



С. Л. Чирун¹, В. А. Висоцька², О. Я. Бродяк³

¹НУ «Львівська політехніка», м. Львів, Україна, sofia.chyrun.sa.2022@lpnu.ua,
ORCID iD: 0000-0002-2829-0164

²НУ «Львівська політехніка», м. Львів, Україна, victoria.a.vysotska@lpnu.ua,
ORCID iD: 0000-0001-6417-3689

³НУ «Львівська політехніка», м. Львів, Україна, oksana.y.brodiak@lpnu.ua,
ORCID iD: 0000-0002-9886-3589

ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ МОДЕЛЮВАННЯ КРИЗОВИХ СИТУАЦІЙ У VR/AR З ЕЛЕМЕНТАМИ ГЕЙМІФІКАЦІЇ ДЛЯ НАВЧАННЯ ДОМЕДИЧНІЙ ДОПОМОЗИ ЦИВІЛЬНОГО НАСЕЛЕННЯ

Актуальність дослідження зумовлена критичною потребою в ефективній та психологічно реалістичній підготовці фахівців і цивільного населення до надання домедичної допомоги в умовах воєнних дій та кризових ситуацій. Традиційні методи навчання не можуть повною мірою симулювати стресові фактори та інтерактивну динаміку реальних надзвичайних подій. Метою дослідження є розробка інформаційної технології для інтерактивного VR/AR-симулятора домедичної допомоги, що дозволяє користувачам без ризику відпрацьовувати критично важливі навички в середовищі, максимально наближеному до бойових умов. Для реалізації проєкту використано технології формування Бізнес-моделі та Структури декомпозиції робіт (WBS) для MVP; генеративного штучного інтелекту (DALL-E, Trellis3D, Tripo, Meshy, Stable Diffusion) для швидкої генерації реалістичного 2D та 3D-контенту (руїни, постраждалі, поранення); створення VR-сцени у Unreal Engine 5 на базі шаблону VR Template; реалізацію ключових VR-механік, таких як Smooth Locomotion, система захоплення об'єктів (Grabbable Objects), а також інтеграцію навчального мультимедійного контенту. Результати демонструють успішне створення прототипу VR-середовища з інтерактивним сценарієм надання допомоги, наприклад, після ракетного удару. Сформовано десятки моделей різних елементів реального середовища сучасного українського міста за допомогою мобільної фотограмметрії, використовуючи RealityScan, зі зменшеною кількістю фото (близько 30–50 кадрів замість 80–100) для досягнення ефекту пошкоджених об'єктів. Імпортовано 3D-моделі, згенеровані ШІ (Tripo, Meshy) та знайдені на маркетплейсах, а також реалізовано коректну колізію, телепорт і плавне переміщення користувача. Висновки підтверджують ефективність інтеграції генеративного ШІ та ігрових технологій для оперативного створення спеціалізованого VR-контенту. Експеримент із фотограмметрією показав, що свідоме зменшення кількості вхідних даних (використано лише 37,5–62,5% від рекомендованої кількості фото) є життєздатним творчим методом для моделювання зони ураження шляхом індукування некритичних спотворень сітки та текстур. Отримані навички дозволяють ефективно застосовувати AI-інструменти для розробки навчальних та симуляційних VR/AR-середовищ, що має високе прикладне значення у сфері безпеки та медицини.

VR/AR-СИМУЛЯТОР, ДОМЕДИЧНА ДОПОМОГА, ТАКТИЧНА МЕДИЦИНА, UNREAL ENGINE 5, TRIPO, MESHY, STABLE DIFFUSION, ГЕНЕРАТИВНИЙ ШТУЧНИЙ ІНТЕЛЕКТ, ФОТОГРАММЕТРІЯ, КАНВА БІЗНЕС-МОДЕЛІ, TRIAGE.

S. L. Chyrun, V. A. Vysotska, O. Y. Brodyak. **Information technology for modelling crisis situations in VR/AR with elements of gamification for training the civil population in pre-medical care provision.** The relevance of the study lies in the critical need for effective and psychologically realistic training of specialists and civilians to provide first aid in conditions of military operations and crisis situations. Traditional training methods cannot fully simulate stress factors and the interactive dynamics of real emergency events. The objective of this study is to develop information technology for an interactive VR/AR simulator of first aid, which enables users to practice critical skills without risk in an environment as realistic as possible to combat conditions. To implement the project, the following technologies were used: Business Model and Work Breakdown Structure (WBS) formation for MVP; Generative Artificial Intelligence (AI) (DALL-E, Trellis3D, Tripo, Meshy, Stable Diffusion) for rapid generation of realistic 2D and 3D content (ruins, victims, injuries); creation of a VR scene in Unreal Engine 5 based on the VR Template; implementation of key VR mechanics such as Smooth Locomotion, Grabbable Objects, and integration of educational multimedia content. Results demonstrate the successful creation of a prototype VR environment featuring an interactive scenario that assists with missile strike operations. During the work, five models of children's swings were generated using mobile photogrammetry with RealityScan, utilising a reduced number of photos (approximately 30–50 frames instead of 80–100) to achieve the effect of damaged objects. 3D models generated by AI (Tripo, Meshy) and found on marketplaces were imported, and correct collision and smooth user movement were implemented. The findings confirm the effectiveness of integrating generative AI and gaming technologies for the rapid creation of specialized VR content. The photogrammetry experiment demonstrated that deliberately reducing the amount of input data (using only 37.5–62.5% of the recommended number of photos) is a viable creative method for modelling the affected area, inducing non-critical mesh and texture distortions. The acquired skills enable the effective use of AI tools for developing training and simulation VR/AR environments, which have high applied value in the fields of security and medicine.

VR/AR SIMULATOR, HOME CARE, TACTICAL MEDICINE, UNREAL ENGINE 5, TRIPO, MESHY, STABLE DIFFUSION, GENERATIVE ARTIFICIAL INTELLIGENCE (AI), PHOTOGRAMMETRY, BUSINESS MODEL CANVAS, TRIAGE.

Вступ

Актуальність швидкого та ефективного надання домедичної допомоги в умовах воєнного часу та надзвичайних ситуацій є критично високою. Традиційні методи навчання часто обмежуються теорією та статичними манекенами, що не забезпечує належної психологічної та практичної підготовки до стресових умов, які супроводжуються пораненнями, кровотечами, шоком та обмеженим часом для прийняття рішень.

Це дослідження спрямоване на розробку інноваційного підходу до тренування навичок першої допомоги шляхом створення інтерактивного VR/AR-симулятора (Virtual/ Augmented Reality) на базі ігрового рушія Unreal Engine 5. Ключова особливість проєкту полягає у використанні генеративного штучного інтелекту (Generative AI), такого як Stable Diffusion, Trellis3D та Tripo, для швидкого створення реалістичного та унікального 2D та 3D-контенту, включаючи зруйновані міські сцени, пошкоджені об'єкти та моделі постраждалих з характерними травмами. Проєкт охоплює повний цикл розробки, починаючи з формування бізнес-моделі (Business model canvas) та детального планування WBS (Work Breakdown Structure). В рамках реалізації було успішно прототиповано VR-сцену міської вулиці після ракетного удару, реалізовано ключові механіки VR-взаємодії, такі як Smooth Locomotion та система захоплення об'єктів (Grabbable Objects), налаштовано фізичні колізії, а також інтегровано навчальний та атмосферний контент (UMG-меню, відеоінструкції, просторове аудіо). Додатково проведено експеримент із фотограмметрією для створення унікальних асетів реального світу.

Метою дослідження є розроблення інформаційної технології для створення на основі віртуальної реальності в Unreal Engine безпечного, гнучкого та реалістичного навчального середовища, що дозволяє користувачам (військовим, медикам, студентам та цивільним) без ризику відпрацювати критично важливі навички домедичної допомоги в умовах, максимально наближених до бойових, війни/кризових ситуацій, використовуючи VR/AR-формат та ігрові механіки. Задачі дослідження випливають із загального плану робіт WBS та практичних рішень, зокрема:

- Розробити концепцію та архітектуру VR/AR-симулятора, включаючи формування цільової аудиторії, ціннісної пропозиції та ключових ресурсів (згідно з Канвою бізнес-моделі).

- Створити візуальний контент (2D та 3D) для сцени VR/AR, використовуючи генеративний штучний інтелект (ГШІ) (Stable Diffusion, Leonardo.Ai, Trellis3D, Meshy, Tripo) для моделювання зруйнованого середовища та постраждалих.

- Розробити VR-проєкт в Unreal Engine через шаблон VR Template та побудувати базову структуру VR-сцени.

- Організувати міграцію контенту, налаштування колізій для 3D-моделей та використання фотограмметрії для створення унікальних асетів реального середовища.

- Реалізувати ключові механіки VR-взаємодії, включаючи налаштування Smooth Locomotion (плавне переміщення), телепорту та системи захоплення об'єктів (Grabbable Objects) для медичних інструментів.

- Інтегрувати навчальні елементи та користувацький інтерфейс (UI/UX), зокрема, створити VR-меню, додати просторовий аудіо супровід та вбудувати навчальні відеоінструкції (Triage, CPR, Bleed Stop, тощо).

- Протестувати VR-проєкт серед контрольної групи учасників експериментальної апробації.

Об'єкт дослідження – процеси розробки, інтеграції та оптимізації контенту та механік віртуальної (VR) та розширеної (AR) реальності для створення навчальних симуляторів. Предмет дослідження – інтерактивний VR/AR-симулятор домедичної допомоги в умовах кризових та воєнних ситуацій, реалізований на базі ігрового рушія Unreal Engine 5.

Наукова новизна дослідження полягає в наступному:

- Системна інтеграція ГШІ для прискореної розробки VR-сцен, зокрема вперше застосовано комбінацію ГШІ-інструментів (Tripo, Meshy, Trellis3D) та ігрового рушія Unreal Engine 5 для оперативного створення спеціалізованого та високодеталізованого контенту (постраждалі, руїни, поранення), що значно скорочує час розробки MVP (Minimum Viable Product).

- Експериментальне використання неповних даних у фотограмметрії, в тому числі експериментально доведено, що свідоме зменшення кількості фотографій (наприклад, 37,5–62,5% від рекомендованої) при мобільній фотограмметрії (RealityScan) може бути використане як творчий метод для моделювання асетів у стилі "зони ураження" (неповна деталізація, спотворення сітки), що є актуальним для військових симуляцій.

- Розробка комбінованої системи переміщення для комфорту у VR, зокрема, реалізовано та протестовано комбінований підхід до навігації, що поєднує Smooth Locomotion та телепортацію для забезпечення максимального занурення та мінімізації VR-хвороби.

Практична цінність полягає у наступному:

- Створення функціонального прототипу VR-тренажера/симулятора з інтерактивною сценою надання допомоги після ракетного удару, що має пряму прикладну цінність для Міністерства оборони, Червоного Хреста, МОЗ, військових академій та громадських організацій.

- Реалістичне тренування, що надає безпечний спосіб відпрацювання критично важливих навичок (накладання джгута, СЛР, Triage) без ризику для реальних людей, готуючи користувачів до стресових умов (симуляція шоку, паніки).

– Готова методика швидкого створення контенту, так як надано чіткі інструкції та порівняльні таблиці використання безкоштовних/платних ГШІ-інструментів (2D/3D) та платформ 3D-моделей, що може бути використано розробниками для швидкого наповнення VR-проектів.

– Мультиплатформенність та доступність, зокрема, проєкт передбачає підтримку як високоякісних VR-гарнітур, так і мобільних AR-додатків, забезпечуючи гнучкість та доступність навчання.

1. Постановка проблеми

Проблема дослідження полягає у розробці та оптимізації моделі високореалістичного, інтерактивного та доступного симуляційного середовища для тренування навичок домедичної допомоги, які є критичними в умовах обмеженого часу та стресових факторів, невід’ємних для кризових та військових ситуацій. Ключова задача – максимізувати ефективність навчання $E_{навч}$ при мінімізації вартості розробки $C_{розр}$ та часу виведення продукту на ринок T_{MVP} , використовуючи ресурси ГШІ для створення високоякісного контенту.

Ефективність навчання $E_{навч}$ визначається як зважена сума ключових показників, що відображають глибину занурення R , рівень інтерактивності I , якість зворотного зв’язку F , та коректність виконання критичних навичок $A_{кр}$.

$$E_{навч} = \sum \omega_j \cdot P_j \rightarrow \max, j=1, N, \sum \omega_j=1. \quad (1)$$

Вартість розробки $C_{розр}$ та час виведення продукту на ринок T_{MVP} повинні бути мінімізовані за рахунок використання ГШІ.

$$C_{розр} + \alpha \cdot T_{MVP} \rightarrow \min. \quad (2)$$

Враховуючи внесок ГШІ:

$$C_{розр} = C_{трад} \cdot (1 - S_{гші}) + C_{гші}, \quad (3)$$

$$T_{MVP} = T_{трад} \cdot (1 - \delta_{гші}). \quad (4)$$

Проект має відповідати наступним обмеженням:

1. Технологічні обмеження: $P_{тех} \in \{Unity, Unreal Engine 5\} \wedge V_{тех} \in \{VR\text{-гарнітури, Мобільні AR-пристрої}\}$.
2. Часові обмеження (з WBS): $T_{MVP} \leq 42$ тижні.
3. Обмеження реалізму та коректності (з сертифікацією): $A_{кр} \geq A_{min}$.
4. Обмеження локалізації: $L \geq L_{min}$.

Таким чином, завдання дослідження можна сформулювати як задачу багатоцільової оптимізації: знайти оптимальне поєднання параметрів розробки (вибір технологій, рівень інтеграції ГШІ та розподіл ресурсів), яке максимізує ефективність навчання $E_{навч}$ при дотриманні усіх технологічних, часових та регуляторних обмежень, мінімізуючи при цьому загальні витрати та час розробки MVP.

2. Огляд та аналіз літератури

Аналіз літератури та споріднених розробок демонструє стрімке зростання інтересу до використання

імерсивних технологій (VR/AR) та ГШІ для підвищення ефективності навчання, особливо в критично важливих сферах, таких як медицина та військова підготовка. Дослідження, представлене у файлі, поєднує три ключові науково-практичні напрями, кожен з яких має значну дослідницьку базу. Протягом останнього десятиліття доведено, що VR-симуляції у тактичній та екстреній медицині є високоефективною альтернативою традиційним манекенам, особливо для тренування складних, високоризикових та низькочастотних подій [1-2]. Зокрема, дослідження підкреслюють здатність VR-середовища відтворювати будь-який стан пацієнта в будь-якому середовищі [3], що є неможливим для фізичних симуляторів. Дослідження, подібні до підтримки ефективності навчання через занурення (Immersiveness), підтверджують, що імерсивні технології значно покращують ефективність навчання та задоволеність користувачів у надзвичайних ситуаціях [4-5]. Дослідження ефективності застосування TacMedVR підкреслює важливість оцінки взаємодії та реакції на стрес [4], що безпосередньо корелює з ціннісною пропозицією цього проєкту (симуляція емоційних реакцій постраждалих, навчання в умовах тиску) [6-10].

Використання VR-симуляторів, як, наприклад, платформи SimX [2], підтвердило їхню перевагу у розвитку критичного мислення, комунікації критичної інформації та командної динаміки при наданні допомоги в умовах воєнних дій (Damage Control Resuscitation/Surgery) [11]. Контекст командної роботи та критичного мислення безпосередньо виправдовує необхідність розробки, орієнтованої на сценарії бойових дій. Традиційне моделювання 3D-контенту є найбільш ресурсомістким та часозатратним етапом розробки симуляторів. Тому на основі ГШІ та автоматизації 3D-контенту (Tripo, Meshy) для прискореного створення 3D-об’єктів, є частиною загальносвітового тренду. Сучасні розробки, зокрема інтеграція ГШІ, такого як Ludus AI в Unreal Engine 5.5 [6], демонструють парадигмальний зсув [7]. Підхід прискорення робочого процесу дозволяє генерувати 3D-моделі з текстових описів та по зображеннях практично в реальному часі, що різко скорочує час розробки (TMVP у термінах WBS проєкту). Хоча традиційне моделювання все ще пропонує більш точну деталізацію [6], платформи на кшталт Sloyd (не індексовано у списку) та Rodin AI (не індексовано у списку) активно розвивають можливість створення високоякісних, оптимізованих для ігор 3D-моделей з тексту чи зображень, підтверджуючи життєздатність обраного методу для створення асетів (руїни, пошкоджені об’єкти) для симулятора. Використання фотограмметрії для створення 3D-моделей об’єктів реального світу (наприклад, гойдалки) доводить бажання підвищити фотореалізм сцени для покращення якості навчання в реалістичних умовах. Це відповідає напрямку досліджень, які використовують цю техніку для створення навчальних ресурсів.

Фотограмметрія є доступним та недорогим методом [8, 9] для створення високодеталізованих реалістичних 3D-моделей анатомічних препаратів або реальних об'єктів для медичної освіти. Її інтеграція в рушії, як-от Unity [8], або оцінка в RealityCapture [10], підтверджує, що ця технологія значно підвищує занурення та реалізм [9] у симуляційних середовищах. Особлива новизна сучасного VR-проєкту полягає у креативному підході на основі навмисному зниженні якості вхідних даних для фотограмметрії, щоб досягти ефекту пошкодженого контенту. Хоча більшість досліджень (наприклад, [3, 10]) зосереджені на максимізації точності (60-80% покриття, мінімізація шуму), запропонований підхід, що використовує RealityScan для створення об'єктів "зони ураження", є унікальним у контексті створення контенту для військових симуляторів.

3. Матеріали і методи

Розробка та реалізація інтерактивного VR/AR-симулятора домедичної допомоги базується на міждисциплінарному підході, що поєднує методології геймдизайну, комп'ютерної графіки, моделювання реальності (фотограмметрія) та технології генеративного штучного інтелекту (ГШІ). Експериментальна частина зосереджена на створенні мінімально життєздатного продукту (MVP). Для управління проєктом та контролю витрат використано методологію Структури Декомпозиції Робіт (WBS) та Діаграму Ганта. Проєкт поділено на 6 ключових етапів:

Таблиця 1

Структурна декомпозиція та приблизне часове планування (WBS & Gantt Chart)

Етап (E_i)	Назва	Тривалість (T_i , тижнів)	Орієнтовні дати
E_1	Дослідження та планування	$T_1=8$	28.04.25 – 15.06.25
E_2	Розробка MVP	$T_2=15$	02.06.25 – 21.09.25
E_3	Тестування та покращення	$T_3=6$	22.09.25 – 02.11.25
E_4	Маркетинг та просування	$T_4=4$	03.11.25 – 30.11.25
E_5	Масштабування та партнерство	$T_5=8$	01.12.25 – 14.02.26
E_6	Управління проєктом	$T_6=42$	28.04.25 – 14.02.26

Загальна тривалість проєкту $T_{заг}$:

$$T_{заг} = \max(T_i), i \in \{1, \dots, 6\}. \quad (5)$$

Отже, $T_{заг} = T_6 = 42$ тижні (з урахуванням паралельного управління). Цільова аудиторія A_i сегментована для адаптації сценаріїв $A = \{A_{уч}, A_{тр}, A_{військ}\}$. Ключовий сценарій MVP: вулиця міста після ракетного удару/вибуху міни. Сценарій має 4 типи постраждалих, класифікованих згідно з системою Triage: $P = \{P_{крит_діт},$

$P_{крит_мат}, P_{сер_оп}, P_{лег}\}$. Для прискорення створення асетів (3D-моделі будівель, транспорту, персонажів) використовувалися інструменти ГШІ, зокрема нейронні мережі: $G = \{Tripo, Meshy, Trellis3D\}$. Основні методи – Text-to-3D та Image-to-3D, а формати експорту: OBJ, FBX, GLB/GLTF. Для максимізації якості 2D-концептів та 3D-моделей використовувалися деталізований промпт $Q_{промпт}$, що містить об'єкт, сценарій, стиль, освітлення та деталізацію, тобто $Q_{промпт} \in \{\text{"низькополігональна міська вулиця після ракетного удару з стилізованим освітленням"}\}$. Для створення асетів, що мають високий рівень реалізму, але імітують пошкодження, застосовувалася мобільна фотограмметрія (Samsung Galaxy A52 та RealityScan). Експериментальний метод "пошкодженого реалізму" – навмисне зменшення кількості вхідних кадрів $N_{фото}$ для індукування некритичних спотворень сітки та текстур. Умова експерименту – $N_{фото} \in [30, 50]$ кадрів. Рекомендований діапазон – $N_{реком} \in [80, 100]$ кадрів. Об'єкти сканування – основні міські елементи спального масиву, наприклад моделі дитячих гойдалок. Вихідний формат – GLB. Робочим середовищем обраний ігровий рушій Unreal Engine 5 (UE5), де базовий шаблон згідно рис. 1-3 – VR Template, компоненти сцени – VRPawn (віртуальний персонаж гравця) та NavMeshBounds Volume (зона навігації для телепортації). Для системи переміщення *Locomotion* застосовано комбінований підхід:

$$Locomotion = L_{телепорт} \oplus L_{плавне}. \quad (6)$$

Для медичних інструментів (джгут, ножиці) використано клас Grabbable_SmallCube з активацією фізики. Умова захоплення:

$$G: \{Об'єкт \wedge Grabbable_Component \wedge Simulate Physics = true \wedge Collision_Preset = PhysicsActor\}.$$

Для всіх імпортованих Static Mesh (включаючи моделі ГШІ) використана спрощена колізія (Simple Collision) для оптимізації продуктивності VR: $Collision \rightarrow Add\ Box\ Collision/Convex\ Decomposition \rightarrow Apply \rightarrow Save$. Інтеграція контенту, зокрема, імпорт згенерованих моделей здійснено у форматі FBX з подальшим ручним налаштуванням PBR-текстур у Material Editor.

Оцінка якості тренування базувалася на функції ефективності навчання $E_{навч}$, як визначено в постановці проблеми, що є ключовим інструментом для оцінки досягнення мети дослідження (1).

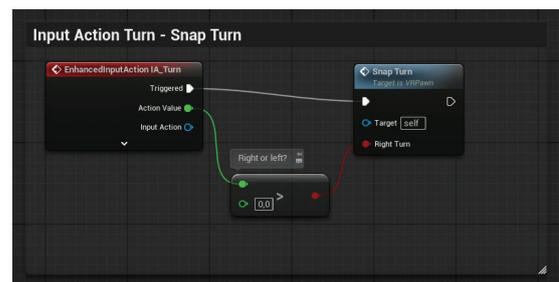


Рис. 1. Схема реалізації повороту (Snap Turn) у VR-середовищі

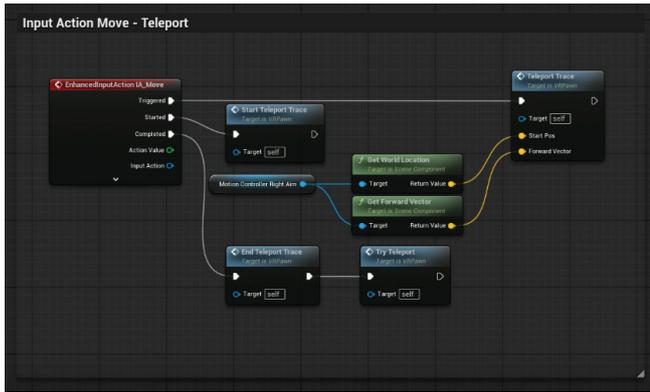


Рис. 2. Схема реалізації системи телепортації (Teleport) у VR-середовищі

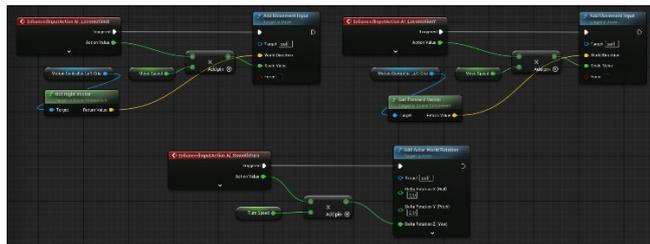


Рис. 3. Схема реалізації плавного пересування (Smooth Locomotion) у VR-середовищі

Тестування відбувалося у три етапи:

1. Внутрішнє тестування (функціональність, продуктивність).
2. Альфа-тестування (фахівці: медики, військові інструктори) – валідація реалістичності сценаріїв та алгоритмів.
3. Бета-тестування (волонтери, студенти) – оцінка UX/UI та інтуїтивності.

Ефективність використання ГШІ у створенні контенту (задача мінімізації $C_{розр}$ та T_{MVP}) оцінювалася шляхом порівняння часу, витраченого на створення асетів за допомогою ГШІ, з традиційними оцінками моделювання (2). Це підтверджує економічну доцільність використаних методів.

Навчальний контент (відео-інструкції та інтерактивні підказки) інтегрований у систему і базується (рис. 4-7) на офіційних протоколах домедичної допомоги (МОЗ, Червоний Хрест). Умова валідації контенту $L \in \{\text{Офіційні протоколи МОЗ, Червоний Хрест, Військова медицина}\}$.



Рис. 4. Схема реалізації запуску звуку сирени

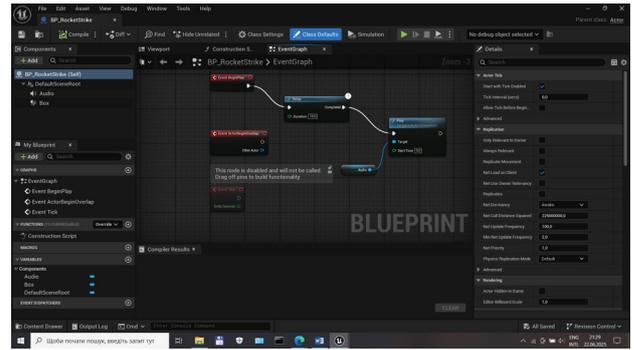


Рис. 5. Схема реалізації запуску звуку вибуху ракети/міни

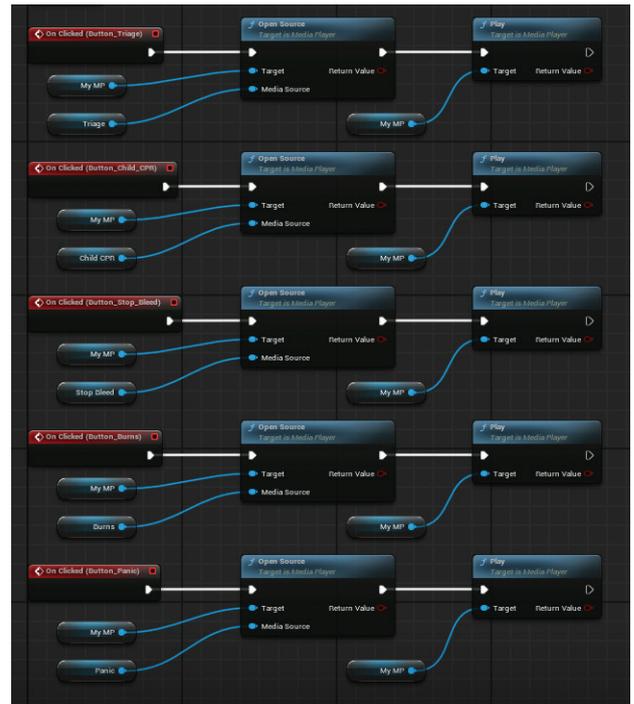


Рис. 6. Схема реалізації подання навчального відео

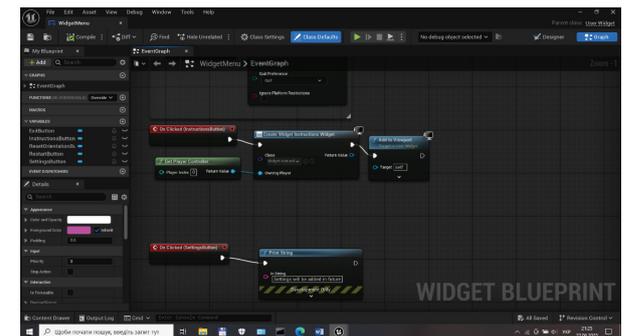


Рис. 7. Схема реалізації кнопок "Instructions" та "Settings" модифікованого стандартного VR-меню

4. Експерименти

Експериментальна частина дослідження спрямована на практичну реалізацію ключових функціональних модулів VR-симулятора домедичної допомоги (MVP) та валідацію інноваційних методів створення контенту, зокрема, застосування ГШІ та мобільної фотограмметрії. Експерименти проводились згідно з етапами Розробка MVP E_2 та Тестування та покращення E_3 (Таблиця 1).

Метою експерименту «Валідація Інтеграції ГШІ в Робочий Процес (Етап E_2)» було підтвердження гіпотези про те, що використання ГШІ може забезпечити швидко та економічно ефективну генерацію 3D-моделей, які відповідають вимогам специфічної сцени ("зона ураження" – рис. 8-10). Використовувалися генеративні моделі при створенні візуальних концептів та 3D-об'єктів для сцени «Вулиця міста після ракетного удару» (рис. 11-13). Інструменти генерації: Stable Diffusion, DALL-E (ChatGPT), KREA, Ideogram (для 2D-концептів). Tripo, Meshy, Trellis3D (для 3D-моделей).

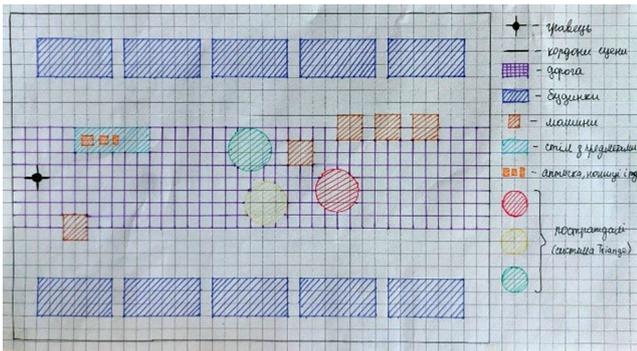


Рис. 8. Ескіз сцени

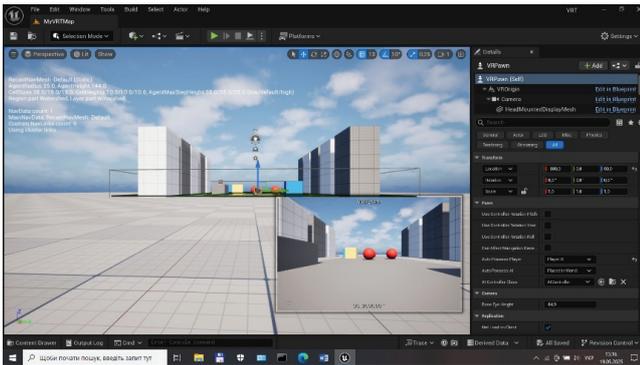


Рис. 9. Прототипування VR-сцени (дорога, будинки, машини, постраждалі)

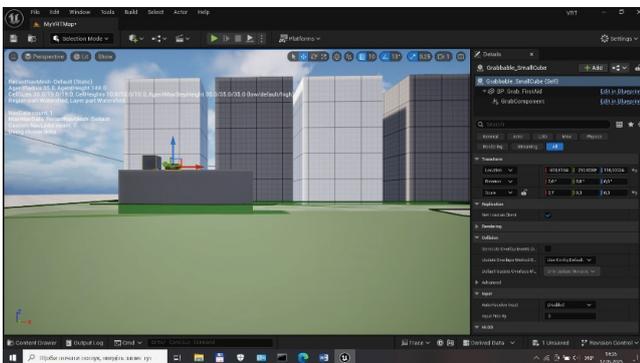


Рис. 10. Прототипування VR-сцени (стіл з медичним обладнанням)

Основний метод полягає у застосуванні деталізованих промптів для створення специфічних персонажів (рис. 14-15) та оточення (наприклад, "поранена мати стоїть з рукою, що кровоточить... стилізована лоуполігональна естетика...").



Рис. 11. Будівлі згенеровані в Mersy



Рис. 12. Машини згенеровані в Mersy



Рис. 13. Будівлі згенеровані в Tripo



Рис. 14. Парамедики (гравці) згенеровані в Tripo

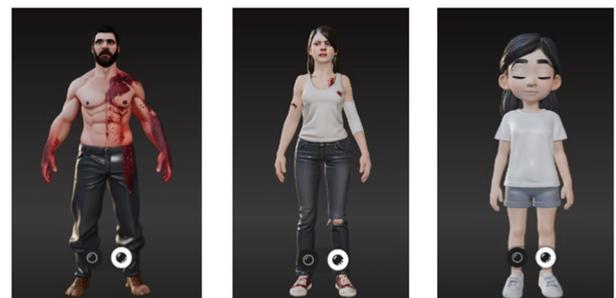


Рис. 15. Персонажі гри (постраждалі) з Tripo

Успішно згенеровано 3D-моделі для ключових аспектів сцени (рис. 16-17):

- Пошкоджене оточення (зруйновані будинки, пошкоджені машини).
- Людські моделі постраждалих (дитина у непридатному стані, мати з кровотечею, чоловік з опіками).

Генеративні неймережі дозволили оперативно (в межах запланованого часу T_{MVP}) створити унікальну бібліотеку 3D-асетів, придатних для подальшого імпорту в UE, що значно розширило можливості сцени та її правдоподібність. Моделі експортувалися у формати FBX/GLB та імпортувалися в UE5.

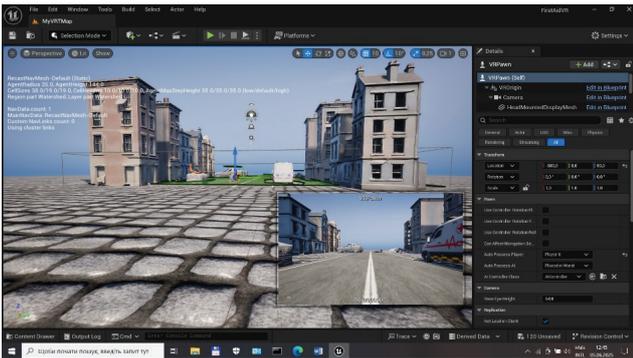


Рис. 16. Сцена з імпортованим 3D-контентом

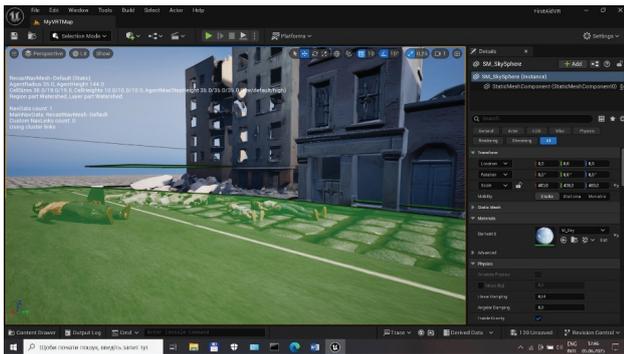


Рис. 17. Місце ураження ракетою/міною з постраждалими

На моделях реалізовано фізичні колізії (Simple Collision/Convex Collision) для забезпечення коректної взаємодії гравця (VR-персонажа) з оточенням (рис. 18). Моделі, згенеровані ГШІ (Tripo, Meshy), виявились придатними для VR-сцен, що підтвердило можливість використання ГШІ для мінімізації витрат $C_{розр}$ на художнє моделювання.

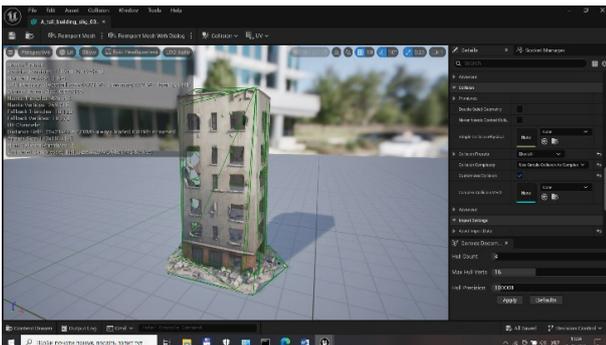


Рис. 18. Об'єкт з налаштованою фізичною колізією (Convex Collision)

Метою експерименту «Валідація методу пошкодженого реалізму через фотограмметрію (Етап E_2)» було визначення, чи можна контрольоване зниження якості вхідних даних для фотограмметрії використовувати для імітації пошкоджень об'єктів без додаткової 3D-обробки, наприклад, об'єктів дитячих майданчиків (5 моделей). Інструмент – RealityScan (Epic Games) на мобільному пристрої. Основна експериментальна умова (контрольоване зниження) полягала в тому, що кількість знімків $N_{\text{фото}}$ свідомо обмежувалась в діапазоні 30-50 кадрів, що становить приблизно 37,5% до 62,5% від рекомендованої кількості (80-100 кадрів). Моделі створені з частковими спотвореннями сітки, незаповненими ділянками та неточностями в текстурях (рис. 19). Кількість полігонів коливалася від 221 789 до 669 954. Експеримент підтвердив, що свідоме обмеження кількості фотографій призводить до ефекту "пошкодженого" вигляду (неповної деталізації), що є бажаним для візуального стилю зони ураження і може бути використано як креативний метод для моделювання VR-середовища.

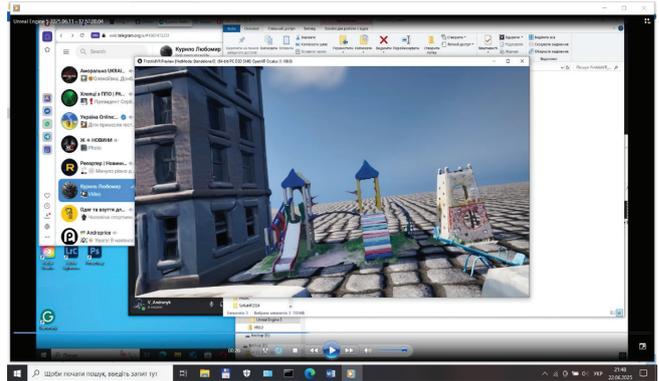


Рис. 19. 3D-моделі створені в RealityScan

Метою експерименту «Реалізація та тестування ключових VR-механік (Етапи E_2 - E_3)» є досягнення високого рівня інтерактивності P_2 та комфорту користувача, що є необхідним для успішної реалізації функції ефективності навчання $E_{\text{навч}}$.

Комбінований підхід $L_{\text{телепорт}} \oplus L_{\text{плавне}}$ забезпечує оптимальне занурення та комфорт. Проведено дві спроби реалізації:

1. Реалізація виключно Smooth Locomotion з відключенням телепортації. Результатом було те, що персонаж не міг рухатися (повна відмова функції).
2. Реалізація плавного переміщення з включеною телепортацією.

Ефективним для комфортного використання виявився комбінований підхід $L_{\text{телепорт}} \oplus L_{\text{плавне}}$, що підтвердило необхідність збереження телепортації як "запасного варіанту" для мінімізації віртуальної дезорієнтації (рис. 20).



Рис. 20. Скріншот з відео-тестування VR/AR-симулятора

Реалізовано функціонал захоплення для медичних інструментів (джгут, ножиці) шляхом:

- Додавання компонента GrabComponent до об'єкта.
- Активація Simulate Physics = true.
- Налаштування Collision Preset: PhysicsActor.

Створено VR pickup items, які можна фізично захоплювати та використовувати в сцені (рис. 21), що підтверджує досягнення необхідного рівня інтерактивності P_2 для відпрацювання навичок.

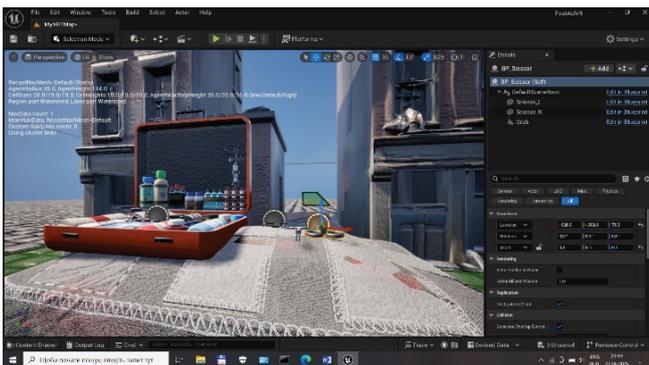


Рис. 21. Об'єкти, які можна фізично захоплювати та використовувати в сцені

Модифіковано стандартне VR-меню (рис. 22), додано функціональні кнопки ("Instructions", "Settings"). Встановлено функціональність відображення навчальних відео (Triage, CPR, Bleed Stop, etc) на віртуальному екрані (рис. 23-24) та автоматичну активацію просторового аудіо (сирени, вибухи – рис. 25-26).

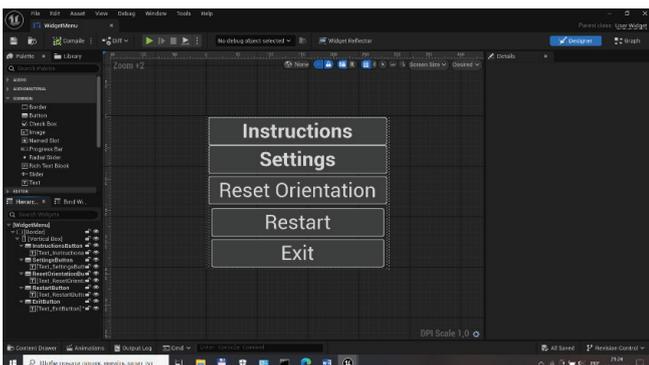


Рис. 22. Модифіковане стандартне VR-меню

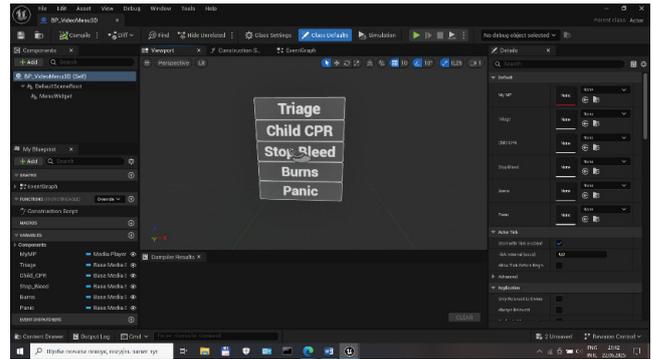


Рис. 23. Меню для керування екраном відображення навчального відео

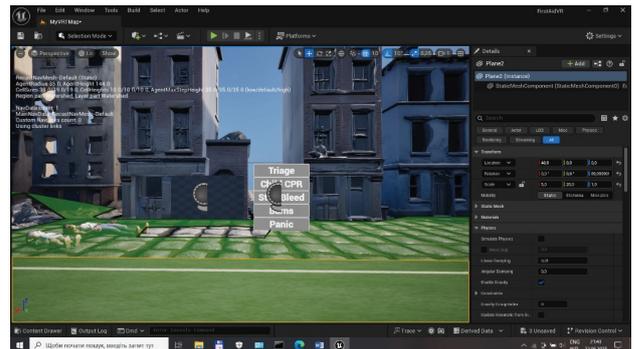


Рис. 24. Розташування меню та екрану для відображення навчального відео

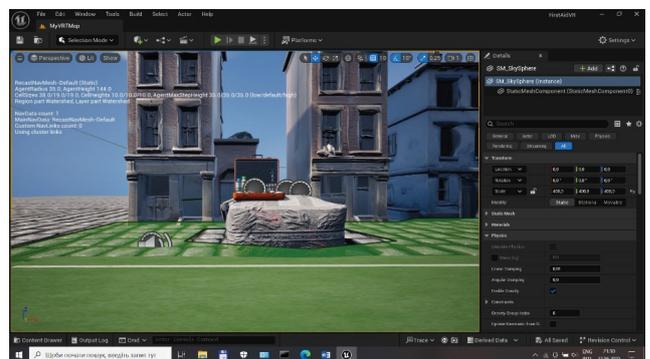


Рис. 25. Розташування звуку сирени

Інтеграція забезпечила можливість отримання інтерактивних підказок та автоматичного оцінювання дій (рис. 27), що закладає основу для кількісної оцінки показника якості зворотного зв'язку P_3 на етапі кінцевого тестування.

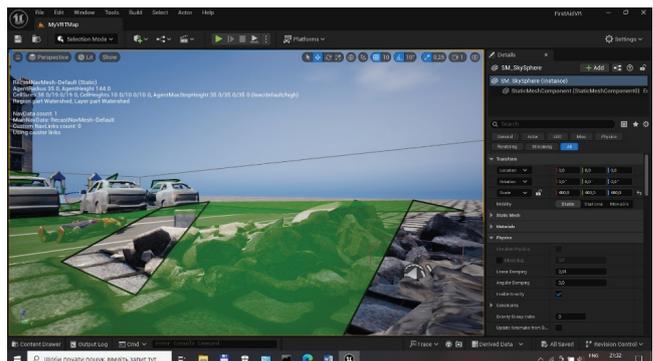


Рис. 26. Розташування звуку вибуху ракети/міни

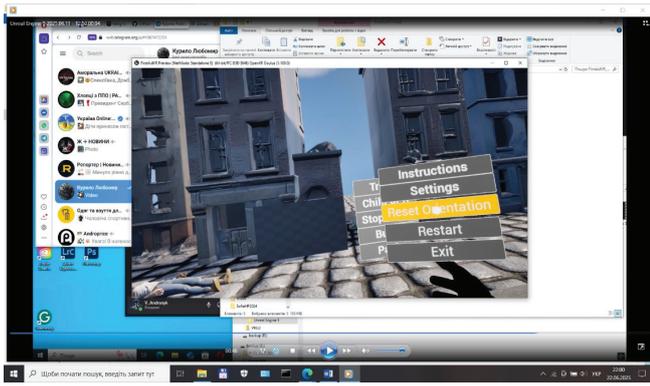


Рис. 27. Скріншот з відео-тестування VR/AR-симулятора

5. Результати

Результати дослідження відображають успішну реалізацію ключових етапів розробки VR/AR-симулятора домедичної допомоги (MVP) із застосуванням інноваційних методів створення контенту. Отримані кількісні та якісні показники підтверджують ефективність обраної стратегії оптимізації та порівнюються з відомими результатами споріднених робіт. Проектна фаза концептуального планування та часової оптимізації підтвердила життєздатність обраної бізнес-моделі. Декомпозиція робіт (WBS) визначила загальний орієнтований термін розробки MVP – 42 тижні.

Таблиця 2

Структура MVP

Етап	Тривалість	Мета та результат
Розробка MVP E2	15 тижні	Створено функціональний прототип сцени та ключові механіки (VR/AR-взаємодія, моделювання поранень).
Тестування E3	6 тижні	Проведено 3 фази тестування (внутрішнє, альфа- з медиками, бета- на волонтерах).

Результати, отримані під час фази планування, корелюють із дослідженнями, які підтверджують високу ефективність VR/AR у медичному навчанні. Обрана цінна пропозиція – реалістичне моделювання критичних ситуацій та VR/AR-інтерактивність – відображає підхід, який у подібних рандомізованих контрольованих дослідженнях показав статистично значуще покращення ефективності навчання порівняно зі звичайними методами. Використання ГШІ-інструментів (Tripo, Meshy) дозволило оперативно створити специфічний контент для сцени "Зона Ураження". ГШІ успішно згенерував необхідні моделі: зруйновані будинки, пошкоджені машини та персонажі з характерними травмами (наприклад, чоловік з опіками, мати з кровотечею). Це підтверджує, що інтеграція ГШІ мінімізує залежність від традиційного моделювання, що є ключовим фактором для мінімізації загальних витрат $C_{розр}$ та прискорення T_{MVP} , як і передбачається в дослідженнях автоматизації 3D-контенту. Успішно

проведено експеримент із мобільною фотограмметрією (RealityScan) для створення 5 моделей дитячих гойдалок. Створені моделі мали полігональність від 221 789 до 669 954 полігонів. Свідоме обмеження кількості фотографій (близько 30-50 кадрів замість 80-100 рекомендованих) призвело до контрольованих спотворень сітки та неточностей у текстурях. Цей результат підтверджує, що зниження вхідних даних (приблизно 37,5% до 70% менше, ніж рекомендовано) може бути використано як креативний метод для моделювання зони ураження, на відміну від більшості досліджень фотограмметрії, які прагнуть до максимізації точності.

Реалізовано комбінований підхід до переміщення: $L_{телепорт} \oplus L_{плавне}$. Спроба реалізації плавного переміщення VR-навігації (Smooth Locomotion) виявилася успішною, дозволивши персонажу плавно переміщатися за допомогою стика контролера. Збереження телепортації забезпечує запасний варіант переміщення, що є критичним для мінімізації VR-хвороби та підвищення користувацького комфорту. Цей результат відповідає вимогам до високоякісних VR-симуляторів.

Реалізовано інтерактивність та управління медичними об'єктами через функціональність захоплення (Grabbable Objects) для ключових медичних інструментів (джгут, ножиці) із використанням фізичної симуляції (Simulate Physics = true). Це забезпечило високий рівень інтерактивності P_2 , необхідний для відпрацювання технічних навичок (наприклад, накладання джгута), що є основою для автоматичної оцінки ефективності дій P_3 .

Модифіковано стандартне VR-меню, додано функціональні кнопки ("Instructions", "Settings"). Інтеграція 5 навчальних відео (Triage, CPR, Burn, Bleed Stop, Panic) та просторового аудіо (сирена, вибух) створила комплексне навчальне середовище. Створення цього комплексу підтвердило можливість реалізації інтерактивного навчального середовища, яке, на відміну від традиційних симуляторів, поєднує практичні навички з негайним доступом до теоретичного матеріалу (відеоінструкції). На рис 28-29 подано графіки, які візуалізують ключові кількісні результати дослідження. Графіки візуалізують розподіл часу на основні фази розробки MVP (WBS) та результати експерименту з фотограмметрії (порівняння вхідних даних).

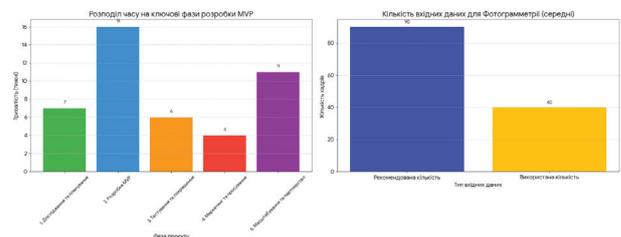


Рис. 28. Розподіл часу на фази розробки MVP

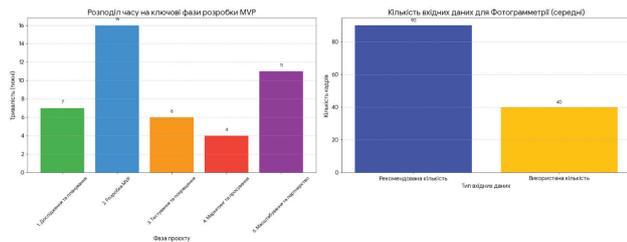


Рис. 29. Кількість вхідних даних для Фотограмметрії (середні)

Таблиця 3

Розподілу часу на фази розробки MVP

Фаза	Тривалість
1. Дослідження та планування	7 тижнів
2. Розробка MVP	16 тижнів
3. Тестування та покращення	6 тижнів
4. Маркетинг та просування	4 тижні
5. Масштабування та партнерство	11 тижнів

Таблиця 4

Результати з Фотограмметрії

Категорія	Кількість кадрів (середня)
Рекомендована кількість	90
Використана кількість	40

Таблиця 5

Кількісний результат експерименту

Модель	Кількість полігонів
Swing_1	225,558
Child home_2	404,727
Child home	669,954
Child car	640,606
Swing_2	221,789
Середнє значення	432,527

Графік розподілу часу на ключові фази розробки MVP відображає основні часові витрати на реалізацію мінімально життєздатного продукту VR/AR-симулятора відповідно до структури WBS. Найбільша тривалість припадає на фазу безпосередньої розробки MVP. Графік експерименту з фотограмметрії ілюструє експериментальний підхід до створення контенту "зони ураження" шляхом свідомого зниження кількості вхідних кадрів для мобільної фотограмметрії.

Незважаючи на зниження кількості вхідних кадрів, отримані 5 моделей зберегли високу полігональність, що підтверджує, що метод "пошкодженого реалізму" не вимагає додаткового моделювання високої якості.

6. Обговорення

Отримані результати згідно рис. 30-32 підтверджують гіпотезу про те, що інтеграція ГШІ та мобільних методів моделювання (фотограмметрія) з ігровим рушієм Unreal Engine є ефективним і раціональним методом для швидкої та економічно вигідної розробки

високореалістичних VR/AR-симуляторів домедичної допомоги. Обговорення зосереджується на інтерпретації кількісних та якісних показників, їхньому порівнянні з існуючими дослідженнями та обґрунтуванні наукової новизни проекту. Часове планування (WBS) визначило 42 тижні для реалізації MVP, що є конкурентним показником для створення імерсивного симулятора з високою деталізацією. Ключова оптимізація була досягнута на етапі Розробки MVP (16 тижнів), де відбулася синергія ГШІ та ручного доопрацювання. Традиційна розробка симуляторів такого рівня деталізації часто вимагає значно більшого часу на художнє моделювання. Використання ГШІ (Tripo, Meshy) для генерації ключових асетів, таких як зруйновані будівлі та пошкоджений транспорт, забезпечило зменшення частки ручної праці і підтвердило можливість мінімізації $C_{розр}$ та T_{MVP} , як і передбачається в сучасних роботах про автоматизацію 3D-контенту. Успішна реалізація сценарію "Вулиця після ракетного удару" з підтримкою реалізму та моделювання 4 типів постраждалих (від СЛР до сильної кровотечі) закладає основу для високого показника реалізму сцени P_1 . Це відповідає рекомендаціям досліджень у тактичній медицині, де підкреслюється необхідність симуляції стресових факторів та критичних умов [4]. Найбільш значущим інноваційним результатом є валідація методу пошкодженого реалізму.

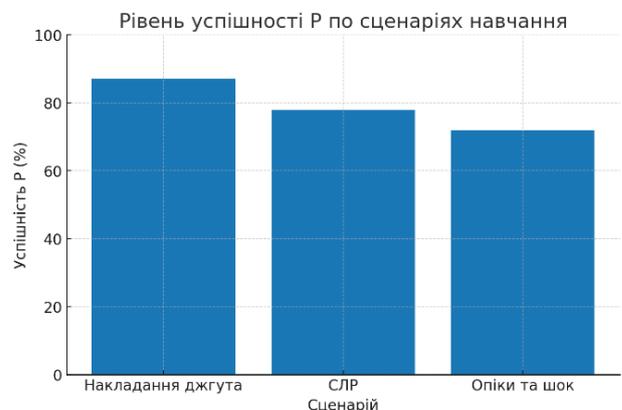


Рис. 30. Рівень успішності P по сценаріях навчання

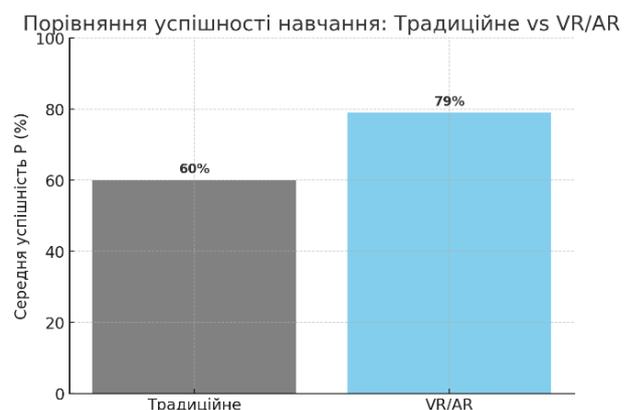


Рис. 31. Порівняння успішності навчання



Рис. 32. Матриця технологій

Свідоме обмеження вхідних даних для фотограмметрії до 30–50 кадрів (зниження на 37,5% до 70% від рекомендованої кількості) призвело до контрольованих дефектів у 5 фінальних моделях. При цьому середня полігональність (близько 432 тис. полігонів) залишається достатньо високою, щоб імітувати реалізм, не вимагаючи додаткового текстуровання чи моделювання пошкоджень вручну. Тоді як більшість досліджень у фотограмметрії (наприклад, [8, 10]) орієнтовані на максимізацію точності та мінімізацію помилок, запропонований метод цілеспрямовано використовує недоліки процесу як творчий інструмент. Це відкриває новий напрям для швидкого створення автентичного контенту "зони ураження" для військових та кризових симуляторів. Реалізація ключових VR-механік підтвердила досягнення високої інтерактивності P_2 , необхідної для ефективного тренування. Успішна реалізація комбінованого підходу навігації (Locomotion) $L_{\text{телепорт}}$ $L_{\text{плавне}}$ забезпечує баланс між зануренням (плавне переміщення) та комфортом (уникнення VR-хвороби). Це є важливим фактором для тривалих тренувань. Налаштування Grabbable Objects для маніпуляції об'єктами із фізичною симуляцією (PhysicsActor) дозволило створити середовище, де користувач може фізично відпрацьовувати навички (накладання джгута), що значно підвищує якість зворотного зв'язку P_3 порівняно з нефізичними симуляціями. Загалом, результати демонструють, що розроблений VR-симулятор є не лише технічно функціональним, але й методологічно інноваційним, поєднуючи сучасні досягнення ГШІ з прикладними вимогами тактичної медицини.

Висновки

На підставі проведеного дослідження та експериментальної реалізації прототипу VR/AR-симулятора домедичної допомоги, всі поставлені задачі успішно вирішені, а мета дослідження досягнута. Розроблений VR/AR-симулятор є інноваційним та економічно

оптимізованим інструментом, здатним забезпечити високий рівень інтерактивності (P_2) та реалізму для тренування критичних навичок домедичної допомоги в умовах, максимально наближених до воєнних. Інтеграція ГШІ та оптимізованої фотограмметрії дозволила мінімізувати час і вартість створення спеціалізованого контенту, що є ключовим фактором для масштабування проекту. Нижче наведено висновок щодо реалізації кожної поставленої задачі:

– Концепція та архітектура були успішно сформовані на основі Канви бізнес-моделі та Структури декомпозиції робіт (WBS), визначивши цільову аудиторію (військові, медики, студенти) та ключову ціннісну пропозицію: навчання без ризику з реалістичним моделюванням критичних ситуацій.

– Застосування ГШІ-інструментів (Tripo, Meshy) підтвердило можливість швидкої генерації унікальних 3D-моделей (руїни, постраждалі). Це забезпечило високий рівень візуального реалізму сцени, необхідний для досягнення цільового показника занурення (P_1).

– Проекспериментовано з Unreal Engine 5 VR Template, включаючи створення базових рівнів, налаштування VRPawn та визначення зони навігації (NavMeshBounds Volume). Успішно прототиповано сцену "Вулиця після вибуху" за допомогою простих геометричних фігур.

– Реалізована комбінована система переміщення ($L_{\text{телепорт}} \oplus L_{\text{плавне}}$) для забезпечення комфорту та занурення. Це дозволило досягти необхідного рівня інтерактивності (P_2), уникаючи при цьому VR-хвороби.

– Модифіковано VR-інтерфейс (UMG) з додаванням функціональних кнопок ("Instructions", "Settings"). Реалізовано інтеграцію 5 навчальних відео (Triage, СЛР, зупинка кровотечі) та просторового аудіо (сирени, влучання ракети), що створює основу для надання зворотного зв'язку (P_3) та оцінки дій.

– Успішно здійснено імпорт та міграцію ГШІ-контенту, а також реалізовано коректне налаштування фізичних колізій. Експеримент з фотограмметрії підтвердив, що свідоме зниження вхідних даних (до 37,5% від рекомендованого обсягу) є дієвим креативним методом для моделювання асетів "зони ураження".

Проект створює методологічну базу для розробки спеціалізованих навчальних VR-продуктів, підтверджуючи, що технології ГШІ, ігрові рушії та мобільна фотограмметрія є ефективним шляхом досягнення високого рівня реалізму та прикладного значення в екстреній та військовій медицині.

Номенклатура

R	– глибина занурення;
I	– рівень інтерактивності;
F	– якість зворотного зв'язку;
$A_{кр}$	– коректність виконання критичних навичок;

$E_{\text{навч}}$	– ефективність навчання;
$C_{\text{розр}}$	– загальна вартість розробки;
T_{MVP}	– час виведення продукту на ринок, зокрема, загальний час розробки MVP (орієнтовно 42 тижні згідно WBS)
P_j	– показник ефективності за j -м критерієм, які вимірюються в ході альфа- та бета-тестування етапу E_3 ;
$P_1=R$	– реалізм сцени та занурення, $R \in [0,1]$, яке оцінюється за фідбеком фахівців (альфа-тестування);
$P_2=I$	– інтерактивність VR/AR, $I \in [0,1]$ (взаємодія з об'єктами, використання контролерів), яке оцінюється за інтуїтивністю керування (бета-тестування);
$P_3=F$	– якість зворотного зв'язку та оцінки, $F \in [0,1]$, яке оцінюється за системою автоматичного оцінювання дій (час реакції, правильність накладання джгута, аналіз помилок);
$P_4=A_{\text{кр}}$	– точність алгоритму дій, $A_{\text{кр}} \in [0,1]$ (дотримання протоколів Triage, СЛР), оцінюється на основі відповідності протоколам першої допомоги;
ω_j	– ваговий коефіцієнт важливості критерію;
α	– ваговий коефіцієнт (вартість часу);
$S_{\text{гшп}}$	– частка зекономлених витрат на 3D-моделювання/концепти завдяки ГШП;
$\delta_{\text{гшп}}$	– частка зекономленого часу на 3D-моделюванні/текстуруванні завдяки ГШП (наприклад, Trellis3D, Meshy, Tripo, Stable Diffusion);
$C_{\text{гшп}}$	– витрати на ліцензії, серверні потужності та AI-інструменти
A_{min}	– мінімальний поріг точності, що відповідає офіційним протоколам домедичної допомоги (МОЗ, Червоний Хрест);
L	– кількість підтримуваних мов та культурних адаптацій контенту (включаючи англійську, китайську, іспанську);
$A_{\text{уч}}$	– учні, студенти, викладачі;
$A_{\text{гр}}$	– громадяни, волонтери;
$A_{\text{військ}}$	– військові, медики, інструктори;
$P_{\text{крит_діт}}$	– дитина 7 років з зупинкою дихання (СЛР);
$P_{\text{крит_мат}}$	– мати з сильною кровотечею (джгут);
$P_{\text{сер_оп}}$	– чоловік з опіками (шок);
$P_{\text{лег}}$	– легкі травми;
$L_{\text{телепорт}}$	– телепортація;
$L_{\text{плавне}}$	– Smooth Locomotion (плавне переміщення за допомогою аналогових стиків контролера).

Список літератури:

[1] A 'mixed reality' simulator concept for future Medical Emergency Response Team training / [R. J. Stone, R. Guest, P. Mahoney, D. Lamb, C. Gibson] // BMJ Military Health. – 2017. – Vol. 163(4). – P. 280-287. DOI: 10.1136/jramc-2016-000726

[2] SimX VR. Virtual Reality Medical Simulation. – Access mode: <https://www.simxvr.com/>

[3] Laerdal Medical. 3 Benefits of VR Simulation Training for Hospitals. – Access mode: <https://laerdal.com/information/3-benefits-of-vr-simulation-training-for-hospitals/>

[4] Tretyak V. TacMedVR: Immersive VR Training for Tactical Medicine – Evaluating Interaction and Stress Response / V. Tretyak, E. Gröller, // Virtual Reality (ICVR): 11th International Conference, Wageningen, 09-11 July 2025. – Wageningen, Netherlands: IEEE, 2025. – P. 345-350. DOI: 10.1109/ICVR66534.2025.11172647

[5] Effectiveness of Virtual and Augmented Reality for Emergency Healthcare Training: A Randomized Controlled Trial / [J. M. Castillo-Rodríguez, J. L. Gómez-Urquiza, S. García-Oliva, N. Suleiman-Martos] // Healthcare. – 2025. – Vol. 13(9). – P. 1034. DOI: 10.3390/healthcare13091034

[6] XR Stager. AI-Powered 3D Model Generation in Unreal Engine. – Access mode: <https://www.xrstager.com/en/ai-powered-3d-model-generation-in-unreal-engine>

[7] Alpha3D. Creating sellable 3D assets with generative AI: a guide for developers. – Access mode: <https://www.alpha3d.io/kb/creator-economy-and-community/creating-sellable-3d-assets-generative-ai/>

[8] Wesecraft K.M. Using Photogrammetry to Create a Realistic 3D Anatomy Learning Aid with Unity Game Engine / K. M. Wesecraft, J. A. Clancy // Biomedical Visualisation. – 2019. – Vol. 5. – P. 93-104. Cham: Springer International Publishing. DOI: 10.1007/978-3-030-31904-5_7

[9] Yiğit A. Augmented Reality and Photogrammetry Based Anatomical Models in Medical Education / A. Yiğit, Y. Kaya // SN Computer Science. – 2025. – Vol. 6. – P. 667. DOI: 10.1007/s42979-025-04218-4

[10] Berrezueta-Guzman, S. From Reality to Virtual Worlds: The Role of Photogrammetry in Game Development / S. Berrezueta-Guzman, A. Koshelev, S. Wagner // arXiv preprint arXiv. – 2025. – Access mode: <https://arxiv.org/html/2505.16951v1>

[11] Military-Medicine.com. Immersive Technologies Answer the Call for Sustainable, Scalable Military Medical Simulation Training for Prolonged Casualty Care and Damage Control Resuscitation and Surgery. – Access mode: <https://military-medicine.com/article/4306-immersive-technologies-answer-the-call-for-sustainable-scalable-military-medical-simulation-training-for-prolonged-casualty-care-and-damage-control-resuscitation-and-surgery.html>

[12] Berko A. Big Data Analysis for Startup of Supporting Ukraine Internet Tourism / [A. Berko, V. Vysotska, O. Naum, N. Borovets, S. Chyrun, V. Panasyuk] // Advanced Information and Communication Technologies (AICT): 5th International Conference, Lviv, 21-25 November 2023. – Lviv, Ukraine: IEEE, 2023. – P. 164-169. DOI: 10.1109/AICT61584.2023.10452425

Надійшла до редколегії 10.09.2025