



Ю.-М. Р. Кулик, А. Є. Батюк

Національний університет "Львівська політехніка", м. Львів, Україна

АНАЛІЗ, РОЗРОБЛЕННЯ ТА ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ ІНТЕРФЕЙСІВ ВЗАЄМОДІЇ У ВІРТУАЛЬНІЙ РЕАЛЬНОСТІ

Досліджено проблематику взаємодії, розроблення та практичного застосування інтерфейсів взаємодії у віртуальній реальності (ВР) з використанням сторонніх рішень, а саме – програмного забезпечення Garry's Mod на базі рушія Source та набору засобів розроблення OpenVR. Детально описано особливості та практичні особливості програмних інтерфейсів для взаємодії користувача з віртуальним середовищем, що дають змогу забезпечити високий рівень імерсивності та природності взаємодії. Проаналізовано технічні виклики, які виникають під час цих процесів. Виявлено принципи роботи OpenVR та методи її взаємодії з підсистемами рушія. Враховано аналіз обмежень використаних програмних розробок та інтерфейсів для взаємодії з рішенням на базі рушія Source та підходи до їх подолання із сучасними системами. Проаналізовано та удосконалено ергономіку інтерфейсів взаємодії з віртуальними об'єктами шляхом впровадження інтуїтивних механізмів маніпуляції та природних методів навігації у віртуальному просторі. Щодо ергономіки взаємодії, досліджено принципи проєктування зручних та інтуїтивно зрозумілих механізмів маніпуляції об'єктами. Проаналізовано принципи інтеграції різних модифікацій з ВР-системою. Розглянуто методи адаптації наявних невіртуальних модифікацій для коректного функціонування у віртуальній реальності. Проаналізовано різні моделі навігації, враховуючи методи телепортації, плавного руху та гібридної системи переміщення. У контексті програмної реалізації, розглянуто процес інтеграції набору середовища розроблення OpenVR із програмним рішенням Garry's Mod, на базі рушія Source. Описано структуру програмних модулів, їх оброблення та відображення відповідних змін у віртуальному середовищі. Проаналізовано технічні та методологічні обмеження запропонованого підходу, а також проблеми, що створюють певні обмеження для реалізації сучасних методів віртуальної реальності. Виявлено перспективні напрями подальших етапів дослідження. Проведено аналіз отриманих результатів та опитування з залученням групи добровольців для оцінювання ефективності розроблених методів взаємодії.

Ключові слова: віртуальне середовище; OpenVR; рушія Source; механіки переміщення; імерсивність; інтеграція.

Вступ / Introduction

Технології віртуальної реальності (ВР) демонструють стрімкий свій розвиток упродовж останнього десятиліття, перетворюючись із експериментальних розробок на масові програмні продукти, що знаходять застосування в різноманітних галузях людської діяльності. Особливу роль у становленні та розвитку систем віртуальної реальності відіграють інтерфейси взаємодії, які забезпечують комунікацію між користувачем та віртуальним середовищем.

Ефективність та інтуїтивність таких інтерфейсів безпосередньо впливає на рівень імерсивності, зручність використання та практичну цінність систем віртуальної реальності.

Проблематику розроблення інтерфейсів взаємодії у віртуальній реальності широко досліджують у світовій науковій літературі завдяки роботі Сазерленда, який, одним з перших, ще у 1968 р. представив перший шолом віртуальної реальності та заклав теоретичну основу для розвитку цього напрямку. А подальші дослідження

Брукса [3], Фурнеса [11] та інших науковців сформували методологічну базу для проєктування систем взаємодії у віртуальному просторі.

Незважаючи на значний обсяг досліджень у галузі інтерфейсів віртуальної реальності, існують істотні прогалини у вирішенні ряду практичних проблем. Зокрема, недостатньо дослідженими залишаються питання інтеграції сучасних технологій віртуальної реальності з наявними програмними платформами, особливо з рушіями, які не були початково спроектовані для роботи із системами ВР. Актуальність вирішення цієї проблеми підсилюється тим, що рушії, такі як Source, що використовуються, наприклад, у рішенні Garry's Mod, мають потужні можливості для побудови інтерактивних віртуальних середовищ, але потребують спеціальних підходів для ефективної їх інтеграції з системами віртуальної реальності.

Особливо нагальною є проблема розроблення ефективних інтерфейсів взаємодії для рушіїв, які мають специфічну архітектуру та унікальні механізми взаємодії з віртуальними об'єктами. Наявні дослідження переваж-

Інформація про авторів:

Кулик Юрій-Марко Романович, аспірант, кафедра автоматизованих систем управління. Email: yurii-marko.r.kulyk@lpnu.ua;

<https://orcid.org/0009-0006-1121-3302>

Батюк Анатолій Євгенович, канд. техн. наук, доцент, кафедра автоматизованих систем управління.

Email: anatolii.y.batiuk@lpnu.ua; <https://orcid.org/0000-0001-7650-7383>

Цитування за ДСТУ: Кулик Ю.-М. Р., Батюк А. Є. Аналіз, розроблення та практичне застосування інтерфейсів взаємодії у віртуальній реальності. Науковий вісник НЛТУ України. 2025, т. 35, № 6. С. 76–83.

Citation APA: Kulyk, Yu.-M. R., & Batiuk, A. Ye. (2025). Analysis, development and practical application of interaction interfaces in virtual reality. *Scientific Bulletin of UNFU*, 35(6), 76–83. <https://doi.org/10.36930/40350609>

но зосереджені на розробленні інтерфейсів для спеціалізованих систем віртуальної реальності або сучасних ігрових рушіїв, але майже не розглядають питання адаптації таких підходів для платформ, що не були орієнтовані та розроблені з урахуванням їх використання у системах ВР.

Такі рішення, як Garry's Mod, мають велику спільноту ентузіастів, які створюють різноманітні модифікації та доповнення, і забезпечують можливості застосування цих розробок у віртуальній реальності, що значно розширює їх функціональність та сферу застосування.

Відсутність комплексних наукових досліджень, у яких розглянуто розроблення ефективних інтерфейсів взаємодії для платформи Garry's Mod на базі рушія Source з використанням набору засобів розроблення OpenVR, створює необхідність проведення спеціалізованого дослідження, яке охопило б теоретичні та практичні особливості цієї проблеми. Особливої уваги потребують питання оптимізації характеристик інтерфейсів з урахуванням архітектури рушія та розроблення методів подолання технічних викликів, пов'язаних з інтеграцією сучасних систем відстеження руху з програмними компонентами, які не передбачали такої взаємодії на етапі проектування.

Актуальність цього дослідження зумовлена необхідністю вирішення комплексу теоретичних і практичних проблем, пов'язаних з розробленням і практичним застосуванням інтерфейсів взаємодії користувача у віртуальній реальності з використанням технології OpenVR, які не знайшли достатнього висвітлення у наявних наукових роботах.

Об'єкт дослідження – застосування інтерфейсів взаємодії у віртуальній реальності.

Предмет дослідження – методи та засоби визначення особливостей розроблення і практичного застосування інтерфейсів взаємодії у віртуальній реальності, що дасть змогу встановити закономірності впливу архітектурних особливостей рушіїв на ефективність реалізації механізмів маніпуляції віртуальними об'єктами.

Мета роботи – удосконалити процеси розроблення та практичного застосування інтерфейсів взаємодії з віртуальними об'єктами через впровадження інтуїтивних механізмів маніпуляції, адаптованих до специфіки роботи рушіїв з унікальною архітектурою, що забезпечить підвищення рівня імерсивності та природності взаємодії користувача з віртуальним середовищем.

Для досягнення зазначеної мети визначено такі основні завдання дослідження:

- дослідити особливості та сучасний стан розроблення інтерфейсів взаємодії у віртуальній реальності, проаналізувати наявні підходи та методи, що дасть змогу сформувати комплексне уявлення про архітектурні особливості систем ВР, виявити принципи проектування імерсивних інтерфейсів, подальшої інтеграції технології OpenVR з програмними рішеннями, які первісно не призначалися для функціонування у середовищі віртуальної реальності;
- використати методи та алгоритми відстеження положення та руху контролерів віртуальної реальності та їх інтерпретації у контексті специфічних механізмів рушія та програми, що забезпечить коректне перетворення просторових координат та орієнтації пристроїв введення у формат, сумісний із внутрішніми системами оброблення фізичних взаємодій, а також дасть змогу реалізувати точне відображення рухів користувача у віртуальному середовищі;

- дослідити та покращити інтерфейси, адаптовані для використання у віртуальній реальності, що передбачає розроблення інтуїтивних механізмів маніпуляції віртуальними об'єктами та побудову комплексної системи взаємодії користувача;
- провести експериментальні дослідження розробленого інтерфейсу взаємодії та оцінювання його ефективності, що містить організацію тестування з залученням групи добровольців для верифікації практичної придатності запропонованих рішень;
- визначити обмеження розробленого підходу та окреслити перспективні напрями подальших етапів дослідження, що дасть змогу краще оцінити реалізоване рішення, сформулювати рекомендації щодо розвитку інтерфейсів віртуальної реальності.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Наявні наукові роботи зосереджені переважно на розробленні інтерфейсів для спеціалізованих ВР-платформ або сучасних рушіїв із вбудованою підтримкою віртуальної реальності, залишаючи поза увагою проблематику адаптації та оптимізації взаємодії для рушіїв із специфічною архітектурою та обмеженою нативною підтримкою систем відстеження положення у тривимірному просторі.

Важливим аспектом розвитку технологій віртуальної реальності є проектування ефективних інтерфейсів взаємодії між користувачем та віртуальним середовищем. Як зазначають автори [2] у дослідженні, традиційні методи взаємодії, розроблені для двовимірних інтерфейсів, виявляються недостатньо ефективними у тривимірному просторі віртуальної реальності. Тому автори досліджують, як технічний і технологічний розвиток впливає на взаємодію людини з комп'ютерами, приводячи до більш природної (когнітивної) взаємодії – від кнопок до дотику, від мишки до жестів, від екранів до ВР-середовищ. Вони припускають, що з часом технічні навички перестануть бути перепоною, бо інтерфейси стануть "людиноподібними".

У роботі [6] детально описують, як ігрові технології, зокрема рушій Unreal Engine (один з найбільш популярних сучасних рушіїв), можуть бути адаптовані для розроблення доступної та ефективної системи віртуальної реальності. Центральна ідея полягає в тому, що ігрові рушії, звичайно призначені для розваг, мають технічний потенціал, достатній для застосування у серйозних наукових і освітніх візуалізаціях. CaveUT є прикладом того, як відкритий код і велика ігрова спільнота можуть сприяти розвитку ВР-рішень поза межами розважальної індустрії.

Особливе значення для цієї роботи має аналіз можливостей систем віртуальної реальності та програмного інтерфейсу OpenVR. У дослідженні [5] розглядають застосування технологій віртуальної реальності у медичній сфері, зокрема у візуалізації медичних даних за допомогою шолома HTC Vive та платформи MeVisLab. Автори аргументують, що попри те, що ВР традиційно асоціюється з розважальною індустрією, її потенціал значно ширший, особливо у галузях, де важливими є точність, візуалізація та передбачення результатів, наприклад у плануванні хірургічних втручань, тренуванні медичного персоналу, або у симуляціях.

Також, було знайдено, перекладено (англійською) та проаналізовано досить цікаву роботу [4] японських дослідників. У ній розглядають бібліотеку OpenVR як інструмент для розроблення кросплатформених ВР-додатків, її технічні особливості, переваги й практичні

особливості використання. У прикладі практичного використання описано побудову рішення для моделювання 3D-об'єктів, який дає змогу користувачам віртуально розділяти й обробляти воксельні (аналог двовимірних пікселів у тривимірному просторі) моделі, використовуючи контролери.

У дослідженні [13] автор стверджує, що Garry's Mod є унікальним прикладом ігрового середовища відкритого типу, яке дає змогу досліджувати цілий спектр соціокультурних та технічних феноменів. Можливості та особливості цієї фізичної пісочниці роблять її об'єктом інтересу у сферах цифрової гуманітаристики, педагогіки, ігрового дизайну, а також інтеграції сторонніх інноваційних рішень.

Серед прикладів наявних інтеграцій та взаємодії із програмними та фізичними інтерфейсами потрібно розглянути й роботу [19]. Стаття фокусується на вирішенні поточних обмежень систем віртуальної реальності, зокрема формування захоплювальних і реалістичних вражень, що поєднують віртуальні середовища з реальними фізичними пристроями. Вона визнає, що наявні системи VR переважно стимулюють тільки зорові та слухові відчуття, а зворотній зв'язок на дотик обмежений. У роботі пропонують ефективний підхід для подолання таких обмежень шляхом інтеграції фізичних пристроїв у віртуальні середовища, для покращення рівня взаємодії та занурення.

За результатами проведеного аналізу наукової літератури з'ясовано, що попри значний обсяг досліджень із взаємодії у віртуальній реальності, недостатньо вивченими залишаються питання розроблення та практичного застосування рішень та підсистем VR. Отже, існує потреба у проведенні дослідження, спрямованого на розроблення науково обґрунтованих підходів до проектування інтуїтивних інтерфейсів взаємодії у віртуальній реальності, які забезпечували б високий рівень імерсивності та природності взаємодії користувача з віртуальним середовищем, що й визначає актуальність цього дослідження для заповнення виявленої теоретичної та практичної прогалини.

Матеріали та методи дослідження. Теоретичною основою дослідження є фундаментальні роботи в галузі взаємодії людини з комп'ютером, теорії віртуальної реальності, засобів та інтерфейсів сприйняття віртуального простору. Дослідження проводилось з використанням гарнітури віртуальної реальності Oculus Quest 2 та програмного забезпечення Garry's Mod 13 на базі рушія Source з інтеграцією через інтерфейс OpenVR 2.5.1, що забезпечує абстракцію для роботи із пристроями VR.

Результати дослідження та їх обговорення / Research results and their discussion

Аналіз інтерфейсів взаємодії. Сучасні підходи до побудови VR-інтерфейсів орієнтовані на забезпечення максимально природної та інтуїтивної взаємодії користувача з цифровим середовищем. Серед них особливу увагу привертають просторові методи управління, які дають змогу розширити межі традиційної взаємодії.

Одним із найпоширеніших сучасних підходів є використання просторових інтерфейсів на підставі розпізнавання рухів та жестів [4]. Просторові інтерфейси на підставі жестів користувача стали одним із ключових напрямів у розвитку взаємодії у віртуальному середови-

щі, оскільки забезпечують високий ступінь інтуїтивності та природності взаємодії користувача з віртуальним простором.

Водночас ефективність таких інтерфейсів безпосередньо залежить від точності системи відстеження рухів, що потребує високої якості апаратного забезпечення та ретельного калібрування. Навіть незначні похибки можуть призвести до помилкових спрацьовувань, що, водночас, знижує загальну якість користувацького досвіду та порушує ефект занурення.

Сучасні VR-контролери є складними багатофункціональними пристроями, здатними точно відстежувати положення рук у просторі, розпізнавати натискання кнопок, жести та інші форми взаємодії [14]. Найпоширеніші рішення оснащені наборами тригерів, сенсорними панелями та кнопками, що дають змогу виконувати широкий спектр дій у віртуальному середовищі, від переміщення та вибору об'єктів до детального керування інструментами чи персонажами. Окрім базових функцій, новітні моделі інтегрують технології тактильного зворотного зв'язку, які надають користувачеві відчуття фізичного контакту з віртуальними об'єктами. Зокрема, контролери Valve Index [15] мають можливість індивідуального відстеження кожного пальця, що значно розширює можливості взаємодії й робить її більш реалістичною.

Source [16] – рушій, який розробила компанія Valve Corporation і застосовують у цьому дослідженні через рішення Garry's Mod, має ряд архітектурних особливостей, які роблять його потенційно придатним для розроблення VR-інтерфейсів, незважаючи на те, що початково він не був призначений для рішень віртуальної реальності. Модульна архітектура Source, з чітким розподілом на підсистеми рендерингу, фізики, звуку та мережевої взаємодії забезпечує необхідну гнучкість для інтеграції специфічних для VR компонентів, таких як стереоскопічний рендеринг, відстеження положення голови та рук користувача, та спеціалізовані методи взаємодії, характерні для віртуальної реальності.

Вбудована система фізичного моделювання, заснована на модифікованій версії фізичного рушія Havok [17], дає змогу реалістично симулювати взаємодію користувача з віртуальними об'єктами з урахуванням їхньої маси, інерції, тертя та інших фізичних властивостей. Незважаючи на відносну технологічну застарілість деяких компонентів, його відкрита, для модифікацій, архітектура дала можливість імплементувати сучасні технології рендерингу.

Розроблення інтерфейсів взаємодії. Інтеграція віртуального середовища з різноманітними VR-пристроями потрібна для забезпечення широкої доступності та універсальності розроблених інтерфейсів, що досягається шляхом використання стандартизованих прикладних програмних інтерфейсів та засобів розроблення. Серед них, OpenVR [8], що займає особливе місце завдяки своїй кросплатформенності та підтримці широкого спектра обладнання різних виробників. Його, також, розробила компанія Valve Corporation, як відкритий стандарт для інтеграції з різноманітними VR-системами.

У процесі інтеграції OpenVR з модифікованим Garry's Mod було розроблено додатковий проміжний шар абстракції, що забезпечує безшовну взаємодію між системами рендерингу Source та стереоскопічними можливостями гарнітури VR.

Архітектура інтеграції OpenVR з рушієм Source через модифіковане середовище Garry's Mod вимагає комплексного стратегічного підходу, що враховує як технічні особливості обох систем, так і специфічні вимоги розроблених VR-інтерфейсів у контексті середовища. Основою концептуальної архітектури є багаторівнева модель взаємодії, що забезпечує чіткий розподіл відповідальності між компонентами системи та мінімізує взаємні залежності, підвищуючи стабільність і розширюваність рішення зі збереженням високої продуктивності, критичної для додатків.

Найнижчий рівень архітектури наведений модулем прямої взаємодії з OpenVR, що відповідає за ініціалізацію VR-системи, налаштування параметрів рендерингу відповідно до характеристик конкретного обладнання та забезпечення безперервного потоку даних про стан пристроїв відстеження, мінімізації затримок та оптимізації використання системних ресурсів для забезпечення плавного досвіду взаємодії.

Середній рівень наведений системою оброблення та інтерпретації даних, що перетворює низькорівневу інформацію про положення та орієнтацію пристроїв у абстрактні події та стани, які можуть бути інтерпретовані ігровою логікою, враховуючи розпізнавання жестів, визначення контексту взаємодії та генерацію високорівневих подій для подальшого оброблення.

Верхній рівень архітектури наведений системою інтеграції з ігровою логікою Garry's Mod через Lua, що забезпечує доступ до функціональних можливостей та експериментальних інтерфейсів через зрозумілі високорівневі абстракції, надаючи широкі можливості з різними парадигмами взаємодії.

Ефективна інтеграція даних віртуальної реальності з логікою рішення Garry's Mod вимагає розроблення спеціалізованого механізму передачі та інтерпретації інформації, що забезпечує зв'язок між низькорівневими процесами відстеження та високорівневою логікою взаємодії з користувачем, реалізованою переважно через скриптове середовище Lua. Центральним елементом розробленого механізму стало DLL (Dynamic Link Library, динамічні бібліотеки в операційній системі Windows) розширення від OpenVR [9], що взаємодіє безпосередньо із системою VR та експортує її функціональність у вигляді структурованого API, доступного для скриптів Lua, забезпечуючи виклик функцій, що охоплюють позиції та орієнтації пристроїв, стан елементів керування та інші релевантні параметри.

Ключовим компонентом системи VR-інтерфейсів у модифікованому середовищі Garry's Mod є комплексний модуль оброблення жестів та подій, що перетворює абстрактні дані про рухи користувача у відображені та оброблені дії у віртуальному просторі. Фундаментом такого модуля слугує система низькорівневого розпізнавання базових жестів, яка аналізує траєкторії руху контролерів, їх швидкість, прискорення та орієнтацію для ідентифікації характерних патернів, що відповідають таким універсальним діям, як захоплення об'єктів, натискання на кнопки, проведення по поверхні, обертання, масштабування та інші базові маніпуляції, які становлять основу більшості складних взаємодій у віртуальному середовищі.

На середньому рівні абстракції функціонує підсистема контекстної інтерпретації, яка аналізує розпізнані

базові жести у контексті поточного стану віртуального середовища, враховуючи характеристики об'єктів у зоні досяжності, їх функціональні можливості, поточні завдання користувача та історію попередніх взаємодій, що дає змогу точно визначити наміри користувача навіть у складних сценаріях.

Високорівнева частина модуля реалізує механізми послідовного зв'язування окремих дій у комплексні взаємодії, наприклад, комбінування жесту захоплення, переміщення та відпускання у єдину операцію переносу об'єкта, або об'єднання жестів натискання кількох кнопок у логічну послідовність для активації складного механізму, що значно розширює виразні можливості інтерфейсу та дає змогу реалізовувати взаємодії будь-якої складності зі збереженням інтуїтивності базових маніпуляцій.

Комплексне тестування розробленого механізму передачі даних у різноманітних сценаріях використання та на різних апаратних конфігураціях підтвердило його високу надійність, продуктивність та зручність використання для розробників, що створює міцну технологічну базу для подальших експериментів з VR-інтерфейсами та розроблення інноваційних методів взаємодії користувача з віртуальним середовищем у контексті дослідницької платформи.

Постійне відстеження рухів користувача у сучасних системах віртуальної реальності реалізується через складний комплекс технологічних рішень, які забезпечують розпізнавання положення та орієнтації як шолома, так і контролерів у тривимірному просторі з шістьма ступенями свободи. Точність відстеження рухів користувача є критичним параметром, який безпосередньо впливає на якість його взаємодії з віртуальним середовищем, оскільки навіть мінімальні розбіжності між реальними рухами та їх відображенням у віртуальному просторі можуть призвести до дезорієнтації користувача, порушення відчуття його присутності.

У процесі інтеграції системи відстеження особливу увагу потрібно приділяти калібруванню та синхронізації координатних систем реального та віртуального просторів, оскільки розбіжності між ними можуть призвести до неприродних відчуттів під час взаємодії та порушення просторового сприйняття. Вирішення цієї проблеми потребувало розроблення спеціалізованого алгоритму трансформації координат, що враховує особливості масштабування та орієнтації віртуального світу в рушії Source відносно реального простору відстеження. Досягнення ідеальної синхронізації між фізичними рухами користувача та відповідними діями у віртуальному середовищі є непростим викликом в імерсивних VR-інтерфейсах, оскільки навіть незначні розбіжності між реальним та віртуальним рухом можуть призвести до порушення відчуття присутності та виникнення когнітивного дисонансу у користувача.

Ключовим компонентом реалізації віртуальної реальності є інтеграція OpenVR із середовищем, що потребувало розроблення спеціалізованих програмних модулів. Для цього було розроблено та реалізовано код для ініціалізації OpenVR у середовищі Garry's Mod та налаштування базових параметрів взаємодії [7]. Він демонструє базову архітектуру системи VR-взаємодії, що містить ініціалізацію OpenVR, налаштування відстеження контролерів та визначення параметрів взаємодії.

Було розроблено та впроваджено кілька підходів до маніпуляції віртуальними об'єктами у модифікованому середовищі Garry's Mod з використанням OpenVR. Основний фокус було зроблено на проєктування природних механізмів захоплення, переміщення та взаємодії з об'єктами різного розміру, форми та фізичних властивостей. Було реалізовано систему віртуальних "фантомних рук", які відображають позицію та орієнтацію контролерів користувача у віртуальному просторі (рис. 1). Такі віртуальні руки мають спеціалізовані колайдери (компоненти фізичної системи, які визначають геометричну область зіткнення об'єкта), що дає змогу визначати наміри користувача щодо взаємодії з об'єктами [7].



Рис. 1. Приклад взаємодії з віртуальним об'єктом у рішенні Garry's Mod / An example of interaction with a virtual object in the Garry's Mod solution

Одним з ключових викликів було забезпечення точності захоплення дрібних об'єктів та природної маніпуляції об'єктами різної ваги. Для вирішення цієї проблеми було впроваджено алгоритм адаптивного захоплення, який коригує точку контакту між віртуальною рукою та об'єктом на підставі близькості та орієнтації. Такий підхід істотно підвищує точність маніпуляцій та відчуття присутності у користувачів. Для покращення точності захоплення дрібних об'єктів та забезпечення природної взаємодії було розроблено додатковий алгоритм компенсації тремтіння рук [7].

Навігація у віртуальному просторі є ще одним складним аспектом взаємодії у ВР через обмеження фізичного простору користувача. У межах дослідження було розроблено та порівняно декілька методів навігації, адаптованих для використання у модифікованому середовищі Garry's Mod з технологією OpenVR. Основними критеріями оцінювання їхньої ефективності були: інтуїтивність використання, точність переміщення та суб'єктивне відчуття присутності.

Першою розробленою підсистемою руху у віртуальному середовищі стала "телепортація", яка дає змогу користувачу миттєво переміщуватися у вказану точку простору. Для вибору точки телепортації використовується проєкція променя з контролера, а для активації – натискання кнопки на контролері.

Другою підсистемою стало "плавне переміщення", яке імітує рух, у віртуальному середовищі, з використанням джойстика на контролері. Вона забезпечує вищу гнучкість навігації, але потенційно може зумовлювати відчуття тошноти та головокружіння користувача через невідповідність між візуальним рухом і його фізичним положенням.

Третьою та найкращою реалізованою підсистемою є "гібридне переміщення" [7], з фізичним переміщенням

у віртуальному просторі, що дає змогу користувачу фізично пересуватися в межах доступного простору, який відображається у віртуальному середовищі, та використовувати плавний рух за допомогою джойстиків для точнішого позиціонування (приклад на рис. 2). Такий метод забезпечує найвищий рівень занурення користувача у віртуальну реальність і практично не обмежується розмірами фізичного простору. Для розширення можливостей програмного рішення було використано алгоритм "динамічного перекалібрування", який автоматично змінює масштаб переміщення у віртуальному просторі залежно від розміру доступного фізичного простору та характеру віртуального середовища [7].



Рис. 2. Приклад переміщення у віртуальній реальності за допомогою рухів у фізичному середовищі / An example of moving in virtual reality using movements in the physical environment

Особливість розробленої системи полягає у глибокій інтеграції методів взаємодії з потужним фізичним рушієм Source, на якому базується Garry's Mod. Це дало змогу спроектувати високореалістичну систему взаємодії, де віртуальні об'єкти поведуться відповідно до законів фізики та реагують на дії користувача природно. Процес інтеграції вимагав написання спеціалізованих API, які транслюють дані з контролерів OpenVR у формат, зрозумілий для рушія Source та рішення модифікованого середовища Garry's Mod.

Для реалістичного відтворення фізичних взаємодій було модифіковано підсистему колізій для коректного оброблення взаємодій між віртуальними руками користувача та об'єктами різної форми і розміру [7]. Зокрема, було впроваджено систему "м'яких колізій", яка дає змогу уникнути абсолютно жорстких зіткнень із перепонами і забезпечує більш природну поведінку об'єктів під час взаємодії. Для захоплення та маніпуляції об'єктами було розроблено систему віртуальних з'єднань, які динамічно створюються між віртуальною рукою та об'єктом під час активації захоплення. Ці з'єднання враховують фізичні властивості об'єкта (масу, інерцію, тертя) та забезпечують реалістичну поведінку в разі маніпуляцій [7].

Тестування інтерфейсів взаємодії. Для оцінювання ефективності розроблених методів взаємодії було проведено експериментальне тестування з залученням групи користувачів різного рівня досвіду роботи з ВР-системами. Тестування містило виконання типових завдань з маніпуляції об'єктами, використання інструментів та навігації у віртуальному просторі.

Результати проведеного експерименту показали (кадр з результату тестування на рис. 2), що розроблені методи взаємодії забезпечують високу ефективність виконання завдань навіть для користувачів без попереднього досвіду роботи з рішеннями віртуальної реальності. Зокрема, середня тривалість адаптації до сис-

теми становила менше ніж 10 хв, а після короткого періоду тренування користувачі могли виконувати складні маніпуляції з об'єктами з точністю, близькою до точності маніпуляцій у реальному світі.

Система адаптивного захоплення продемонструвала високу ефективність для об'єктів різного розміру, забезпечуючи точність захоплення дрібних об'єктів.

Щодо навігації у віртуальному просторі, система гібридного переміщення демонструє найкращі результати за показниками комфорту використання. Зокрема, частота виникнення симптомів головкружіння, у недосвідчених користувачів, є значно нижчою порівняно з використанням виключно телепортації, при цьому забезпечуючи вищу гнучкість навігації.

Тестування розроблених інтерфейсів взаємодії в різних сценаріях застосування показали їх високу ефективність та зручність використання. Зокрема, суб'єктивне оцінювання зручності використання системи за шкалою від 1 до 10 становила в середньому 8 балів для групи користувачів (невеликої вибірки з 10 людей близького оточення) без попереднього досвіду роботи з VR-системами і 9 балів для досвідчених користувачів (невеликої вибірки з 4 людей близького оточення). Такі високі показники пояснюються інтуїтивно зрозумілим інтерфейсом, який не вимагає тривалого навчання, та природністю взаємодії з об'єктами, що імітує реальні фізичні маніпуляції.

Водночас проведене дослідження виявило певні обмеження розробленого підходу, які можуть бути предметом подальших етапів дослідження.

Одним з основних обмежень є висока обчислювальна складність реалістичної фізичної симуляції взаємодії з великою кількістю об'єктів. При одночасній взаємодії з більш ніж 20-30 фізичними об'єктами спостерігається помітне зниження продуктивності системи, що може негативно впливати на комфорт використання. Ця проблема частково вирішується за допомогою системи динамічного рівня деталізації фізичної симуляції, але повне її вирішення потребує подальших етапів дослідження у напрямку оптимізації алгоритмів фізичної симуляції для VR-додатків.

Іншим обмеженням є відсутність повноцінного тактильного зворотного зв'язку, який давав би змогу відчувати форму, текстуру та жорсткість віртуальних об'єктів. Для повноцінного тактильного досвіду потрібне використання спеціалізованих пристроїв, таких як рукавички з тактильним зворотним зв'язком, які не були частиною цього дослідження. Інтеграція таких пристроїв з розробленою системою інтерфейсів взаємодії становить перспективний напрям для подальших етапів дослідження.

Також варто відзначити, що розроблена система навігації, хоча і значно зменшує прояви головкружіння та тошноти, проте не може повністю вирішити цю проблему для всіх користувачів. Індивідуальна чутливість таких симптомів залишається важливим фактором, який обмежує тривалість комфортного використання VR-систем для деяких людей. Дослідження методів персоналізованої адаптації навігаційних інтерфейсів на підставі індивідуальних особливостей користувача є перспективним напрямом для подальшої роботи.

Частковим напрямом є й інтеграція розробленого інтерфейсу взаємодії із системами штучного інтелекту

для розроблення інтелектуальних віртуальних асистентів, які могли б адаптувати свою поведінку під конкретного користувача та допомагати йому у виконанні складних завдань у віртуальному середовищі.

Розроблений інтерфейс відзначається високою інтуїтивністю, природністю та ергономічністю, що робить його придатним для широкого спектра застосувань, від освітніх та тренувальних симуляторів до творчих інструментів та інтерактивних розважальних додатків.

Модульна архітектура та відкритий характер платформи Garry's Mod дають змогу легко адаптувати розроблені методи для різних сценаріїв використання та інтегрувати їх з наявними проєктами. Це відкриває широкі можливості для практичного застосування результатів дослідження та їх подальшого розвитку спільно з розробниками VR-додатків.

Розроблено методи адаптації наявних невіртуальних модифікацій для коректного функціонування у віртуальній реальності, що дає змогу розширити функціональність та сферу застосування наявного користувачького контенту без потреби його повного перероблення. Додатково, було запропоновано гібридну систему навігації у віртуальному просторі, що поєднує методи телепортації та плавного руху, оптимізовану для платформ з обмеженими можливостями оптимізації рендерингу зі збереженням стабільної частоти кадрів.

Експериментально підтверджено ефективність розроблених інтерфейсів взаємодії шляхом проведення опитування зі залученням групи добровольців, що дало змогу виявити технічні та методологічні обмеження запропонованого підходу та визначити перспективні напрями подальших етапів дослідження у галузі інтеграції VR-технологій із традиційними ігровими платформами.

Обговорення результатів дослідження. Результати, отримані в дослідженні, показують можливість ефективної інтеграції сучасних технологій віртуальної реальності з рушіями, що першочергово первісно не призначалися для функціонування у середовищі віртуальної реальності, за умови застосування комплексного підходу до розроблення інтерфейсів взаємодії, що враховує як технічні обмеження програмної платформи, так і вимоги до забезпечення природності та інтуїтивності маніпуляції віртуальними об'єктами.

У дослідженні [4] автори проаналізували сучасні підходи до проєктування інтерфейсів взаємодії у віртуальній реальності з фокусом на сенсорні технології та методи забезпечення природності взаємодії, проте їхня робота зосереджена переважно на спеціалізованих VR-платформах із вбудованою підтримкою систем відстеження, тоді як питання адаптації наявних ігрових рушіїв попередніх поколінь до вимог віртуальної реальності залишилися поза межами їхнього дослідження.

У роботі [14] науковці дослідили різноманітні типи контролерів для користувачьких інтерфейсів віртуальної реальності та провели систематизацію апаратних рішень, однак їхній аналіз не охоплював специфічних проблем інтеграції технології OpenVR із програмними середовищами, які не мали нативної підтримки систем віртуальної реальності на етапі розроблення.

У роботі [18] дослідники вказали на можливості програмного інструментарію OpenVR для побудови віртуальних роботів та їхнього робочого середовища з

CAD-файлів, демонструючи універсальність застосування OpenVR у дослідженнях робототехніки для візуалізації концепцій та розроблення алгоритмів, що частково корелює з отриманими у цьому дослідженні результатами щодо гнучкості інтерфейсу для інтеграції з різноманітними програмними платформами.

У дослідженні [1] автори проаналізували підходи до інтеграції симуляційного програмного забезпечення CoppeliaSim із системами віртуальної реальності через розроблення спеціалізованого набору інструментів для швидкого прототипування та верифікації робототехнічних систем, що демонструє загальну тенденцію до розширення функціональності наявних програмних платформ засобами віртуальної реальності.

У роботі [10] дослідники розробили інструмент CLOVR для захоплення та реєстрації даних про пози пристроїв, дії користувача та інші параметри взаємодії з будь-яких додатків на базі OpenVR API, що вказує на універсальність та розширюваність інтерфейсу OpenVR, їхнє дослідження зосереджене на методах збирання даних з наявних застосунків, що узгоджується з нашими висновками щодо універсальності та ефективності.

Унаслідок обговорення результатів дослідження виявлено, що попри значний обсяг наукових робіт з розроблення інтерфейсів взаємодії у віртуальній реальності, наявна література не охоплює комплексного підходу до інтеграції сучасних технологій OpenVR з багатьма рушіями, зокрема з Source, які мають унікальну архітектуру та специфічні обмеження щодо реалізації механізмів віртуальної реальності. Аналізовані дослідження переважно зосереджені або на теоретичних аспектах проектування VR-інтерфейсів для спеціалізованих платформ, або на розробленні рішень для рушіїв з нативною підтримкою систем віртуальної реальності, залишаючи невирішеними питання збереження функціональності та забезпечення ефективної взаємодії в умовах технічних обмежень програмних архітектур.

Проведене дослідження заповнює цю прогалину через розроблення комплексного методологічного підходу до адаптації інтерфейсів взаємодії для програмного середовища Garry's Mod з урахуванням специфічних особливостей рушія Source, що підтверджує доцільність проведення саме такого дослідження для розширення можливостей застосування технологій віртуальної реальності у контексті наявних програмних платформ з великою спільнотою розробників та користувачів.

Отже, внаслідок виконаної роботи можна сформулювати такі наукову новизну та практичну значущість результатів дослідження.

Наукова новизна отриманих результатів дослідження – удосконалено методіку розроблення та практичного застосування інтерфейсів взаємодії з віртуальними об'єктами, яка, на відміну від наявних методик, дає змогу впровадити інтуїтивні механізми маніпуляції, адаптовані до специфіки роботи рушіїв з унікальною архітектурою, що забезпечує підвищення рівня імерсивності та природності взаємодії користувача з віртуальним середовищем.

Практична значущість результатів дослідження – розроблені методи інтеграції технології OpenVR з ігровим рушієм Source застосовано для розроблення функціонального інтерфейсу взаємодії у програмному середовищі Garry's Mod, який можна використати для роз-

ширення можливостей наявних модифікацій та доповнень у сфері віртуальної реальності, а запропоновані алгоритми відстеження положення контролерів та маніпуляції віртуальними об'єктами можна впровадити для адаптації інших програмних платформ, що відкриває широкі перспективи для розробників контенту та появи нових дослідників у галузі імерсивних технологій щодо використання потужного інструментарію та широкої екосистеми користувацьких розробок для побудови освітніх, тренувальних та розважальних застосунків віртуальної реальності.

Висновки / Conclusions

Удосконалено процеси аналізу, розроблення та практичного застосування інтерфейсів взаємодії з віртуальними об'єктами через впровадження інтуїтивних механізмів та інтерфейсів взаємодії, навігації і маніпуляції, адаптованих до специфіки роботи рушія з унікальною архітектурою, що забезпечило підвищення рівня імерсивності користувача з віртуальним середовищем. За результатами проведеного дослідження можна зробити такі основні висновки.

1. Систематизовано особливості та проаналізовано сучасний стан розроблення інтерфейсів взаємодії у віртуальній реальності, що дало змогу сформулювати комплексне уявлення про архітектурні особливості систем віртуальної реальності, виявити ключові принципи проектування імерсивних інтерфейсів та встановити методологічну базу для інтеграції технології OpenVR із програмними рішеннями, які первісно не призначалися для функціонування у середовищі віртуальної реальності, зокрема з рушієм Source.
2. Застосовано методи та алгоритми відстеження положення та руху контролерів віртуальної реальності з їх інтерпретацією у контексті специфічних механік рушія Source та програмного середовища Garry's Mod, що забезпечило коректне перетворення просторових координат та орієнтації пристроїв введення у формат, сумісний із внутрішніми системами оброблення фізичних взаємодій рушія, а також реалізовано точне відображення рухів користувача у віртуальному середовищі з мінімальною латентністю та високою точністю позиціонування об'єктів.
3. Розроблено та удосконалено інтерфейси взаємодії, адаптовані для використання у віртуальній реальності, що містить впровадження інтуїтивних механізмів маніпуляції віртуальними об'єктами через природні методи навігації, оптимізацію ергономічних характеристик інтерфейсу з урахуванням фізіологічних особливостей сприйняття користувачем тривимірного простору та розроблення комплексної системи взаємодії, яка органічно поєднує можливості наявних модифікацій Garry's Mod з новими функціональними можливостями віртуальної реальності.
4. Проведено експериментальне дослідження розробленого інтерфейсу взаємодії з залученням добровольців для верифікації практичної придатності запропонованих рішень, зручності використання, що підтвердило ефективність розроблених методів взаємодії та їх переваги порівняно з традиційними підходами до управління у невіртуальному середовищі.
5. Визначено технічні та методологічні обмеження розробленого підходу, пов'язані з апаратними можливостями рушія Source та архітектурними особливостями програмної платформи Garry's Mod, а також окреслено перспективні напрями подальших етапів дослідження, що охоплюють розроблення альтернативних архітектурних рішень для подолання виявлених обмежень.

References

1. Bogaerts, B., Sels, S., Vanlanduit, S., & Penne, R. (2020). Connecting the CoppeliaSim robotics simulator to virtual reality. *SoftwareX*, 11, article ID 100426. <https://doi.org/10.1016/j.softx.2020.100426>
2. Borba, E., & Zuffo, M. K. (2016). Natural to the human interactions with digital interfaces: a new perspective to understand the virtual experiences. In *Proceedings of the IAMCR Conference* (pp. 312–317). URL: https://www.researchgate.net/publication/307513030_Natural_to_the_human_interactions_with_digital_interfaces_a_new_perspective_to_understand_the_virtual_experiences
3. Brooks, F. P. (1999). Whats real about virtual reality?. *IEEE Computer graphics and applications*, 19(6), 16–27. <https://doi.org/10.1109/38.799723>
4. Chen, M. X., Hu, H., Yao, R., Qiu, L., & Li, D. (2024). A Survey on the Design of Virtual Reality Interaction Interfaces. *Sensors*, 24(19), article ID 6204. <https://doi.org/10.3390/s24196204>
5. Egger, J., Gall, M., Wallner, J., Boechat, P., Hann, A., Li, X., & Schmalstieg, D. (2017). HTC Vive MeVisLab integration via OpenVR for medical applications. *PloS one*, 12(3), article ID e0173972. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0173972>
6. Jacobson, J., & Lewis, M. (2005). Game engine virtual reality with CaveUT. *Computer*, 38(4), 79–82. <https://doi.org/10.1109/MC.2005.126>
7. Kulyk, Y. (2025). CODE: OpenVR initialization, Mechanisms and algorithms, interaction with the physical system of Garrys Mod. Google Docs. URL: https://docs.google.com/document/d/1h8JRiv2x49vAcoVpZHyL7V324PU6qeLamBjhr_2TzGg/edit?usp=sharing
8. Ludwig, J., Selan, J., Leiby, A., Finch, C., Bradner, K., & Nuber, N. (2023). API documentation. GitHub. URL: <https://github.com/ValveSoftware/openvr/wiki/API-Documentation>
9. Ludwig, J., Selan, J., Leiby, A., Finch, C., Bradner, K., & Nuber, N. (2024). OpenVR SDK 2.5.1. GitHub. URL: https://github.com/ValveSoftware/openvr/blob/master/bin/win32/openvr_api.dll
10. Martinez, E. S., Malik, A. A., & McMahan, R. P. (2024). Clovr: Collecting and logging openvr data from steamvr applications. In *IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces Abstracts and Workshops (VRW)* (pp. 485–492). IEEE. <https://doi.org/10.1016/j.softx.2020.100426>
11. Mertz, L. (2019). Virtual reality pioneer Tom Furness on the past, present, and future of VR in health care. *IEEE pulse*, 10(3), 9–11. <https://doi.org/10.1109/MPULS.2019.2911808>
12. Nagamatsu, G., Kurita, T., Ichimaru, K., & Kobayashi, D. (2019). OpenVR. *Journal of the Virtual Reality Society of Japan*, 24(1), 46–47. https://doi.org/10.18974/jvrsj.24.1_46
13. Nelson, P. (2023). Garrys Mod: The Computer Game Becomes Photoshop. In *Computer Games As Landscape Art*, (pp. 139–171). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-37634-4_7
14. Novacek, T., & Jirina, M. (2020). Overview of controllers of user interface for virtual reality. *PRESENCE: Virtual and Augmented Reality*, 29, 37–90. https://doi.org/10.1162/pres_a.00356
15. Valve Software. (2024). Controllers. Valve Software. URL: <https://www.valvesoftware.com/en/index/controllers>
16. Valve Software. (2024). Engine Structure. Valve Developer Community. URL: https://developer.valvesoftware.com/wiki/Engine_Structure
17. Valve Software. (2024). Havok. Valve Developer Community. URL: <https://developer.valvesoftware.com/wiki/Havok>
18. Wang, W., Suga, Y., Iwata, H., & Sugano, S. (2011). OpenVR: A software tool contributes to research of robotics. In *IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII)* (pp. 1043–1048). IEEE. <https://doi.org/10.1109/SII.2011.6147593>
19. Zhang, Z., Zhang, M., Tumkor, S., Chang, Y., Esche, S. K., & Chassapis, C. (2013). Integration of Physical Devices into Game-based Virtual Reality. *International Journal of Online Engineering*, 9(5), 25–38. <https://doi.org/10.3991/ijoe.v9i5.2705>

Yu.-M. R. Kulyk, A. Ye. Batyuk

National University "Lviv Polytechnic", Lviv, Ukraine

ANALYSIS, DEVELOPMENT AND PRACTICAL APPLICATION OF INTERACTION INTERFACES IN VIRTUAL REALITY

Investigated the issues of interaction, development and practical application of interaction interfaces in virtual reality (VR) using a third-party solution, such as the Garrys Mod software based on the Source engine and the OpenVR development kit. Described the theoretical foundations and practical aspects of creating software interfaces for user interaction with the virtual environment, ensuring a high level of immersion and natural interaction dynamics. Analyzed technical challenges encountered in this process. Revealed the principles of OpenVR operation and methods of its interaction with the engine subsystems. Included an in-depth analysis of the technical limitations of the limitations of the used software developments and interfaces for interacting with the Source engine-based solution and approaches to overcoming them with modern systems. Improved the ergonomics of interaction with virtual objects, by implementing intuitive manipulation mechanisms and natural navigation methods in virtual space. Analyzed principles of integration of various modifications with the VR system. Considered methods for adapting existing non-VR modifications to function correctly in virtual reality. Analyzed different navigation models, including teleportation, smooth motion and hybrid navigation systems. From a software implementation perspective, provided a detailed review of the process of integrating the OpenVR development environment kit with the Garrys Mod programmable solution based on the Source engine. Described the structure of program modules, their processing and display of relevant changes in the virtual environment. In the section dedicated to the discussion of the research results, analyzed technical and methodological constraints of the proposed approach. Discussed various challenges, which impose certain restrictions on the implementation of modern VR methods. Identified prospective directions for further studies. Conducted an analysis of the obtained results and a survey involving a group of volunteers to assess the effectiveness of the developed methods of interaction.

Keywords: virtual environment; OpenVR; Source engine; movement mechanics; immersivity; integration.