, 2024. — Режим доступу: <https://www.meta.com/orion-ar>

15. Milgram, P., & Kishino, F. A Taxonomy of Mixed Reality Visual Displays. *IEICE Transactions on Information and Systems*, 1994, E77-D(12), 1321–1329. — Режим доступу: [https://search.ieice.org/bin/summary.php?id=e77-d\\_12\\_1321](https://search.ieice.org/bin/summary.php?id=e77-d_12_1321)

16. NURE. *AR Module for Human Pose Analysis*. *lib.nure.ua*, 2023. — Режим доступу: <https://lib.nure.ua/en/catalogue/ar-module>

17. Parisi, T. *Learning Virtual Reality: Developing Immersive Experiences and Applications*. — Sebastopol, CA: O'Reilly Media, 2015. — 166 с. — Режим доступу: <https://www.oreilly.com/library/view/learning-virtual-reality/9781491922798>

18. Peddie, J. *Augmented Reality: Where We Will All Live*. — Cham, Switzerland: Springer, 2017. — 323 с. — Режим доступу: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-54502-8>

19. Root Nation. *Magic Leap 1: AR Development Challenges*. *root-nation.com*, 2023. — Режим доступу: <https://root-nation.com/ua/magic-leap-1-end-of-support>

20. Schmalstieg, D., & Hollerer, T. *Augmented Reality: Principles and Practice*. — Boston, MA: Addison-Wesley, 2016. — 528 с. — Режим доступу: <https://www.informit.com/store/augmented-reality-principles-and-practice->

					БР.ІІІ - 49.00.00.000 ПЗ	Арк.
						64
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

9780321883575

21. Slideshare. Mobile AR Apps in Education. *slideshare.net*, 2022. — Режим доступу: <https://www.slideshare.net/mobile-ar-education>

22. Unity Technologies. Unity AR Foundation: Developer Guide. *docs.unity3d.com*, 2024. — Режим доступу: <https://docs.unity3d.com/Packages/com.unity.xr.arfoundation@latest>

23. Vorobkalov, P., & Voronkin, O. AR in Education: Mobile Apps Development. *Journal of Educational Technology*, 2022, 18(3), 45–59. — Режим доступу: <https://doi.org/10.1007/s10639-022-11045-7>

24. Vuforia. Vuforia Engine: AR SDK Documentation. *developer.vuforia.com*, 2024. — Режим доступу: <https://developer.vuforia.com/library>

25. Wikipedia. Доповнена реальність. *uk.wikipedia.org*, 2024. — Режим доступу: [https://uk.wikipedia.org/wiki/Доповнена\\_реальність](https://uk.wikipedia.org/wiki/Доповнена_реальність)

26. Zaxid. Cannes 2024: AR and VR Competition. *zaxid.net*, 2024. — Режим доступу: <https://zaxid.net/cannes-2024-ar-vr-competition>

					БР.ІІІ - 49.00.00.000 ПЗ	Арк.
						65
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## БІБЛІОГРАФІЧНА ДОВІДКА

Тема бакалаврської роботи: " Програмування доповненої реальності"

Обсяг пояснювальної записки: 54 аркушів

Дата закінчення дипломної роботи 15 червня 2025р.

Підпис студента \_\_\_\_\_

					БР.ІІІ - 49.00.00.000 ПЗ	Арк.
						66
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		