

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

ОСТРОВКА ДМИТРО ВАСИЛЬОВИЧ

Кваліфікаційна наукова

Праця на правах рукопису

УДК 004.[4+946]

**Інформаційна технологія синтезу тривимірного
зображення користувача для мобільних систем доповненої
реальності**

122 — комп'ютерні науки

**Дисертація на здобуття наукового ступеня
доктора філософії**

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело



/Д. В. Островка/

Науковий керівник

Теслюк Василь Миколайович

доктор технічних наук, професор

АНОТАЦІЯ

Островка Д. В. Інформаційна технологія синтезу тривимірного зображення користувача для мобільних систем доповненої реальності. — Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису. Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 122 «Комп'ютерні науки». — Національний університет «Львівська політехніка», Львів, 2023.

Зміст анотації.

Дисертаційне дослідження присвячене побудові методів та засобів для підвищення ефективності процесу синтезу тривимірного зображення користувача в мобільних системах доповненої реальності на основі вбудованих у мобільну систему засобів відображення тривимірних об'єктів. У перспективі це може значно покращити мобільні додатки з використанням технології доповненої чи віртуальної реальності, забезпечивши більш персоналізований та кращий користувацький досвід. Поширення цих технологій демонструє зміну парадигми взаємодії користувачів з цифровим контентом, перехід від пасивного споживання до активного залучення. Завдяки підвищенню точності та емоційної виразності аватарів, межа між віртуальним і реальним світом стає все більш розмитою, що дає змогу користувачам відчувати ефект присутності у віртуальному світі та взаємодію з віртуальними об'єктами. Цей прогрес особливо важливий у мобільній доповненій реальності, де синтез специфічних для користувача тривимірних зображень може призвести до прогресу в особистому спілкуванні, соціальній взаємодії та професійній співпраці на портативних пристроях.

У першому розділі «Аналіз методів та засобів синтезу тривимірного зображення користувача в мобільних смарт системах» здійснено опис технологій доповненої та віртуальної реальності, особливо їхню взаємодію з мобільними пристроями. Проведено аналіз форматів файлів, що використовуються для зберігання та представлення тривимірних моделей, переважно на мобільних платформах. Крім того, ретельно розглядаються сучасні методи та інструменти для синтезу тривимірних зображень. Проведене

дослідження виявило низку невирішених проблем, зокрема, пов'язаних зі створенням наборів даних для навчання нейромереж із синтезу тривимірних облич, етичними міркуваннями та технічними складнощами синтезу. Виявлено брак наукових досліджень щодо мобільної інтеграції синтезованих тривимірних облич для систем ДР/ВР. З огляду на зростаючу роль смартфонів у поширенні технології віртуальної реальності та постійні дослідження синтезованих аватарів, у розділі запропоновано розробити нові методи синтезу зображень на мобільних операційних системах, пристосованих для додатків із використанням технологій доповненої та віртуальної реальності.

У другому розділі «Розроблення методу синтезу тривимірного зображення користувача» окреслено вимоги до синтезу тривимірного зображення користувача на мобільних операційних системах. У результаті аналізу за допомогою розв'язання задачі БКО зроблено висновок, що формат USDZ є оптимальним вибором для розміщення тривимірних моделей користувача на iOS платформі. Розроблено метод синтезу тривимірного зображення користувача з використання формату USDZ, орієнтований на зменшення розмірів тривимірних моделей. Розроблений метод дає змогу користувачам взаємодіяти з моделлю, зокрема, використовуючи доповнену реальність для відображення виразу обличчя в реальному часі. Для забезпечення продуктивності розробленого методу на мобільних пристроях, базова модель оптимізує геометрію та використовує 52 змішані форми, що забезпечують відтворення широкого спектру виразів обличчя, не перевантажуючи системні ресурси. Метод підкреслює баланс між виразністю та технічною ефективністю, використовуючи формат USDZ, що оптимально підходить для мобільних платформ.

Також, за допомогою методу морфінгу 3D-зображення користувача у форматі USDZ, забезпечено можливість видозмінення аватара. Розроблений підхід використовує маніпуляції з змішаними формами для параметричної зміни характеристик тривимірного зображення користувача, зберігаючи при цьому пропорції та компактність, необхідні для мобільних платформ.

Адаптивність розробленого методу полегшує включення широкого спектру модифікацій обличчя, які алгоритмічно оптимізовані для ефективної роботи на мобільних платформах.

У третьому розділі «Розроблення методу шейдерного зафарбовування та методу синтезу текстур тривимірного зображення користувача» удосконалено метод шейдерного зафарбовування тривимірного зображення користувача за допомогою інтеграції техніки текстурування з фрагментними шейдерами. Алгоритм методу побудовано на основі ігрового рушія SceneKit, інтегрованого в платформу iOS, та низькорівневого апаратного прискорювача тривимірної графіки Metal. Розроблений метод, забезпечує зменшення використання текстур на 57% та оптимізує обчислювальне навантаження на мобільні системи.

У розділі також розроблено метод синтезу текстур тривимірного зображення користувача, що спрощує процес рендерингу завдяки значного скорочення обчислень у реальному часі усуваючи обрахунок кольору кожного текселя під час відображення кадру. Метод використовує техніку «запікання текстур», що дає змогу попередньо розраховувати текстури, таким чином спрощуючи процес рендерингу під час взаємодії з користувачем. Розроблений метод передбачає створення математичої моделі, яка інтегрує базовий аватар з освітленням, перспективами камери та комплексною системою текстур. Таким чином розроблений метод підвищує обчислювальну ефективність мобільної системи, полегшуючи створення складних візуальних ефектів і користувацьких налаштувань без необхідності постійного перерахунку кольору текселів аватара користувача.

У четвертому розділі «Особливості реалізації засобів синтезу тривимірного зображення користувача та результати розробленої системи під мобільну платформу» описано інформаційну технологію синтезу аватара користувача та функціональні можливості її складових, призначених для синтезу тривимірних зображень користувачів на мобільній платформі iOS.

Розроблено багаторівневу архітектуру системи синтезу аватарів

користувачів на iOS платформі, використовуючи попередньо розроблені методи та алгоритми. Ця система складається з ресурсного шару для даних і параметрів, презентаційного шару для рендерингу аватара та інтерфейсного шару, який дає змогу взаємодіяти з користувачем у режимі реального часу та налаштовувати аватар у реальному часі. Невід'ємною частиною розробленої системи є набір модулів, що відповідають за конфігурацію текстур, налаштування освітлення та синтез виразу обличчя, забезпечуючи високу точність та інтерактивність взаємодії з користувачем.

Розроблено алгоритм перетворення тривимірних моделей у формат USDZ, що долає обмеження поширених інструментів тривимірного моделювання, які не зберігають інформацію про змішані форми. Цей багатоетапний процес перетворення є передумовою для подальших методів синтезу аватарів, оскільки він забезпечує цілісність змішаних форм і текстур.

Визначено необхідні апаратні вимоги для оптимальної роботи розробленої системи синтезу аватару користувача на iOS платформах, підкреслено необхідність використання iOS 13 або новішої версії для забезпечення сумісності системи. Окреслено основні конфігурації апаратного забезпечення, необхідні для використання розробленої системи.

Підтверджено здатність розробленої системи створювати динамічні тривимірні зображення користувачів. Досліджено, що розроблені алгоритми забезпечують стабільне відтворення 60 кадрів за секунду на різних iOS пристроях під час відображення та взаємодії користувача із синтезованою тривимірною моделлю. Проведено порівняння розробленої системи з аналогічними.

Основні наукові результати дисертації опубліковано в 9 працях, зокрема: п'ять статей — у наукових фахових періодичних виданнях України; три публікації — у матеріалах міжнародних науково-технічних конференцій; одна колективна монографія — у наукових періодичних виданнях іншої держави.

Ключові слова: тривимірне зображення користувача, тривимірний аватар, напів-реалістичний аватар, тривимірне моделювання обличчя, ігровий

рушій, доповнена реальність, тривимірна реконструкція обличчя, текстурування, зафарбовування, рендеринг.

ABSTRACT

Ostrovka D. V. Information technology for the synthesis of a three-dimensional user image for mobile augmented reality systems. — Qualifying scientific work on manuscript rights. Dissertation for obtaining the scientific degree of Doctor of Philosophy in specialty 122 «Computer Science». — Lviv Polytechnic National University, Lviv, 2023.

Abstract content. This thesis is devoted to the development of methods and tools to improve the efficiency of the process of synthesising a 3D image of a user in mobile augmented reality systems based on the means of displaying 3D objects built into the mobile system. In the future, this could significantly improve mobile applications using augmented or virtual reality technology, providing a more personalised and better user experience. The proliferation of these technologies demonstrates a paradigm shift in the way users interact with digital content, from passive consumption to active engagement. Thanks to the increased accuracy and emotional expressiveness of avatars, the line between the virtual and real worlds is becoming increasingly blurred, allowing users to experience the effect of being present in the virtual world and interacting with virtual objects. This progress is especially important in mobile augmented reality, where the synthesis of user-specific 3D images can lead to advances in personal communication, social interaction and professional collaboration on portable devices.

The first chapter, «Analysis of Methods and Tools for Synthesising a 3D User Image in Mobile Smart Systems» describes augmented and virtual reality technologies, especially their interaction with mobile devices. The thesis analyses file formats used for storing and presenting three-dimensional models, mainly on mobile platforms. In addition, modern methods and tools for the synthesis of three-dimensional images are carefully considered. The study revealed a number of unresolved issues, in particular, related to the creation of datasets for training neural networks for 3D face synthesis, ethical considerations, and technical difficulties of

synthesis. A lack of scientific research on the mobile integration of synthesised 3D faces for VR/VR systems has been identified. Given the growing role of smartphones in the spread of virtual reality technology and the ongoing research on synthesised avatars, the chapter proposes to develop new methods for image synthesis on mobile operating systems adapted for applications using augmented and virtual reality technologies.

The second chapter, «Development of a Method for Synthesising a 3D User Image» outlines the requirements for synthesising a 3D user image on mobile operating systems. As a result of the analysis by solving the multi-objective optimisation problem, it is concluded that the USDZ format is the optimal choice for placing 3D user models on the iOS platform. A method for synthesising a 3D image of a user using the USDZ format has been developed, focused on reducing the size of 3D models. The developed method allows users to interact with the model, in particular, using augmented reality to display facial expressions in real time. To ensure the performance of the developed method on mobile devices, the base model optimises the geometry and uses 52 blend shapes that ensure the reproduction of a wide range of facial expressions without overloading system resources. The method emphasises the balance between expressiveness and technical efficiency, using the USDZ format, which is optimised for mobile platforms.

In addition, by using the method of morphing a 3D user image in the USDZ format, the avatar can be modified. The developed approach uses manipulations with blend shapes to parametrically change the characteristics of a 3D user image, while maintaining the proportions and compactness required for mobile platforms. The adaptability of the developed method facilitates the inclusion of a wide range of facial modifications that are algorithmically optimised for efficient operation on mobile platforms.

In the third chapter, «Development of a shader painting method and a method for synthesising textures of a three-dimensional user image» the method of shader painting of a 3D user image was improved by integrating the texturing technique with fragment shaders. The algorithm of the method is based on the SceneKit game

engine integrated into the iOS platform and the Metal low-level hardware 3D graphics accelerator. The developed method reduces the use of textures by 57% and optimises the computational load on mobile systems.

The chapter also develops a method for synthesising the textures of a 3D user image, which simplifies the rendering process by significantly reducing real-time computations by eliminating the calculation of the colour of each texture during the display of the frame. The method uses the «texture baking» technique, which allows pre-calculating textures, thus simplifying the rendering process during user interaction. The developed method involves the creation of a mathematical model that integrates a basic avatar with lighting, camera perspectives, and a complex texture system. Thus, the developed method increases the computational efficiency of the mobile system, facilitating the creation of complex visual effects and user settings without the need to constantly recalculate the colour of the user's avatar textures.

Chapter 4, «Features of Implementation of the Means of Synthesis of 3D User Images and Results of the Developed System for a Mobile Platform» describes the information technology for synthesising a user's avatar and the functionality of its components designed to synthesise three-dimensional user images on the iOS mobile platform.

A multi-level architecture of the system for synthesising user avatars on the iOS platform has been developed using previously developed methods and algorithms. This system consists of a resource layer for data and parameters, a presentation layer for rendering the avatar, and an interface layer that allows real-time interaction with the user and real-time customisation of the avatar. An integral part of the developed system is a set of modules responsible for configuring textures, setting up lighting and synthesising facial expressions, ensuring high accuracy and interactivity of user interaction.

An algorithm for converting 3D models into the USDZ format has been developed that overcomes the limitations of common 3D modelling tools that do not store information about mixed shapes. This multi-stage conversion process is a

prerequisite for further avatar synthesis methods, as it ensures the integrity of mixed shapes and textures.

The necessary hardware requirements for the optimal operation of the developed user avatar synthesis system on iOS platforms are determined, the need to use iOS 13 or later to ensure system compatibility is emphasised. The main hardware configurations required to use the developed system are outlined.

The ability of the developed system to create dynamic 3D images of users' faces is confirmed. It has been shown that the developed algorithms provide stable reproduction of 60 frames per second on various iOS devices during the display and interaction of the user with the synthesised 3D model. The developed system is compared with similar ones.

The main scientific results of the dissertation were published in 9 works, in particular: five articles — in scientific specialised periodicals of Ukraine; three publications — in the proceedings of international scientific and technical conferences; one collective monograph — in scientific specialised periodicals of another country.

Keywords: 3DMM, 3D image, 3D avatar, semi-realistic avatar, 3D face modelling, game engine, augmented reality 3D face reconstruction, texturing, shading, 3D rendering, USDZ, iOS.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті в наукових фахових виданнях України:

1. Островка, Д. В., & Теслюк, В. М. (2022). Синтез моделі навколишнього середовища з використанням вбудованих у мобільні пристрої сенсорів на платформі iOS. Науковий вісник НЛТУ України, 32(5), 87-91. doi: 10.36930/40320512 [1].
2. Д. Островка, В. Теслюк, і Н. Ріпак, «Система аналізу графічних форматів тривимірних об'єктів», Комп'ютерні Технології Друкарства, 2, 58–76, 2022, doi: 10.32403/2411–9210–2022–2–48–58–76 [2].
3. Д. В. Островка та В. М. Теслюк, «Модель синтезу тривимірного зображення користувача на підставі ігрового рушія SceneKit та USDZ формату під ОС IOS», Науковий Вісник НЛТУ України, 33(1), 89–94, 2023, doi: 10.36930/40330112 [3].
4. Д. В. Островка та В. М. Теслюк, «Метод модифікації геометрії 3D-поверхонь в USDZ-форматі з подальшим впровадженням в ігровий рушій SceneKit», Науковий Вісник НЛТУ України, 33(2), 67–72, 2023, doi: 10.36930/40330209 [4].
5. Д. В. Островка та В. М. Теслюк, «Розробка методу зміни властивостей поверхонь тривимірного аватара користувача», Technology Audit and Production Reserves, 2(2(70)), 10–15, 2023, doi: 10.15587/2706–5448.2023.277933 [5].

Матеріали конференцій:

6. D. Ostrovka, T. Teslyuk, P. Vesely, and I. Protsko, «The Analysis and Comparison of File Formats for the Construction of iOS OS Three-dimensional Objects for Augmented Reality Systems», DCSMart, pp. 325–334, Lviv, Ukraine, 2019 [6]. (Scopus)
7. D. Ostrovka and V. Teslyuk, «The Analysis of File Format Conversion Tools for Storing 3D Objects for the iOS Platform», MoML&T&DS, Lviv, Ukraine, 2020 [7]. (Scopus)
8. D. Ostrovka, V. Teslyuk, M. Seneta, I. Kazymyra, and T. Smerdova, «A

Method for Modifying the Geometry of 3D Surfaces in USDZ Format with Further Implementation in the SceneKit Game Engine», MoMLLeT&DS, pp. 435–445, Lviv, Ukraine, 2023 [8]. (Scopus)

Колективні монографії:

9. D. Ostrovka and V. Teslyuk, «The current state and prospects of advanced reality technology in smart mobile devices», in «Selected aspects of digital society development, in Series of Monographs / Faculty of Architecture, Civil Engineering and Applied Arts. University of Technology», no. monograph 45., Katowice, Poland: Publishing House of University of Technology, 2021, p. 179 [9].

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	15
ВСТУП.....	16
Розділ 1. Аналіз методів та засобів синтезу тривимірного зображення користувача в мобільних смарт системах	22
1.1 Особливості та специфіка систем доповненої та віртуальної реальності загалом та на мобільних пристроях	22
1.2 Аналіз основних форматів представлення тривимірних геометричних моделей.....	27
1.3 Аналіз наявних методів синтезу тривимірних зображень користувача для систем доповненої та віртуальної реальності	34
1.4 Формулювання мети й задач досліджень дисертаційної роботи	39
Висновки до розділу 1	41
Розділ 2. Розроблення методу синтезу тривимірного зображення користувача	43
2.1 Формулювання вимог та вибір принципів синтезу аватара користувача в мобільній смарт системі.....	43
2.2 Модель вибору оптимального формату представлення тривимірних зображень в мобільній операційній системі	43
2.3 Розроблення методу синтезу тривимірного зображення користувача на основі базових моделей.....	48
2.4 Побудова алгоритмів реалізації методу синтезу тривимірного зображення користувача на основі базових моделей.....	52
2.5 Розроблення методу морфінгу тривимірного зображення користувача	57
2.6 Особливості алгоритмічної реалізації методу морфінгу тривимірного зображення користувача.	61

Висновки до розділу 2.....	63
Розділ 3. Розроблення методу шейдерного зафарбовування та методу синтезу текстур тривимірного зображення користувача.....	65
3.1 Розроблення методу шейдерного зафарбовування тривимірного зображення користувача	65
3.2 Особливості алгоритмічної реалізації методу шейдерного зафарбовування тривимірного зображення користувача	69
3.3 Розроблення методу синтезу текстур тривимірного зображення користувача в режимі реального часу	73
3.4 Розроблення алгоритму синтезу текстур тривимірного зображення користувача в режимі реального часу.	77
Висновки до розділу 3.....	80
Розділ 4. Особливості реалізації засобів синтезу тривимірного зображення користувача та результати розробленої системи під мобільну платформу	81
4.2 Розроблення архітектури програмної системи синтезу тривимірного зображення користувача на ОС iOS	82
4.3 Особливості алгоритмічного забезпечення системи синтезу тривимірного зображення користувача.....	86
4.4 Вимоги до апаратного забезпечення.....	90
4.5 Результати дослідження	92
4.5.1 Результати застосування методу синтезу тривимірного зображення користувача	92
4.5.2 Результати процесу морфінгу тривимірного зображення користувача	94
4.5.3 Результати застосування методу шейдерного зафарбовування тривимірного зображення користувача.....	96

4.5.4 Результати застосування методу синтезу текстур тривимірного зображення користувача в режимі реального часу	101
4.5.5 Обговорення отриманих результатів та наявних обмежень розроблених рішень	107
Висновки до розділу 4.....	110
Висновки.....	112
Список використаних джерел.....	114
ДОДАТОК А. АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ.....	129

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

1. ДР – доповнена реальність;
2. ВР – віртуальна реальність;
3. MR – mixed reality;
4. 2D – 2-вимірний (2-dimensional);
5. 3D – 3-вимірний (3-dimensional);
6. БКО – багатокритеріальна оптимізація;
7. ОС – операційна система;
8. ПЗ – програмне забезпечення;
9. USDZ – universal scene description zip;
10. 3DMM – 3D morphable model;
11. НМ – нейромережа;
12. ІТ – інформаційна технологія.

ВСТУП

Актуальність теми

Стрімкий розвиток технологій у цифрову епоху помітно підкреслив важливість тривимірного синтезу облич користувачів, відомого також, як аватари. Ці цифрові копії людських облич створюють можливості для більш глибокого занурення і взаємодії користувача в широкому спектрі застосувань, від розваг до медичних симуляцій. Оскільки доповнена реальність і віртуальна реальність стали повсюдними в сучасному суспільстві, попит на високоточні і виразні 3D-зображення користувачів також зріс. Ці аватари, окрім покращення користувацького досвіду, відіграють ключову роль у таких сферах, як ігри, телеконференції та соціальні платформи, створюючи ефект відчутної присутності у віртуальному середовищі.

Декілька чинників підкреслюють зростаючу цікавість користувачів до синтезу тривимірних зображень облич. У сфері розваг використання реалістичних аватарів розширило межі розповіді та інтерактивності. Гравці в комп'ютерні ігри, наприклад, тепер можуть взаємодіяти з персонажами, які відображають динаміку реального життя, підсилюючи загальний ігровий досвід. Водночас корисність аватарів виходить за межі розваг. У сфері освіти та навчання вони стали незамінними інструментами. Студенти-медики можуть імітувати складні хірургічні процеси, а команди з ліквідації наслідків стихійних лих сценарії з високим рівнем ризику, забезпечуючи вдосконалення навичок без загрози для безпеки. До того ж, комерційний сектор використовує тривимірні зображення користувачів для покращення взаємодії з клієнтами своїх продуктів, демонструючи віртуальні вітрини магазинів одягу, які надають покупцям автентичний попередній перегляд товарів.

Однак синтез реалістичних аватарів пов'язаний із певними проблемами та етичними міркуваннями. Досягнення балансу між реалістичністю та етичною згодою стає обов'язковим, особливо з огляду на потенційне зловживання гіпер-реалістичними аватарами в зловмисних діях, наприклад, для того, щоб видати себе за когось іншого. Крім того, синтез таких аватарів

вимагає величезного масиву даних для навчання, що підкреслює важливість приватності та потенціал культурних і етичних упереджень. У зв'язку із цими проблемами спостерігається тяжіння до напів-реалістичних аватарів, які, будучи менш схильними до зловживань, також можуть бути більш гнучко налаштовані.

Мобільні платформи, зважаючи на їхнє широке охоплення, стали епіцентром споживання тривимірного контенту. Однак тонкощі, пов'язані з рендерингом тривимірних зображень користувачів на мобільних пристроях, особливо з огляду на їхні обмежені ресурси порівнюючи з традиційними ПК, потребують особливої уваги. Проблеми рендерингу, від забезпечення точності передачі кольору до оптимізації розміру моделі, відіграють вирішальну роль в отриманні користувачем ефекту присутності. Окрім того, можливість модифікувати тривимірні моделі обличчя користувачів після початкового синтезу, наприклад, коригувати колірні атрибути в режимі реального часу, створює умови для нової цифрової репрезентації, орієнтованої на користувача, сприяючи, як його автентичності, так і індивідуальності.

Отже, синтез аватара користувача — це важливий момент на перетині технологій, етики та користувацького досвіду. З розвитком наукових досліджень у цій галузі стає очевидним, що цифрова репрезентація людини рухається в напрямі глибокого прогресу. Нагальним завданням зараз є не лише використання потенціалу цієї технології, але й забезпечення її етично обґрунтованого застосування. У центрі уваги залишається розробка рішень, які є одночасно технологічно ефективними та етично відповідальними.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами й темами.

Дисертація виконувалася відповідно до пріоритетних напрямів науково-дослідних робіт Національного університету «Львівська політехніка» та відповідно до координаційних планів Міністерства освіти й науки України. Зокрема, наукові дослідження виконувалися в рамках держбюджетних наукових тем кафедри автоматизованих систем управління: «Експериментальна мобільна робототехнічна платформа з інтелектуальною

системою управління та захистом передачі даних» (№ держ. реєстру 0122U000891), «Експериментальна система нейромережевого криптографічного захисту та передачі даних у реальному часі з використанням баркероподібних кодів» (№ держ. реєстру 0121U109503).

Метою дисертаційної роботи є розроблення методів синтезу та візуалізації аватара користувача в мобільних системах.

Для досягнення поставленої мети в роботі постає необхідність розв'язати такі задач:

1. Провести аналіз наявних методів та засобів синтезу аватарів користувачів включно з аналізом файлових форматів для збереження тривимірних моделей, зокрема на мобільних пристроях.
2. Розробити метод синтезу аватара користувача для мобільних систем.
3. Розробити метод шейдерного зафарбовування аватара користувача.
4. Розробити метод синтезу текстур аватара користувача в режимі реального часу.
5. Розробити інформаційну технологію синтезу аватара користувача.
6. Розробити програмний модуль взаємодії синтезованого аватара та користувача з використанням засобів доповненої реальності.

Об'єкт дослідження — процес синтезу та візуалізації аватара користувача для мобільних систем доповненої реальності.

Предмет дослідження — Методи, алгоритми та програмно-апаратні засоби синтезу аватара для мобільних систем доповненої реальності.

Методи дослідження: Для розв'язання поставлених у дисертаційній роботі задач використано такі методи: багатокритеріальної оптимізації, шейдерного зафарбовування, рендерингу, текстурування, об'єктно-орієнтованого програмування, математичного моделювання.

Наукова новизна одержаних результатів.

Уперше розроблено метод синтезу аватара, який за рахунок використання розроблених базових моделей та засобів зміни параметрів їх елементів забезпечує зменшення часу адаптації аватара до вимог конкретного

користувача і доступних ресурсів системи.

Удосконалено метод шейдерного зафарбовування аватара користувача, який за рахунок поєднання операцій текстурування та фрагментних шейдерів забезпечує зменшення обсягу даних для його відображення.

Удосконалено метод синтезу текстур аватара користувача, який за рахунок змішування первинних текстур дає змогу мінімізувати обсяг обчислень при відображенні користувача в режимі реального часу.

Отримала подальший розвиток інформаційна технологія синтезу аватара, яка за рахунок використання розроблених і вдосконалених методів, вибраної структури даних збереження тривимірних моделей та врахованих обмежень обчислюваних ресурсів системи забезпечує зменшення часу візуалізації.

Практичне значення одержаних результатів.

Розроблено структуру інформаційної технології, яка включає систему синтезу тривимірного зображення користувача, що базується на використанні ігрового рушія SceneKit та програмно-апаратного прискорювача Metal. У результаті розроблена система здатна підтримувати стабільну частоту в 60 кадрів на секунду під час взаємодії користувача з аватаром.

Проведено аналіз стану ресурсів мобільних пристроїв під час роботи розробленої системи, а саме:

- номінальні теплові показники на всіх пристроях,
- використання процесора в межах 50 % від доступних ресурсів,
- використання оперативної пам'яті в межах 300 МБ,

що підкреслює ефективність розробленої системи та оптимізацію для стабільної роботи на різноманітних апаратних конфігураціях. Також розроблена система в 3,75 рази ефективніша за розміром порівнюючи з аналогом, який використовував крос-платформний ігровий рушій Unity і не використовував формат USDZ для зберігання моделей.

Розроблено алгоритм для експорту 3D-моделей зі змішаними формами в оптимізований формат USDZ, який безпосередньо сумісний із системою iOS,

для забезпечення продуктивності і зручності використання синтезованих 3D-зображень користувача на мобільній платформі iOS.

Розроблений метод шейдерного зафарбовування тривимірного зображень користувача вдосконалений за допомогою техніки текстуровання у поєднанні з фрагментними шейдерами, забезпечує зменшення використання текстур на 57%, що призводить до зменшення обчислювального навантаження на мобільну систему.

Результати розроблених методів та засобів впроваджені в навчальний процес Національного університету «Львівська політехніка» при викладанні дисципліни «Доповнена реальність в освіті: впровадження європейського досвіду» (підтверджено актом впровадження).

Особистий внесок здобувача.

Основні положення та результати дисертаційної роботи одержані автором самостійно. Особисто здобувачеві належать такі наукові результати: проведено аналіз форматів файлів для збереження 3D-об'єктів у системах доповненої реальності на базі iOS платформи [2], [6], [9], розроблено метод синтезу аватара користувача з використанням USDZ формату на платформі iOS [1], [3], [7], розроблено метод морфінгу аватара користувача у форматі USDZ [4], [8], розроблено метод шейдерного зафарбовування аватара користувача з використанням вбудованого в мобільну систему ігрового рушія SceneKit та програмно-апаратного прискорювача Metal [5].

Апробація результатів дисертації. Результати дисертаційної роботи доповідалися на конференціях: 1-й Міжнародний семінар із цифрового контенту та розумних мультимедійних технологій DCSMart 2019, Сучасні технології машинного навчання та семінар із науки про дані 2020 MoMLeT+DS 2020, Сучасні технології машинного навчання та семінар із науки про дані MoMLeT+DS 2023. Також результати доповідалися на семінарах кафедри автоматизованих систем управління «Національного університету «Львівська політехніка».

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається із вступу,

чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел із 130 найменувань. Повний обсяг дисертації складає 131 сторінку, основний зміст викладено на 113 сторінках, де наведено 29 рисунків та 15 таблиць, 3 додатки.

Розділ 1. Аналіз методів та засобів синтезу тривимірного зображення користувача в мобільних смарт системах

1.1 Особливості та специфіка систем доповненої та віртуальної реальності загалом та на мобільних пристроях

Технології доповненої реальності (ДР) і віртуальної реальності (ВР) стрімко розвиваються упродовж багатьох років, а сучасні мобільні пристрої стають основною платформою для їхнього застосування. У цьому розділі розглядаються особливості та основні аспекти систем доповненої і віртуальної реальності, висвітлюється розвиток цих технологій та їхня нинішня орієнтація на мобільні пристрої, як основну сферу застосування.

Розвиток систем ДР та ВР можна простежити з 1960-х років, коли Іван Сазерленд представив першу систему ДР у вигляді шолома, який накладав 3D-інформацію на реальні об'єкти. Хоча термін «доповнена реальність» був введений лише в 1992 році вченими Кауделлом і Мізеллом, основа для технології ДР уже була закладена. У 1990-х роках спостерігався значний прогрес у дослідженнях ДР і ВР, а також започаткування таких заходів, як Міжнародний семінар і симпозіум із доповненої реальності, Міжнародний симпозіум зі змішаної реальності та семінар із проектування середовищ доповненої реальності. Постійний розвиток цих технологій призвів до появи у 21 столітті гарнітур доповненої реальності, таких як HoloLens, Google Glass та Magic Leap тощо [10], [11].

Gartner, провідна дослідницька та консалтингова компанія, з 1995 року використовує «цикл очікувань», як графічне зображення зрілості, прийняття та соціального застосування конкретних технологій. Цикл складається з п'яти етапів:

- Тригер технології.

- Пік завищених очікувань.
- Впадина розчарування.
- Схил прозріння.
- Плато продуктивності.

За даними Gartner [12], технологія доповненої реальності швидко досягла зрілості й після 2018 року перестала вважатися технологією, що розвивається, тому її не включили до річного циклу. Така оцінка дослідницької компанії викликана широким впровадженням та інтеграцією цієї технології в різні галузі. Смартфони стали вирішальним чинником у цьому процесі, оскільки вони забезпечують доступну, економічно ефективну платформу для використання технології доповненої реальності. У результаті ДР успішно пройшла цикл очікувань Gartner і досягла плато продуктивності, де продовжує розвиватися і збільшувати сферу застосування на смартфонах та інших мобільних пристроях.

Сучасні смартфони мають усі необхідні компоненти підтримування технологій ДР/ВР, включно з екранами, процесорами, давачами положення і місцезнаходження, камерами та модулями Wi-Fi і Bluetooth. Широке розповсюдження смартфонів, а також їхня відносна доступність у порівнянні з гарнітурами ДР/ВР роблять їх ідеальною платформою для впровадження ДР/ВР. Виробники мобільних пристроїв визнали цей потенціал, що призвело до розроблення спеціалізованих бібліотек для створення ДР/ВР -додатків. Наприклад, у 2017 році провідні гравці мобільного ринку Apple та Google представили перші версії своїх фреймворків доповненої реальності ARKit та ARCore [13]. Одночасно ці компанії надали розробникам інструменти машинного навчання, такі як CoreML та TensorFlow [14], які відіграють ключову роль у розпізнаванні об'єктів та середовища.

На додаток до програмних рішень, активно інтегрують апаратні досягнення, такі, як нейронні процесори (Neural Engine, Neural Core) і давачі глибини LiDAR. Крім того, щорічні оновлення смартфонів охоплюють не лише зміни в дизайні та нові функції, але й покращення продуктивності

процесора. Станом на листопад 2020 року флагманський iPhone 12 Pro від Apple використовує процесор A14 з 5-нм техпроцесом та 11,8 млрд транзисторів, а флагманський Mate 40 від Huawei оснащений 5-нм процесором — Kirin 9000/9000E. Новітні мобільні процесори 2020 року також підтримують стільникові мережі 5G. Такі покращення продуктивності процесорів сприяють швидкому опрацюванню великих обсягів даних, що має вирішальне значення для застосунків, які використовують технологію доповненої реальності. Відповідно, цей момент позитивно впливає на користувацький досвід, оскільки підвищена потужність апаратного забезпечення дає змогу швидше розпізнавати об'єкти та реалістичніше відтворювати поведінку елементів доповненої реальності. Крім того, високошвидкісні мережеві модулі забезпечують миттєвий доступ до значних графічних файлів і покращують багатокористувацьку взаємодію з одним і тим же об'єктом доповненої реальності.

Об'єднання цих інтегрованих програмних і апаратних засобів створює безпрецедентний випадок в індустрії доповненої реальності, даючи змогу розробникам програмного забезпечення створювати рішення, доступні на мільярдах пристроїв по всьому світу. Це основна перевага смартфонів над гарнітурами доповненої реальності. Потенційні користувачі вже придбали ці пристрої, знайомі з їхньою роботою і не потребують додаткових витрат, щоб отримати доступ до технології доповненої реальності. І навпаки, розробникам не потрібно турбуватися про впровадження інновації, оскільки виробники пристроїв уже подбали про цей аспект. Основним викликом на сьогодні є контент, або користувацькі рішення з використанням технологій доповненої реальності.

Розвиток технологій доповненої і віртуальної реальності на мобільних пристроях відкрив численні можливості в різних галузях, таких, як ігри, освіта [15]–[17], охорона здоров'я [18]–[20] та інженерія [21]–[24]. Однак є низка відкритих питань на шляху до повної реалізації потенціалу ДР/ВР на мобільних пристроях та покращення параметрів користувацького досвіду

Енергоспоживання залишається критичною проблемою для додатків доповненої і віртуальної реальності на мобільних пристроях. Відтворення складних ДР/ВР-середовищ та опрацювання великих обсягів даних вимагають значних обчислювальних ресурсів, що призводить до швидкого розрядження акумулятора. Майбутні досягнення в технології акумуляторів та енергоефективних процесорів будуть мати вирішальне значення для підтримання тривалої роботи з ДР/ВР на мобільних пристроях, а сучасні розробки в цій галузі вимагають приділення значної уваги енергоефективності розробленого рішення.

Розроблення інтуїтивно зрозумілого користувацького інтерфейсу та взаємодії для ДР/ВР на мобільних пристроях являє собою унікальний набір викликів. Розробка нових методів введення даних, таких, як розпізнавання жестів, голосове управління і тактильний зворотній зв'язок, буде мати важливе значення для створення захоплюючого і зручного для користувача досвіду ДР/ВР. Водночас, важливою складовою розвитку нового напрямку розробок є стандартизація інтерфейсів та виявлення поведінкових патернів користувачів під час взаємодії з ДР/ВР рішеннями.

В міру того, як технології доповненої і віртуальної реальності стають усе більш інтегрованими в наше повсякденне життя, занепокоєння щодо конфіденційності та безпеки буде лишень зростати. Забезпечення захисту персональних даних і того, що додатки ДР/ВР не порушують конфіденційність користувачів, буде мати першорядне значення для сприяння їхнього широкого впровадження.

Брак стандартизованих форматів та інструментів для створення ДР/ВР контенту є перешкодою для розвитку та впровадження цих технологій на мобільних пристроях. Розроблення загальноприйнятих стандартів та надання розробникам доступних інструментів сприятиме створенню різноманітного та якісного контенту.

Незважаючи на потенційні виклики, пов'язані з технологіями доповненої і віртуальної реальності на мобільних пристроях, нещодавні

досягнення і постійні дослідження дають надію на подолання цих перешкод і відкриття нової ери вражень від занурення в розширену реальність.

Яскравим прикладом з індустрії розваг є мобільна гра Pokémon Go. Запущена у 2016 році, вона принесла \$207 мільйонів доходу упродовж першого місяця і досягла 1 мільярда завантажень до квітня 2019 року [25]. Платформи соціальних мереж також використовують технологію доповненої реальності. Наприклад, Snapchat, 6-й за популярністю додаток для обміну повідомленнями [26], з 238 мільйонами щоденних користувачів, має ДР-маски, які накладаються на обличчя користувачів. Згідно зі щоквартальним звітом Snapchat, цією функцією щодня користуються 180 мільйонів користувачів [27]. Facebook також впровадив ДР-технології у свої продукти, зокрема, рекламні банери, які дають змогу потенційним клієнтам взаємодіяти з рекламованим продуктом [28].

ДР-рішення також суттєво вплинули на індустрію нерухомості та товарів для дому [29]–[31]. Додаток IKEA Place, розроблений у 2017 році, дає змогу користувачам візуалізувати декоративні елементи у 3D, що робить вибір товарів більш ефективним, ніж традиційні каталоги чи веб-сайти. Цей успіх спонукав інші компанії створювати персоналізовані продукти за принципом «приміряй, а потім купуй», завдяки чому додаток IKEA посів друге місце в рейтингу найпопулярніших додатків ДР у 2018 році [32].

Індустрія роздрібної торгівлі також впроваджує технологію доповненої реальності [33]–[35]. У 2018 році L'Oréal придбала Modiface, технологічний стартап, що спеціалізується на зміні кольору косметики на основі доповненої реальності. Співпраця L'Oréal з рекламою у Facebook дала змогу користувачам віртуально приміряти сотні варіацій продуктів вдома. Це сприяло збільшенню продажів електронної комерції на 38,3 % у 2018 році, досягнувши 9,7 % від загального обсягу продажів компанії [36]. До першого кварталу 2020 року продажі електронної комерції зросли на 52,6 %, склавши 20 % від загального обсягу продажів компанії.

Зі свого боку, експерти прогнозують, що продажі, пов'язані з

технологіями доповненої реальності, і далі щорічно зростатимуть, а частка технології в кожній галузі відповідно збільшуватиметься [37], [38]. Наявні мобільні ДР-додатки не лише розважають, але і зменшують проблеми користувачів та пропонують значні покращення. Звіти Gartner вказують на те, що технологія доповненої реальності досягла зрілості й почала приносити відчутні переваги користувачам, особливо на мобільних платформах.

Отже, розвиток систем доповненої і віртуальної реальності вже значно прогресував із моменту їхнього створення, і мобільні пристрої наразі слугують основною платформою для їхнього застосування. Оскільки технології і далі розвиваються, можна зробити припущення, що ДР/ВР стануть ще більш інтегрованими в повсякденне життя людей через мобільні пристрої, створюючи нові можливості та трансформуючи різні галузі.

1.2 Аналіз основних форматів представлення тривимірних геометричних моделей

З розвитком технологій ДР та ВР смартфони стали основним засобом доступу користувачів до можливостей занурення у віртуальне середовище. Разом із цим, зросло значення тривимірних (3D) об'єктів, як складової віртуального простору та призвело до їхньої активної інтеграції в смартфони. Відображення 3D-моделей вимагає не тільки надійного апаратного та програмного забезпечення, а також і структури запису та читання даних про тривимірний об'єкт — формат збереження 3D-файлу. Ринок комп'ютерної графіки пропонує численні рішення для зберігання та представлення 3D-моделей, але багато з наявних форматів стикаються з проблемами сумісності між операційною системою та середовищем розробки, обмеженим доступом для розробників або невідповідністю сучасним технологічним запитам. Ці чинники ускладнюють для розробників вибір найбільш підходящого формату для вирішення їхніх завдань. Метою цього розділу є аналіз та порівняння поширених форматів файлів, таких як Obj, Fbx, Collada та USD-подібних, для

побудови 3D-об'єктів на мобільній платформах iOS. Зрештою, цей аналіз стане основою для подальших досліджень із розробки систем доповненої та віртуальної реальності.

Формат Wavefront Object (Obj) розроблений компанією Wavefront Technologies для їхнього анімаційного пакету Advanced Visualizer [39], він є відкритим і загальноприйнятим форматом для 3D-редакторів. Obj визначає лише геометрію тривимірної моделі:

- Координати вершин.
- Координати текстур.
- Нормалі та грані, що описуються списками вершин багатокутників.

Завдяки вершинам проти годинникової стрілки та необов'язковим нормалям, його перевагами є легке структурування даних та сумісність із різними інструментами 3D-моделювання. Однак йому бракує анімації, інформації про сцену та накладання текстур.

Формат Filmbox (Fbx), розроблений компанією Kaydara, яка зараз належить Autodesk [40]. Забезпечуючи сумісність між програмами 3D-графіки, він є у двійковому та ASCII форматах. Підтримуючи анімацію, інформацію про сцену та накладання текстур, Fbx є популярним у кіноіндустрії та відеоіграх. Його основним недоліком є його пропрієтарний характер і залежність від бібліотеки Fbx-SDK від Autodesk для роботи з файлами Fbx.

Формат COLLaborative Design Activity (Collada), яким керує некомерційна організація Khronos Group [41]. Використовуючи мову розмітки XML, він пропонує анімацію, накладання текстур та інформацію про сцену, а також має офіційну документацію. Однак недоліком є брак єдиних стандартів для створення моделей і потенційні конфлікти в структуруванні даних.

Формат USDZ, розроблений компаніями Apple та Pixar [42]. По суті, це архів файлів Universal Scene Description (USD), який використовується, як ядро додатків Pixar для 3D-рендерингу. Файли USD підтримують як ASCII, так і двійкове представлення. Популярність формату зумовлена зручністю

використання, хорошою підтримуваністю та репутацією компанії Pixar. Набір інструментів USDZ Toolset дає змогу створювати, редагувати та конвертувати файли у формат USDZ. Він дає змогу перевизначати властивості без створення окремих копій, зменшуючи розмір файлу та час обробки, а також підтримує вкладеність, зв'язки та паралельну роботу над фінальною моделлю.

Через брак єдиного стандарту для визначення оптимального формату файлів для представлення 3D-моделей, особливо на платформі iOS, об'єктивне порівняння стає складним завданням. Тому дуже важливо визначити пріоритетність вимог проєкту та необхідних функціональних можливостей.

У дисертаційній роботі сформульовано такі критерії оцінювання різних форматів:

- Сумісність із платформою відображення.
- Швидкість обробки та завантаження форматів файлів на обраній платформі.
- Спектр підтримуваних функцій для відображення 3D-моделей у різних форматах файлів.

Варто зазначити, що дисертаційне дослідження сфокусоване саме на iOS, як платформі для відображення та взаємодії з 3D-моделями. Цей вибір зумовлений тим, що iOS є широко використовуваною операційною системою, що робить її актуальним контекстом для дослідження продуктивності та сумісності різних форматів 3D-файлів.

Формати Collada та USDZ підтримуються мобільною платформою iOS, що дає змогу розробникам відображення 3D-моделей без сторонніх бібліотек та інструментів, спрощуючи процес розроблення програмних систем.

Хоча iOS надає вбудовані інструменти для читання структур моделей у форматі Obj, вона не підтримує додаткові файли.mtl, що містять інформацію про кольори та текстури. Отже, розробники мають створювати додаткову логіку для точного рендерингу моделі або використовувати сторонні рішення.

Формат Fbx, який не підтримується на рівні операційної системи iOS, вимагає для інтеграції бібліотеки FbxSdk від Autodesk. Однак ця бібліотека

несумісна з XCode версії 10.0 і вище (станом на листопад 2019 року остання версія — 11.2.1). Потенційним обхідним шляхом є використання сторонньої бібліотеки «AssimpKit», але це може призвести до збоїв у роботі програми або інших проблем, що негативно вплине на придатність формату для розроблення мобільних додатків.

Отже, робота з форматами Collada та USDZ є більш зручною в порівнянні з іншими, оскільки вони не потребують додаткових бібліотек, зберігаючи розмір кінцевого мобільного додатку. Розглядаючи AssimpKit, важливо зазначити, що він розробляється некомерційною групою без жодних гарантій надійності.

Оскільки кожен формат 3D-файлу по-різному структурує інформацію про модель, час обробки однієї і тієї ж моделі буде відрізнятися залежно від обраного формату. Порівняння швидкості проведено на ідентичних моделях для обраних форматів. Моделі були завантажені з ресурсу «Free3D.com». Під час дослідження проведено два типи порівнянь, з огляду на те, що формат Obj не підтримує анімацію:

- Порівняння швидкості відкриття не анімованих моделей для всіх форматів.
- Порівняння швидкості відкриття анімованих моделей між форматами Fbx, Collada та USDZ.

Порівняння проведено на двох пристроях iOS (iPhone липня 2016 року випуску та iPad Pro 11» 2018 року випуску) з версією iOS 13.1.2 (остання станом на вересень 2019 року). Для порівняння статичних об'єктів обрано модель військового гелікоптера (46 538 полігональних елементів) у форматі Obj, а для порівняння анімованих моделей — модель воїна (3 438 полігональних елементів) у форматі Collada. Результати порівняння швидкості відкриття статичної та анімованої моделей у різних форматах наведені в таблицях 1.1 та 1.2 відповідно.

Як можна побачити з таблиці 1.1, при відкритті статичних файлів формат Obj показав другу найкращу продуктивність.

Таблиця 1.1.

Результати швидкості відкриття статичної моделі в різних форматах

Формат	Розмір файлу, <i>Mb</i>	Швидкість відкриття, сек	
		<i>iPad Pro 11</i>	<i>iPhone 7</i>
<i>Fbx</i>	1,7 <i>Mb</i>	0,59	0,87
<i>Obj</i> (системно)	4,5 <i>Mb</i>	0,25	0,39
<i>Collada</i>	6,3 <i>Mb</i>	0,05	0,10
<i>USDZ</i>	5 <i>Mb</i>	0,40	0,53
<i>Obj</i> (<i>AssimpKit</i>)	4,5 <i>Mb</i>	0,86	1,05
<i>USDC</i>	2,6 <i>Mb</i>	0,27	0,47

Однак під час тестування складних моделей із декількома текстурами було використано сторонню бібліотеку *AssimpKit*. Експерименти показали, що в цих випадках часові витрати суттєво зросли, перевищуючи всі інші формати, що порівнювалися. Отже, ця комбінація вважається найменш ефективною поміж усіх досліджуваних форматів.

Згідно з результатами, наведеними в таблиці 1.1 й таблиці 1.2, формат *Collada* продемонстрував найвищу швидкість відкриття, як для статичних, так і для анімованих моделей насамперед завдяки загальносистемній підтримованості формату, хоча він споживає більше пам'яті через використання мови розмітки XML.

Формати *USDC* та *USDZ*, що підтримуються на системному рівні так само, як і *Collada*, показали середні результати при відкритті статичних та

анімованих файлів. Різниця в часі між цими USD-форматами пояснюється процесом розпакування файлів USDZ. Хоча файли USDZ більші за розміром, вони більш зручні з погляду розробки програмних засобів, оскільки всі ресурси зберігаються в єдиному архіві.

Таблиця 1.2.

Результати швидкості відкриття моделі з анімацією в різних форматах

Формат	Розмір файлу, Mb	Швидкість відкриття, сек	
		<i>iPad Pro 11</i>	<i>iPhone 7</i>
<i>Collada</i>	1,2 Mb	0,02	0,03
<i>USDC</i>	0,327 Mb	0,20	0,10
<i>USDZ</i>	0,886 Mb	0,26	0,37
<i>Fbx</i>	0,677 Mb	0,24	0,30

Файли Fbx демонстрували найнижчу швидкість відкриття, як для статичних, так і для анімованих моделей, а також складність конвертації, що часто призводило до артефактів або некоректного відображення, незважаючи на використання офіційного програмного забезпечення FbxConverterUI від Autodesk.

Отже, формат Collada лідирує за швидкістю відкриття, як для статичних, так і для анімованих моделей, як демонструють показники в таблицях 1.1 і 1.2. Однак формат USDZ також варто розглянути через його співставну швидкість і менший розмір файлу, особливо для складних багатополігональних моделей.

Хоча всі порівнювані формати підтримують схожі технологічні стеки, між ними є відмінності, які можуть суттєво вплинути на доцільність

використання одного формату над іншим для конкретних завдань. У цьому розділі порівнюються технології, що підтримуються форматами, зокрема:

- Опис геометрії моделі за допомогою наближених та незмінних сіток. Ці технології дають змогу виконувати тесселяцію та точне кодування геометрії криволінійних поверхонь, які залишаються незмінними при зміні розширення. Формат USDZ також за замовчуванням сумісний з OpenSubdiv [43], набором бібліотек, які сприяють динамічній швидкості та згладжуванню поверхонь.
- Кольорове відображення. Зазвичай представлений у вигляді вказівки значень для червоного, зеленого та синього компонентів у діапазоні від 0 до 1. Collada, Fbx та USD також підтримують Alpha Blending, що дає змогу включити четвертий параметр для кольору — альфа-компоненту, з можливими значеннями від 0 (повністю прозорий) до 1 (повністю непрозорий).
- Відображення текстур. Усі порівнювані формати підтримують відображення текстур. Collada, Fbx та USDZ також підтримують мультитекстуру, що дає змогу одночасно використовувати дві або більше текстур, як шаблони для моделей поверхонь тривимірних об'єктів.
- Інформація про сцену. Формат Obj не містить інформації про сцену, тоді, як інші порівнювані формати підтримують зберігання інформації про освітлення та відносне положення камери.
- Анімація моделі. Collada, Fbx та USDZ підтримують анімацію ключових кадрів. Їхня реалізація використовує семплер, який описує, як маніпулювати сіткою за допомогою сплайнів на основі часу, що минув. Крім того, ці специфікації містять інформацію про алгоритми сканування та використання інформації, що зберігається у відповідних вузлах. Формат Obj не підтримує анімацію.
- Структура файлів. Файли у форматах Fbx, Obj та USDZ можуть зберігатися, як в ASCII, так і у двійковому вигляді. Collada використовує

мову розмітки XML для зберігання інформації про модель. Для формату Obj версія ASCII (.obj) є незалежною, а двійкова (.mod) є пропрієтарною.

- Документованість формату. Collada та USDZ мають вичерпні офіційні специфікації з прикладами використання. Fbx містить лише документацію класів і методів для бібліотеки Autodesk Fbx-Sdk. Obj не має жодної офіційної специфікації, але, зважаючи на його порівняно невеликий вік, для нього доступні численні незалежні відкриті джерела.

З огляду на технології, що підтримуються форматами, Collada та USDZ є найбільш універсальними завдяки своїй великій документації та відкритості. Що стосується формату Fbx, то його основною перевагою серед інших форматів є широкий спектр підтримуваного програмного забезпечення від Autodesk.

1.3 Аналіз наявних методів синтезу тривимірних зображень користувача для систем доповненої та віртуальної реальності

Прискорений розвиток технологій ДР і ВР, а також досягнення в галузі глибокого навчання (ГН) сприяли сплеску цікавості до досліджень у сфері 3D-моделей обличчя, що морфуються. Ця галузь, започаткована Бланцем і Веттером у 1999 році [44], хоч і не була новою, але її значення посилюється в контексті цих нових технологій.

Процес синтезу 3D-зображень моделюється за допомогою різних обчислювальних методів і математичних моделей, серед яких високоефективною стратегією є 3D-морфована модель (3DMM) [45]. Це статистична модель, яка представляє, як форму, так і текстуру об'єкта, часто людського обличчя, у 3D. Ця модель визначається двома векторами: один для форми (S), а інший для текстури (T), які формулюються як:

$$S = \bar{S} + \sum \alpha_i S_i, \quad (1.1)$$

$$T = \bar{T} + \sum \beta_i T_i, \quad (1.2)$$

де $\bar{S}$ і $\bar{T}$ — це середні форми й текстури, S_i і T_i — відповідні головні компоненти, а α_i і β_i — коефіцієнти, які контролюють внесок кожного компонента.

3DMM слугує кільком важливим цілям у галузі комп'ютерного зору та графіки. Найперше, вона полегшує створення нових облич за допомогою лінійного поєднання векторів форми й текстури [46], отриманих із попередньо визначеного набору даних 3D-обличчя. Ця здатність створювати нові, реалістичні обличчя є надзвичайно корисною в різних сферах, таких, як анімація, ігри, криміналістика, а з розвитком систем ДР/ВР ще й у цих галузях. Крім того, 3DMM забезпечують надійну основу для представлення та маніпулювання специфічними атрибутами обличчя, такими, як вираз обличчя, вік та ідентичність, у контрольований спосіб. Такий контроль атрибутів особливо корисний при створенні анімованих облич із бажаними виразами й характеристиками, що ще більше розширює можливості застосування 3DMM у сферах розваг і комунікації.

Сучасні методи створення тривимірних морфованих моделей наразі зосереджені на використанні глибокого навчання [47], як окремо, так і в поєднанні з класичним моделюванням обличчя та методами оцінки параметрів, що ґрунтуються на оптимізаційній інверсній графіці. Глибоке навчання дає можливість моделювати складні, нелінійні взаємозв'язки і вчитися на великих обсягах даних, що дає змогу створювати високодеталізовані й реалістичні 3D-моделі обличчя. З іншого боку, інверсна графіка, що базується на оптимізації, пропонує більш зрозумілий і структурований підхід, часто заснований на добре зрозумілих принципах з галузі комп'ютерної графіки. Поєднання цих взаємодоповнюючих методологій покращило методи створення 3DMM, завдяки використанню сильних сторін підходів, заснованих, як на даних, так і на моделях.

Математично процес створення 3DMM за допомогою глибокого навчання можна сформулювати, як регресійну задачу. Тут метою є мінімізація різниці між прогнозованими та фактичними 3D-обличчями. Це можна

представити у вигляді:

$$y = f(X; \theta), \quad (1.3)$$

де y — прогнозоване 3D-обличчя, X — набір вхідних ознак, θ — параметри моделі глибокого навчання, а f — функція відображення, яку вивчила модель. Процес навчання підлаштовує параметри θ так, щоб мінімізувати різницю між передбаченими й реальними 3D-обличчями, зазвичай вона вимірюється відповідною функцією втрат.

У практичному застосуванні завдання створення 3DMM за допомогою глибокого навчання [48], [49] часто розбивається на кілька підзадач, кожна з яких стосується окремого аспекту проблеми. Ці підзадачі можуть включати генерацію сітки, генерацію текстури, корекцію освітлення [50]–[52], оцінку відбиття та оцінку точки зору камери.

Завдання генерування сітки полягає в створенні тривимірної сітки, що максимально точно відображає складні геометричні деталі обличчя людини [53], [54].

Генерування текстур — це завдання створення карти текстур, яку можна застосувати до 3D-сітки обличчя. Ця карта містить інформацію про колір для кожної вершини сітки й допомагає додати реалістичності згенерованому 3D-обличчю. Як і для генерації сітки [55], для генерації текстури потрібна модель, яка може відобразити складні варіації текстури обличчя різних людей.

Оцінка відбивної здатності та визначення точки огляду камери є важливими, але водночас складними компонентами в створенні 3DMM [56]. Оцінка відбивної здатності стосується моделювання взаємодії світла зі шкірою, що вимагає ретельного врахування, як поверхневого розсіювання, так і поверхневих відбиттів на шкірі для підвищення реалістичності синтезованого 3D-обличчя. Це завдання, однак, є складним через «гру» світла на поверхні шкіри. Оцінка точки огляду камери, з іншого боку, визначає положення та орієнтацію камери щодо обличчя. Це важливо для вирівнювання згенерованого 3D-обличчя з вхідним зображенням або правильного розташування його в 3D-сцені. Моделі глибокого навчання часто навчаються

оцінювати ці параметри точки огляду камери на основі двовимірних зображень обличчя, забезпечуючи, у такий спосіб, комплексне рішення для генерації 3D-обличчя на основі двовимірних даних.

Іншим важливим етапом створення реалістичного виразу обличчя в 3D-моделях, що морфуються є забезпечення варіативності людської міміки [57], [58]. Вираз обличчя визначається складною взаємодією багатьох різних лицьових м'язів, кожен із яких робить свій внесок у кінцевий вигляд образу. Індивідуальні особливості вираження емоцій значно ускладнюють процес моделювання [59]. Одним із найбільш поширених методів відображення міміки обличчя користувача є використання техніки змішування форм, що представляють собою формулу деформації певних вершин тривимірної сітки [60]. Набір таких форм можна комбінувати лінійно, щоб створити широкий спектр виразів обличчя. Кожна форма змішування має бути розроблена у такий спосіб, щоб вона точно відображала відповідну мімічну дію при застосуванні до будь-якого обличчя в 3DMM.

До того ж, створення змішаних форм, які можна лінійно комбінувати для представлення широкого спектру виразів, створює ще один рівень складності. Лінійні комбінації форм можуть призвести до нереалістичних [61] або фізично неможливих виразів обличчя, якщо форми не були належним чином спроектовані. Забезпечення того, щоб форми змішування були одночасно всеосяжними, тобто охоплювали всі можливі вирази обличчя, і сумісними, тобто давали змогу їхнього осмисленого поєднання, є складним завданням.

До цієї складності додається необхідність підтримувати ідентичність людини в різних виразах обличчя. Коли вираз обличчя змінюється, ідентичність людини — представлена характерною формою і текстурою обличчя — має залишатися впізнаваною [62]. Забезпечення цієї послідовності при точному відображенні широкого спектру виразів обличчя є особливо складним аспектом генерації змішаних форм.

Змішування форм можна представити такою формулою:

$$f = b_0 + \sum_{k=1}^n w_k (b_k - b_0), \quad (1.4)$$

де f позначає остаточну розраховану конфігурацію емоції обличчя, b_0 – позначає базову форму або форму за замовчуванням, яка часто співвідноситься з нейтральним або спокійним виразом обличчя в контексті анімації обличчя, b_k – відповідає різним ключовим конфігураціям або «виразам», які фіксують значні деформації від базової форми, w_k – інкапсулює вагові коефіцієнти, які визначають ступінь впливу кожної ключової фігури-мішені на кінцеву конфігурацію.

Отже, розрахункова конфігурація f отримується, починаючи з базової форми b_0 , а потім інтегруючи зважену суму дельт між ключовими формами-мішенями b_k і базовою формою. Ваги w_k моделюють частку кожної дельти, що об'єднується, у такий спосіб забезпечуючи плавне поєднання базової фігури з ключовими фігурами-мішенями.

Зазвичай 3D-художники часто створюють форми змішування вручну, ґрунтуючись на поєднанні анатомічних знань, даних спостережень і художнього судження. Однак із появою методів машинного навчання спостерігається зростаюча цікавість до автоматизації цього процесу. Новітні підходи передбачають навчання моделі машинного навчання, наприклад, глибокої НМ [63], генерувати форми змішування на основі бази даних 3D-сканів обличчя з різноманітними виразами [64], [65].

Отже, форми змішування залишаються невід'ємною частиною відтворення виразу обличчя в 3D-анімації, забезпечуючи міцну основу для реалістичності. Проте, процес створення фігур змішування розвивається, переходячи від ручних до автоматизованих методів. Цей перехід має на меті підвищити плавність і природність анімації обличчя, але трансформація все ще триває, оскільки пошук найбільш реалістичних і плавних рухів продовжується.

Під час аналізу сучасних методів синтезу 3D-обличчя, також відомих як 3D-моделі, що морфуються, зроблено висновок, що даний напрям значно просунувся вперед за останні роки, ставши центральним в сфері синтезу 3D-зображень. Це призвело до помітних проривів у створенні високоякісних 3D-

моделей обличчя. Однак, незважаючи на ці значні успіхи, у цій галузі залишається кілька відкритих проблем, переважно пов'язаних зі створенням наборів даних, етичними питаннями та різноманітними технічними перешкодами.

Основна проблема в галузі синтезу 3D-обличчя з використанням машинного навчання полягає в створенні наборів даних, достатньо надійних і різноманітних, щоби полегшити створення реалістичних моделей [66]–[68]. Це дуже важливо, оскільки якість набору даних безпосередньо впливає на точність і узагальненість синтезованих облич. Нинішнім наборам даних часто не вистачає діапазону, необхідного для охоплення всіх можливих варіацій обличчя за віком, статтю, етнічною належністю та виразом. Отже, синтез репрезентативного набору даних, що точно відображає різноманітні аспекти людських облич, залишається серйозною складністю.

Етичні проблеми синтезу 3D-обличчя є ще одним важливим аспектом, що потребує пильної уваги. Зловживання синтезованими зображеннями облич може призвести до оманливих практик, таких, як крадіжка особистих даних або реалістичних підробок (deepfakes). Отже, існує нагальна потреба в створенні безпечних та етичних засобів синтезу 3D-моделей обличчя, щоб забезпечити їхнє відповідальне застосування.

Крім того, залишаються відкритими такі технічні перешкоди для синтезу обличчя, як-от генерація волосся [69], зубів [70], [71] чи язика [72], [73] а також робота з перешкодами на обличчі. Перелічені завдання значно менш вивчені в сучасних дослідженнях ніж синтез форми обличчя користувача.

1.4 Формулювання мети й задач досліджень дисертаційної роботи

Оскільки технології доповненої реальності та віртуальної реальності і далі розвиваються, сфера синтезу 3D-обличчя зарекомендувала себе, як значна сфера цікавості, як у наукових дослідженнях, так і в практичному

застосуванні. Однак, незважаючи на значний прогрес у цій галузі, залишається низка відкритих проблем, які потребують цілеспрямованої уваги та вивчення.

Аналіз наявних методів та засобів у даній галузі виявив такі недоліки:

1. Етичні проблеми: З постійно зростаючою реалістичністю синтезованих 3D-обличчя з'являється паралельний ризик зловживань, таких, як крадіжка особистих даних або створення оманливих реалістичних підробок. Це зумовлює необхідність зосередитися на розробці надійних етичних принципів і регуляторних заходів для зменшення цих ризиків.
2. Редагування обличчя після синтезу: Сучасні технології 3D-синтезу обличчя часто пропонують обмежену гнучкість для подальшого редагування або модифікації синтезованої моделі, що є значною перешкодою для вдосконалення моделі та її адаптивності.
3. Інтеграція на мобільних пристроях: Незважаючи на повсюдне поширення мобільних пристроїв, є недостатньо досліджень щодо інтеграції методів синтезу 3D-обличчя в ці платформи.
4. Дослідження рендерингу: Тема рендерингу, що має вирішальне значення для покращення візуальної якості та реалістичності синтезованих облич, є малодослідженою порівняно з самим процесом синтезу 3D-обличчя [74], [75].
5. Формат зберігання 3D-файлів: Оптимальне зберігання 3D-моделей, з огляду на їхній потенційний розмір і складність, часто не береться до уваги в контексті синтезу 3D-обличчя.
6. Генерація волосся [76], [77] та аксесуарів: Синтез допоміжних об'єктів, таких, як волосся та інших аксесуарів, залишається малодослідженою галуззю досліджень.

Для усунення перерахованих недоліків пропонується розробити метод синтезу напів-реалістичного тривимірного зображення аватара користувача з використанням найбільш оптимального формату зберігання тривимірної моделі з подальшим впровадженням на мобільну операційну систему забезпечують можливість високочастотного рендерингу, модифікації моделі

на мобільному пристрої а також використанні в ДР/ВР системах.

Для вирішення поставленої наукової задачі необхідно дослідити та розв'язати такі задачі:

1. Проаналізувати методи та засоби синтезу тривимірного зображення користувача, сформулювати основні вимоги.
2. Вдосконалити метод метод збереження 3D-моделі в обраному форматі файлу.
3. Розробити метод оптимального рендерингу тривимірного зображення на мобільній ОС.
4. Розробити метод модифікації синтезованої 3D-моделі користувача.
5. Вдосконалити метод відображення змішаних форм для задання виразів обличчя синтезованої моделі.
6. Здійснити програмну реалізацію розроблених і вдосконалених методів синтезу тривимірного зображення користувача.

Висновки до розділу 1

Проведений аналіз вказує на стрімкий розвиток технологій доповненої і віртуальної реальності, з фокусом на їхню усе більш інтегровану роль у мобільних пристроях. Виявлено, що ця технологічна еволюція сприяє появі нових можливостей та трансформаціям у багатьох галузях.

Проведено аналіз файлових форматів для збереження та відображення тривимірних моделей, зокрема на мобільних пристроях.

Проведено аналіз сучасних методів та засобів синтезу тривимірного обличчя, також відомих як тривимірних моделей, що морфуються (3DMM). Проведене дослідження виявило існування різних відкритих проблем, переважно пов'язаних зі створенням наборів даних, етичними наслідками та технічними складнощами синтезу.

Виявлено, що в галузі мобільної інтеграції зберігається помітний брак досліджень у контексті синтезу тривимірних облич а також їхнього

впровадження у системи доповненої та віртуальної реальності. З огляду на зростаюче значення смартфонів у ширшому застосуванні технологій доповненої та віртуальної реальності разом з актуальним напрямом досліджень синтезованих аватарів пропонується розробити методи та засоби синтезу та візуалізації аватара користувача з використанням технологій доповненої та віртуальної реальності на мобільних платформах з врахуванням їх обмежених обчислювальних ресурсів.

Розділ 2. Розроблення методу синтезу тривимірного зображення користувача

2.1 Формулювання вимог та вибір принципів синтезу аватара користувача в мобільній смарт системі

У результаті проведеного в першому розділі аналізу сформульовано ключові вимоги для розробки системи процесу синтезу аватара користувача, оптимізованого для мобільних систем.

Синтезована модель має бути придатною до модифікацій зміни властивостей поверхонь зовнішнього вигляду та геометричної сітки моделі.

Синтезована 3D-модель має бути пристосована для інтеграції з технологіями ДР/ВР, а також і до інтерактивної взаємодії з користувачем за допомогою проекції виразу обличчя користувача.

3D-модель має оптимізовано відображатися на мобільному пристрої забезпечуючи високу частоту кадрів під час рендерингу, взаємодії та модифікації аватара в режимі реального часу.

Для забезпечення ефективного використання обмеженого дискового простору мобільних пристроїв, розроблені методи та засоби мають передбачати використання оптимального формату збереження тривимірних даних серед найбільш поширених форматів проаналізованих у першому розділі.

2.2 Модель вибору оптимального формату представлення тривимірних зображень в мобільній операційній системі

У загальному випадку задача вибору оптимального варіанту формату для збереження тривимірної моделі користувача є багатокритеріальною [78], [79]. Попередній аналіз наявних форматів дає змогу суттєво зменшити їхню кількість до такої множини:

$$M_{format} = (Obj, Fbx, Collada, USDZ), \quad (2.1)$$

де *Obj*, *Fbx*, *Collada*, *USDZ*— поширені формати представлення тривимірних моделей описані в розділі 1.2.

Отже, змінними є формати збереження тривимірної моделі користувача, а їхня кількість рівна 4.

Першим критерієм задачі є розмір файлу, що залежить від формату збереження даних про тривимірне зображення. Цільова функція даного критерія позначається, як, $f_1(\bar{x})$, де вектор змінних має розмірність 4.

$$\bar{x} = (x_1, x_2, x_3, x_4). \quad (2.2)$$

Під час розв'язання задачі БКО [80], [81] необхідно мінімізувати цільову функцію

$$\min f_1(\bar{x}), \quad (2.3)$$

де x_1 — розмір файлу у форматі *Obj*, x_2 — розмір файлу у форматі *Fbx*, x_3 — розмір файлу у форматі *Collada*, x_4 — розмір файлу у форматі *USDZ*.

Другим важливим критерієм, при виборі оптимального формату є підтримуваність формату операційною системою, у випадку цього дисертаційного дослідження: iOS. Цільова функція другого критерія позначається через $f_2(\bar{x})$. Задана функція може приймати лишень два значення 0 та 1. У випадку підтримованості формату на рівні ОС — 1, в іншому випадку — 0. Цей частковий критерій необхідно максимізувати.

$$\max f_2(\bar{x}). \quad (2.4)$$

Наступним частковим критерієм БКО вибору формату збереження тривимірного зображення користувача є час відкривання (завантаження) файлу у виконувану програму. Цільова функція, що відображає цей частковий критерій позначається $f_3(\bar{x})$. У цьому випадку, чим менший час завантаження файлу з тривимірним зображенням тим краще для швидкодії роботи системи. Тому, будемо шукати формат, що забезпечує мінімальний час завантаження,

відповідно.

$$\min f_3(\bar{x}). \quad (2.5)$$

Четвертим частковим критерієм, який необхідно врахувати в процесі вибору формату — підтримуваність додаткових функцій, а саме:

- Функція формування наближеної сітки.
- Представлення точної сітки.
- Підтримуваність кольору та текстур.
- Підтримуваність накладання текстур.
- Збереження інформації про сцену.
- Підтримуваність анімації.
- Документованість.

Усього сім додаткових функцій для кожного формату. Відповідну цільову функцію позначаємо $f_4(\bar{x})$ і при розв'язанні задачі БКО буде шукатися її максимум.

$$\max f_4(\bar{x}). \quad (2.6)$$

Водночас, значення одиниці відображає підтримуваність обраним форматом однієї з функцій, а значення — 0, якщо вибрану функцію формат не підтримує. Відповідно, сумуючи всі значення, максимальне значення може бути рівним семи.

Тому, у загальному випадку для вибору оптимального варіанту формату збереження тривимірного зображення користувача необхідно розв'язати таку задачу БКО:

$$\text{Opt } F(x) = \{\min f_1(\bar{x}), \max f_2(\bar{x}), \min f_3(\bar{x}), \max f_4(\bar{x})\}. \quad (2.7)$$

Під час розв'язання задачі (2.7) необхідно провести нормування критеріїв щоби звести задачу до безрозмірного виду, що дасть змогу, у кінцевому випадку, виконати порівняння рішень та вибрати оптимальне значення.

Для другої $f_2(\bar{x})$ та четвертої $f_4(\bar{x})$ цільових функцій нормування виконано таким чином:

$$f_{n,2}(\bar{x}) = \frac{f_2(\bar{x})}{f_2^{max}(\bar{x})}, f_{n,4}(\bar{x}) = \frac{f_4(\bar{x})}{f_4^{max}(\bar{x})}, \quad (2.8)$$

де $f_{n,2}(\bar{x}), f_{n,4}(\bar{x})$ – нормовані значення 2-ої та 4-ої цільових функцій, які можуть приймати безрозмірні значення в діапазоні від 0 до 1; $f_2^{max} \bar{x}$ та $f_4^{max} \bar{x}$ — максимальні значення оцінки для 2-ої та 4-ої цільових функцій.

Не важко переконатися, що:

$$f_2^{max}(\bar{x}) = 1, f_4^{max}(\bar{x}) = 7. \quad (2.9)$$

Для першої та третьої частин цільової функції використовується такий вираз для нормування:

$$f_{n,1}(\bar{x}) = \frac{f_1(\bar{x}) - f_1^{min}(\bar{x})}{f_1^{max}(\bar{x}) - f_1^{min}(\bar{x})}, f_{n,3}(\bar{x}) = \frac{f_3(\bar{x}) - f_3^{min}(\bar{x})}{f_3^{max}(\bar{x}) - f_3^{min}(\bar{x})}, \quad (2.10)$$

де $f_1^{min}(\bar{x})$ та $f_3^{min}(\bar{x})$ — мінімальні значення частинних критеріїв для 1-ої та 3-ої цільових функцій.

Відповідно, узагальнена цільова функція (2.7) з урахуванням нормування матиме такий вигляд:

$$Opt F(\bar{x}) = \{min f_{1,n}(\bar{x}), max f_{2,n}(\bar{x}), min f_{3,n}(\bar{x}), max f_{4,n}(\bar{x})\}. \quad (2.11)$$

Для розв'язання задачі БКО (2.11) використана мультиплікативна згортка [82]. Вибір цього різновиду згортки зумовлений труднощами щодо визначення точного значення вагових коефіцієнтів відносної важливості часткових критеріїв. Оскільки рішення з використанням цієї згортки володіє низькою чутливістю до значень вагових коефіцієнтів.

Для представлення виразу (2.11) у вигляді, який зручно використати в процесі розв'язування багатокритеріальної задачі з використанням мультиплікативної згортки:

$$F(\bar{x}) = \prod_{i=1}^n l_i f_{i,n}(\bar{x}) \rightarrow \max, \quad (2.12)$$

де n — кількістю об'єктів часткових критеріїв; l_i — ваговий коефіцієнт i -го часткового критерію.

Для визначення значень вагових коефіцієнтів відносної важливості часткових критеріїв використаємо метод приписування балів:

$$C_i = \frac{\sum_{k=1}^l H_i^{(k)}}{\sum_{k=1}^n \sum_{k=1}^l H_i^{(k)}}, i = \overline{1, n}, \quad (2.13)$$

де C_i — вага визначення i -го критерію на основі оцінок k -го експерта, n — кількість часткових критеріїв, де 1 — значення найважливішого критерію, а n — критерія з найменшим значенням важливості, $H_i^{(k)}$ — параметри ваги i -го критерію на основі оцінок k -го експерта.

Алгоритм розв'язання задачі (2.12) з використанням мультиплікативної згортки включає такі кроки:

Крок 1. Визначення частинних критеріїв оптимізації, вирази (2.3 — 2.6).

Крок 2. Нормування частинних критеріїв оптимізації, вирази (2.8 — 2.10).

Крок 3. Визначення значень вагових коефіцієнтів часткових критеріїв.

Крок 4. Обчислення числових значень кожного часткового критерію.

Крок 5. Розв'язання цільової функції, вираз (2.12).

Крок 6. Отримання результату оптимізації (оптимальний варіант розв'язання задачі).

В результаті розв'язання багатокритеріальної задачі визначено найбільш оптимальний формат файлу, а саме — USDZ. Результати отримано за допомогою математичних методів, описаних вище, що включають зважені критерії розміру файлу, підтримуваність операційної системи, часу завантаження файлу та наявності додаткових функціональних можливостей. Зокрема, USDZ продемонстрував найкращі показники з погляду мінімізації розміру файлу та часу завантаження, а також максимальної підтримованості

операційної системи та додаткових функцій, задовольнивши відповідні критеріальні функції f_1 , f_2 , f_3 та f_4 .

Отже, нормалізовані та зважені значення для USDZ перевершили значення інших форматів у розрахунку мультиплікативної згортки, що обґрунтовує вибір USDZ, як оптимального формату для зберігання 3D-моделей користувача в середовищі iOS.

2.3 Розроблення методу синтезу тривимірного зображення користувача на основі базових моделей

Для забезпечення досягнення цілей, окреслених у дисертаційній роботі, особливо з урахуванням етичних аспектів та необхідності модифікації зовнішнього вигляду тривимірного аватара, розроблено метод синтезу, що базується на попередньо розробленій, базовій 3D-моделі. Цей метод спирається на попередньо визначену 3D-модель, як основу, що дає змогу вносити подальші модифікації. Цей метод враховує конфіденційність та етичні міркування, притаманні створенню високоточних персоналізованих аватарів. Розробка базової моделі включає аналіз основних характеристик обличчя, таких як контури носа, рота та очей, і створення змішаних форм, що відповідають цим атрибутам.[83]. Отримана тривимірна модель може бути доопрацьована за допомогою коригування змішаних форм, поки не буде досягнутий бажаний рівень подібності (розділ 2.4).

Метод синтезу тривимірного зображення користувача, основні етапи якого зображено на Рис 2.1, передбачає використання набору змішаних форм, що математично представлено формулою 1.3, для відображення виразу обличчя користувача.

Такий підхід має перевагу в порівнянні з наявними підходами в галузі, оскільки він дає змогу користувачу взаємодіяти з 3D-моделлю, тим самим персоналізуючи вираз обличчя аватара під вираз обличчя користувача. Процес взаємодії користувача із цифровим аватаром за допомогою проекції виразу

свого обличчя на тривимірну модель за допомогою змішаних форм розглядається, як можливість застосування технології доповненої реальності в програмних застосунках. Це дає змогу користувачеві маніпулювати і змінювати 3D-аватар у контексті свого оточення. Отже, використання змішаних форм у розробленому методі не лише задовольняє вимоги щодо готовності до взаємодії цифрового аватара та користувача, але й відповідає цілям забезпечення методу синтезу тривимірного зображення користувача та доповненої реальності, зазначеним у Розділі 1 дисертаційного дослідження.



Рисунок 2.1 — Схематичне представлення методу синтезу тривимірного зображення користувача

Розроблений метод передбачає, що базова тривимірна модель розробляється в засобах тривимірного моделювання. Оскільки в подальшому модель буде використовуватися в мобільній системі, то задля забезпечення оптимізації геометрична сітка не має містити надто велику кількість вершин та полігонів.

Етап моделювання, який включає розроблений метод, передбачає розроблення змішаних форм для відображення виразу обличчя користувача. Ця техніка також відома, як фігурні ключі або морфінг-цілі використовується в 3D-комп'ютерній графіці для створення різноманітної анімації, а також для деформації тривимірного обличчя. Змішування форм забезпечує створення базової сітки, яка потім змінюється або деформується за допомогою накладання різних фігур або об'єктів для синтезу різних виразів обличчя або міміки. Розроблений метод передбачає, що при синтезі базової моделі, аватар користувача моделюється з нейтральним виразом, а потім розробляється набір змішаних форм, щоб змінити необхідні ділянки обличчя під час створення різних виразів, таких як, усмішка чи насуплене обличчя. Змішуючи різні кількості кожної з форм, можна синтезувати широкий спектр цифрових виразів обличчя користувача.

Як уже зазначалося раніше в розділ 1.2 дисертаційного дослідження важливим чинником для оптимальної роботи з тривимірною графікою є і структура для зберігання 3D-даних. З огляду на це, базова 3D-модель разом зі змішаними формами для виразу обличчя користувача повинна зберігатися в найбільш оптимальному форматі даних. Алгоритмічна реалізація процесу структурування даних детально розглянута в наступних розділах дисертаційної роботи.

Фінальна фаза синтезу тривимірного зображення користувача охоплює взаємодію в режимі ДР між користувачем і 3D-моделлю. На цьому етапі використовуються методи та засоби технологій доповненої реальності, створюючи інтерактивний інтерфейс для взаємодії з користувачем. Особливості реалізації цього процесу описані в розділі 4.

Математично розроблений метод синтезу цифрового аватара можна представити у вигляді кортежу даних

$$Avatar = \langle 3D_{model}, M_{FEB} \rangle, \quad (2.14)$$

де $3D_{model}$ — слугує базовою геометрією аватара, визначаючи його вагову

структуру, M_{FEB} — набір змішаних форм, що дають змогу відобразити динамічний вираз обличчя, тим самим надаючи цифровому аватара реалістичності та виразності.

В загальному випадку метод синтезу можна представити як об'єднання базової моделі та набору змішаних форм

$$Avatar = 3D_{model} \cup M_{FEB}. \quad (2.15)$$

Величина набору змішаних форм суттєво впливає, як на виразність аватара, так і на загальний розмір моделі, що робить визначення оптимальної кількості форм важливим аспектом процесу синтезу моделі.

Поширені підходи в галузі тривимірної графіки [57], [84]–[87] використовують від 27 до 300 змішаних форм для забезпечення варіативності відображення виразу обличчя людини.

Для забезпечення якомога меншого розміру файлу тривимірної моделі в дисертаційній роботі обрано набір із 52 змішаних форми для представлення виразу обличчя користувача. Такий набір успішно інкапсулює широкий спектр виразів обличчя, оптимально зберігаючи водночас мінімальний розмір моделі на диску. Ваговий коефіцієнт кожної змішаної форми може мати значення:

$$w \in \{x \mid x = 0, 0.1, 0.2, \dots, 1\}, \quad (2.16)$$

Оскільки кожна змішана форма може бути змінена незалежно, загальна кількість потенційних виразів тривимірного обличчя користувача обчислюється за допомогою формули:

$$\overline{A_n^k} = n^k, \quad (2.17)$$

де n — представляє 11 вагових станів кожної з k — 52 змішаних форм. Ця кількість (11^{52}) демонструє широку універсальність і виразність, якої можна досягти за допомогою відносно невеликого набору змішаних форм, забезпечуючи всебічну й детальну передачу широкого спектру виразів обличчя.

Отже, розроблений метод синтезу 3D-зображення користувача спирається на формат USDZ, як оптимальний формат для представлення 3D-моделей з урахуванням специфічних вимог та обмежень, притаманних мобільним пристроям. Крім того, розроблений метод включає в базову модель обличчя набір із 52 фігур накладання для максимізації виразності обличчя цифрового зображення при збереженні оптимального розміру файлу, що є критично важливим для продуктивності мобільних пристроїв.

2.4 Побудова алгоритмів реалізації методу синтезу тривимірного зображення користувача на основі базових моделей

Алгоритм роботи розробленого в попередньому розділі методу синтезу тривимірного аватара користувача з урахуванням вбудованих методів і засобів в ОС iOS зображений на Рис. 2.2 і складається з таких основних кроків:

Крок 1. Імпортування базової тривимірної моделі, у форматі USDZ, в iOS систему.

Крок 2. Синтез об'єкту SCNNode, що представляє тривимірну модель (зчитування моделі в підтримуваному форматі USDZ також відбувається на рівні системи й не вимагає додаткових налаштувань).

Крок 3. Рендеринг (відображення) об'єкту SCNNode за допомогою вбудованого в систему ігрового рушія SceneKit.

Крок 4. Налаштування вагових коефіцієнтів змішаних форм особливостей обличчя (носу, очей і т. ін.) до бажаного рівня користувача. Оскільки модифікація моделі проводилася з урахуванням наявності змішаних форм а ігровий рушій SceneKit підтримує дану технологію, форми можуть бути знайдені для подальшого налаштування в об'єкті SCNNode. Вагові коефіцієнти в ігрових рушіях зазвичай інтерполюються в межах значень від 0 до 1. Більш детально даний метод описаний у наступному розділі.

Крок 5. Отримання даних вагових коефіцієнтів виразу обличчя

користувача від фреймворку ARKit для роботи з ДР на iOS.

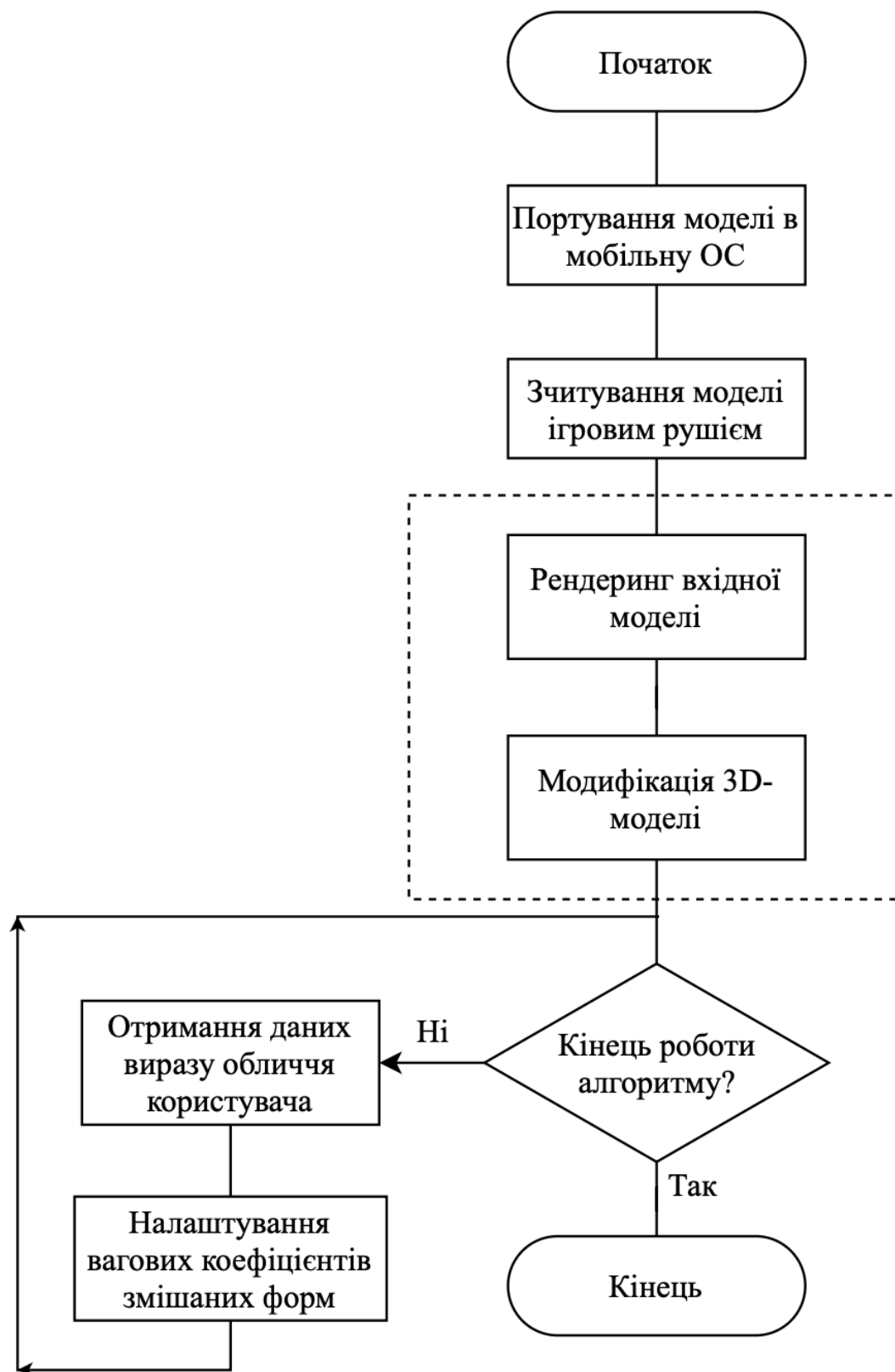


Рисунок 2.2 — Алгоритм роботи системи синтезу тривимірного аватара користувача на мобільній платформі

Отримані коефіцієнти застосовуються для змішаних форм розроблених

на етапі їх моделювання. Цей етап забезпечує інтерактивну взаємодію між користувачем та синтезованою моделлю в режимі реального часу.

Розроблений алгоритм передбачає використання вбудованих засобів iOS для розпізнавання обличчя, що дає змогу визначати вираз обличчя користувача. Ці дані виразу обличчя зіставляються із заздалегідь визначеним набором із 52 фігур (див. розділ 2.3), вбудованих у 3D-модель аватара.

Дані виразу обличчя включають у себе такі атрибути, як ступінь відкритості лівого/правого ока та ступінь стиснення губ. Детальний опис цих геометричних фігур і відповідних їм форм змішування наведено в Таблицях 2.1 — 2.8.

Таблиця 2.1

Перелік змішаних форм моделі для синтезу виразу брів обличчя

Назва змішаної форми	Опис
browDown_L	Опускання лівої брови
browDown_R	Опускання правої брови
browInnerUp	Підняття внутрішніх брів
browOuterUp_L	Підняття зовнішньої лівої брови
browOuterUp_R	Підняття зовнішньої правої брови

Таблиця 2.2

Перелік змішаних форм моделі для синтезу виразу щелепи обличчя

Назва змішаної форми	Опис
jawForward	Рух щелепи вперед
jawLeft	Рух щелепи вліво
jawOpen	Відкривання щелепи
jawRight	Рух щелепи вправо

Таблиця 2.3

Перелік змішаних форм моделі для синтезу виразу очей обличчя 1

Назва змішаної форми	Опис
eyeBlink_L	Моргання лівим оком
eyeBlink_R	Моргання правим оком
eyeLookDown_L	Погляд вниз лівим оком
eyeLookDown_R	Погляд вниз правим оком
eyeLookIn_L	Погляд всередину лівим оком
eyeLookIn_R	Погляд всередину правим оком
eyeLookOut_L	Погляд назовні лівим оком
eyeLookOut_R	Погляд назовні правим оком

Таке узгодження з можливостями розпізнавання системи iOS забезпечує оптимальне представлення виразності обличчя в аватарах, ілюструючи здатність розробленого методу інтегруватися з наявними технологіями в мобільних платформах для підвищення інтерактивності синтезу аватарів.

Таблиця 2.4

Перелік змішаних форм моделі для синтезу виразу очей обличчя 2

Назва змішаної форми	Опис
eyeLookUp_L	Погляд вгору лівим оком
eyeLookUp_R	Погляд вгору правим оком
eyeSquint_L	Прищурювання лівого ока
eyeSquint_R	Прищурювання правого ока
eyeWide_L	Розширення лівого ока
eyeWide_R	Розширення правого ока

Таблиця 2.5

Перелік змішаних форм моделі для синтезу виразу носа

Назва змішаної форми	Опис
noseSneer_L	Витягування лівої половини носа
noseSneer_R	Випинання правої половини носа
tongueOut	Висування язика

Таблиця 2.6

Перелік змішаних форм моделі для синтезу виразу щік обличчя

Назва змішаної форми	Опис
cheekPuff	Надування щік
cheekSquint_L	Прищурювання лівої щоки
cheekSquint_R	Прищурювання правої щоки

Таблиці з змішаними формами рота та губ (Таблиця 2.7 – 2.8) найбільші, оскільки аватари в цих ділянках вимагають детального представлення, щоб точно відображати емоції користувача.

Таблиця 2.7

Перелік змішаних форм моделі для синтезу виразу рота та губ 1

Назва змішаної форми	Опис
mouthClose	Закриття рота
mouthDimple_L	Переміщення лівого кута рота в сторону
mouthDimple_R	Переміщення правого кута рота в сторону
mouthFrown_L	Переміщення лівого кута рота вниз
mouthFrown_R	Переміщення правого кута рота вниз
mouthFunnel	Скорочення обох губ до відкритої форми

Перелік змішаних форм моделі для синтезу виразу рота та губ 2

Назва змішаної форми	Опис
mouthStretch_L	Розтягування лівої частини рота
mouthStretch_R	Розтягування правої частини рота
mouthUpperUp_L	Переміщення верхньої губи вгору з лівого боку
mouthUpperUp_R	Переміщення верхньої губи вгору з правого боку
mouthPress_L	Стиснення нижньої губи вгору з лівого боку
mouthPress_R	Стиснення нижньої губи вгору з правого боку
mouthPucker	Стискання і розтискання обох зімкнутих губ
mouthRight	Переміщення обох губ разом вправо
mouthRollLower	Закочування нижньої губи
mouthRollUpper	Розкочування верхньої губи
mouthShrugLower	Переміщення нижньої губи назовні
mouthShrugUpper	Переміщення верхньої губи назовні
mouthSmile_L	Усмішка лівою частиною рота
mouthSmile_R	Усмішка правою стороною рота
mouthLeft	Переміщення обох губ разом вліво
mouthLowerDown_L	Переміщення нижньої губи вниз із лівого боку
mouthLowerDown_R	Переміщення нижньої губи вниз із правого боку

2.5 Розроблення методу морфінгу тривимірного зображення користувача

Для досягнення можливості конфігурації синтезованого 3D-зображення

користувача, у дисертаційній роботі розроблено метод морфінгу, що забезпечує модифікацію геометричних 3D-поверхонь цифрового аватара користувача. Цей метод використовує унікально розроблені форми вигинів, що дає змогу параметрично змінювати 3D-модель для маніпулювання окремими рисами обличчя, зберігаючи, водночас, загальні пропорції [44], [88].

Розроблений метод базується на поєднанні готової (базової) 3D-моделі та її програмною адаптацією. Такий підхід відрізняється від наявних наукових досліджень, які покладаються виключно на повністю програмні реалізації і як результат дає користувачу можливість коригування синтезованої моделі.

Розроблений метод реалізується з використанням алгоритму, що зображено на Рис. 2.3 і включає попереднє створення набору змішаних форм для представлення особливостей обличчя людини. Ця підхід полегшує інкапсуляцію широкого спектру геометричних комбінацій у тривимірну модель, зберігаючи, водночас, компактність вихідної моделі, що робить її оптимізованою для інтеграції в мобільні платформи. Використовуючи алгоритми обчислювальної геометрії, такий підхід дає змогу виконувати широкий спектр модифікацій обличчя без необхідності збільшення складності або розміру базової моделі. Це так само забезпечує оптимальну продуктивність у мобільних обчислювальних середовищах.

Набір змішаних форм особливостей обличчя представлено формулою:

$$L_{model} = \sum_{i \in F} w_i m_i, \quad (2.18)$$

де F — є набором, що містить усі форми, w_i — ваговий коефіцієнт налаштування конкретної змішаної форми, m_i — геометричне представлення кожної розробленої форми обличчя користувача, i — загальна кількість геометричних форм.

Оскільки налаштування вагових коефіцієнтів однієї форми призводить до зміни геометричної сітки всієї 3D-моделі, то дана формула представлена сумою форм так, як видозміна одного з них буде геометрично впливати на всі інші наявні геометричні форми.

Варто зазначити, що розроблений метод призначений для довільного вибору геометричних форм, забезпечуючи надійну основу, яка не накладає обмежень на вибір або кількість включених форм. Можливість розширення набору геометричних форм не обмежується початковими етапами розробки, а є невід’ємною властивістю потенційної системи, яка може бути використана в будь-який момент життєвого циклу програмного забезпечення. Отже, додавання нових морфів може здійснюватися динамічно й адаптивно, щоб відповідати зростаючим потребам користувачів або технологічним досягненням.

Важливим аспектом функції розширюваності є уникнення негативного впливу на загальну логіку реалізації системи. Будь-яке розширення в наборі форм ізольоване від основної операційної логіки, зберігаючи цілісність і стабільність функціональності системи, що реалізовуватиме розроблений метод.

Процес морфінгу 3D-зображення є невід’ємною частиною методу синтезу аватара користувача, описаного у розділі 2.2. Суть цього підходу полягає в об’єднанні двох різних елементів конвеєра генерації зображень — відображення виразу обличчя та його одночасна модифікація.

Для того, щоб визначити створення 3D-моделі з використанням двох різних наборів форм накладання для міміки та модифікацій обличчя, позначимо базову модель аватара як A . Ми можемо визначити два різні набори форм накладання:

- $E = \{e_1, e_2, \dots, e_n\}$ для виразів обличчя.
- $P = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$ для модифікацій обличчя.

Кожна форма змішування в цих наборах являє собою окремий вектор переміщень, який змінює форму базової моделі. Щоб застосувати ці форми, ми вводимо два вагові вектори:

- $W_e = \{w_{e1}, w_{e2}, \dots, w_{en}\}$.
- $W = \{w_{p1}, w_{p2}, \dots, w_{pm}\}$.

Кожен із цих векторів контролює інтенсивність трансформації відповідної форми.

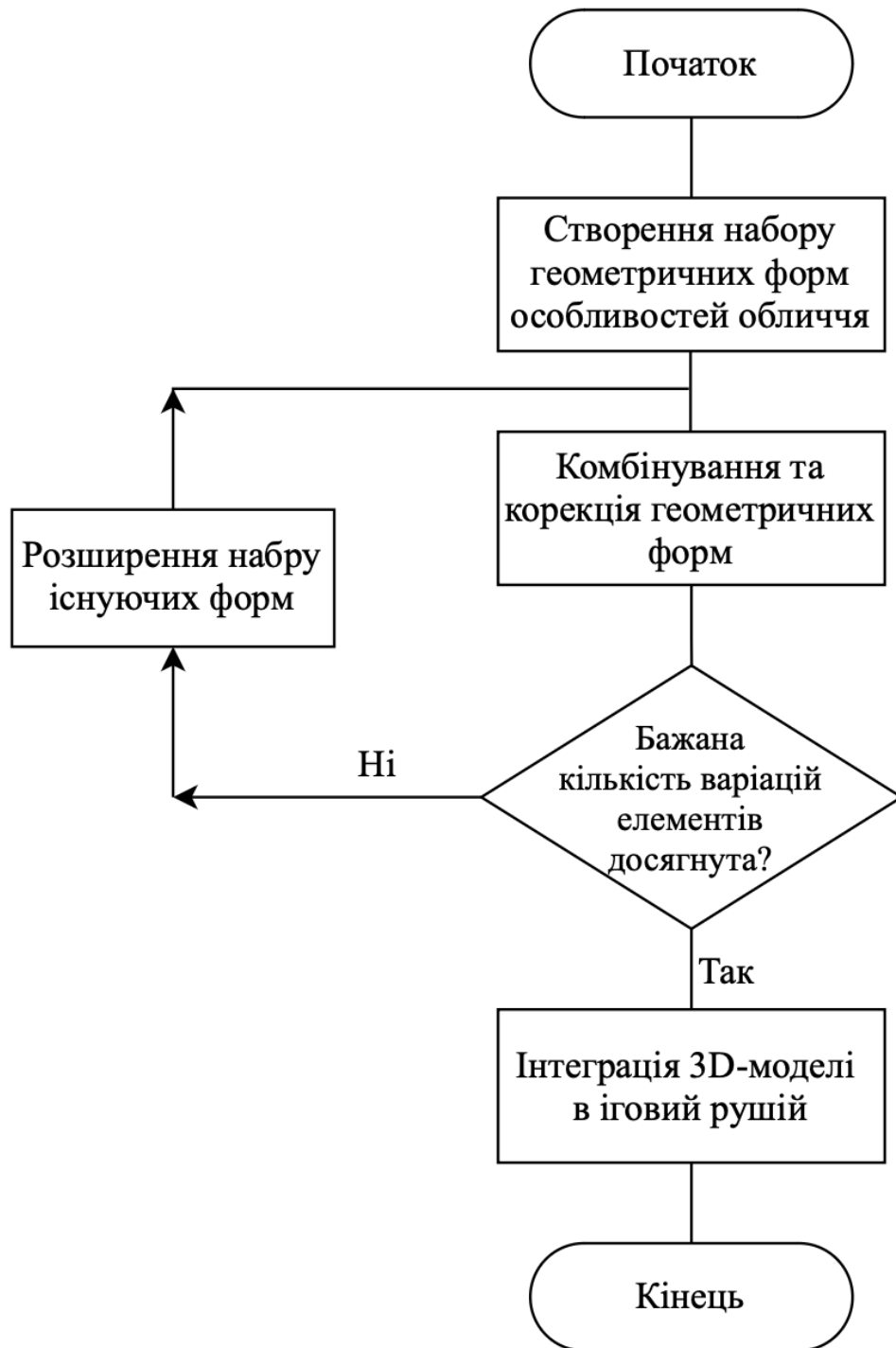


Рисунок 2.3 — Блок-схема методу морфінгу 3D-зображення обличчя користувача

Створення 3D-моделі можна змоделювати, як лінійну комбінацію базової моделі A і застосованих змішаних форм, що призводить до такого рівняння:

$$A' = A + \sum (W_e[i] * E[i]) + \sum (W_p[j] * P[j]), \quad (2.19)$$

для $i = \text{від } 1 \text{ до } n$ (форми накладання виразу обличчя) та $j = \text{від } 1 \text{ до } m$ (форми накладання модифікацій обличчя). Тут A' позначає кінцеву 3D-модель, тобто цифровий аватар.

Рівняння (2.19) описує комбінацію виразів обличчя та модифікацій у єдиній математичній структурі, демонструючи, поєднання змішаних форм для створення та редагування 3D-моделей.

У наступних розділах імплементації методу морфінгу 3D-зображень обличчя користувача, більш детально описано програмну реалізацію, що передбачає використання та створення унікальних геометричних форм конфігурацій різних елементів тривимірного обличчя, таких, як ніс, очі, губи, щоки, форма брів та підборіддя для демонстрації результатів дисертаційної роботи.

2.6 Особливості алгоритмічної реалізації методу морфінгу тривимірного зображення користувача.

Алгоритм реалізації методу морфінгу 3D-зображення обличчя користувача з урахуванням вбудованих методів і засобів у мобільну ОС iOS зображений на Рис. 2.4 і складається з таких кроків:

Крок 1. Портування тривимірної моделі на операційну систему iOS.

Крок 2. Зчитування тривимірної моделі у форматі USDZ ігровим рушієм SceneKit та створення об'єкту представлення моделі в систему типу SCNNode.

Крок 3. Пошук усіх наявних змішаних форм тривимірної моделі. Форми, що розроблені на етапі моделювання та відповідають за налаштування особливостей обличчя користувача (форми носа, очей і т. ін.) групуються в набори даних для налаштування в наступних кроках.

Крок 4. Рендеринг об'єкту SCNNode тривимірної моделі за допомогою ігрового рушія SceneKit.

Крок 5. Конфігурування агрегованих наборів змішаних форм за

допомогою модифікації вагових коефіцієнтів до моменту отримання необхідної точності відображення цифрового аватара.

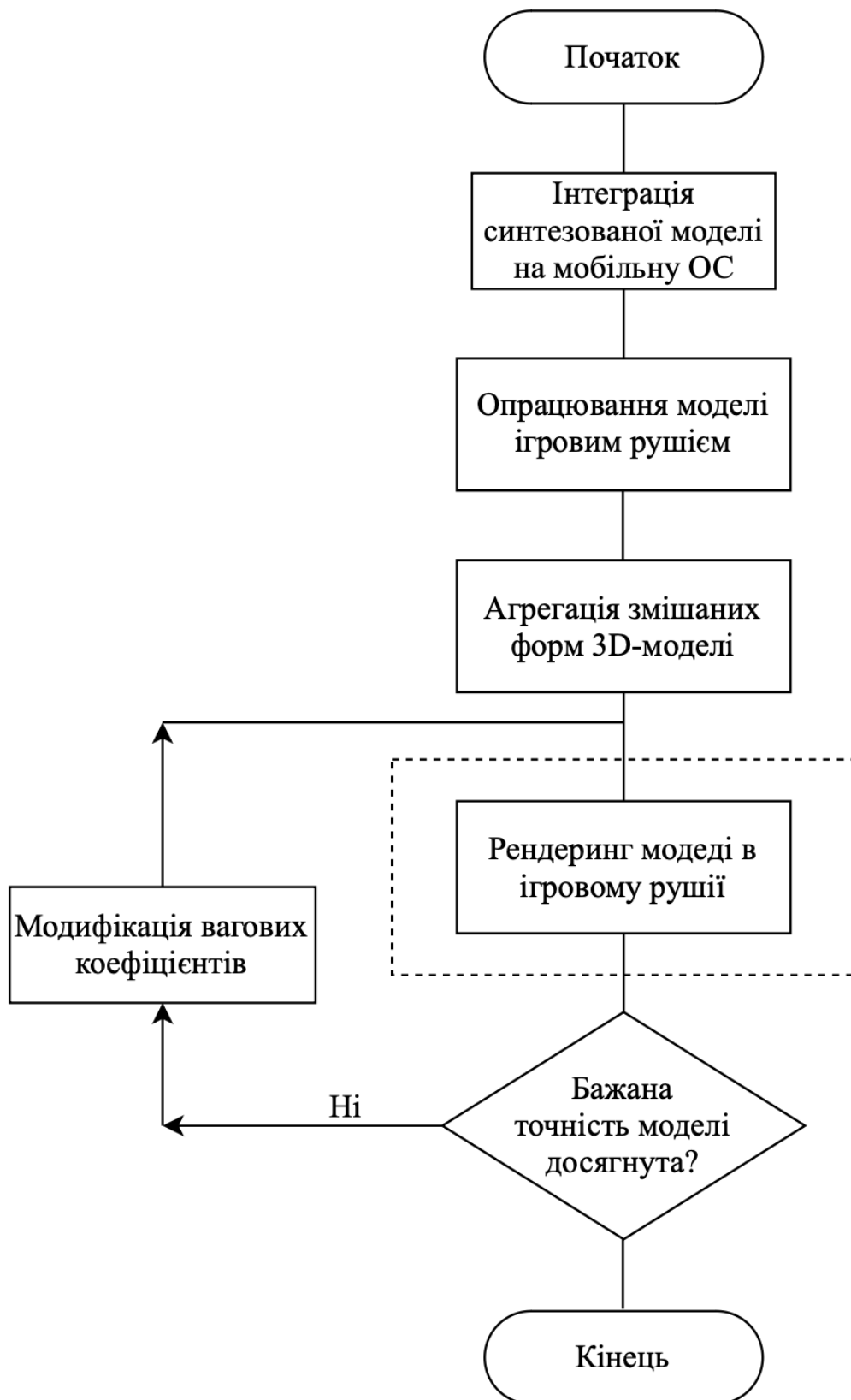


Рисунок 2.4 — Алгоритм роботи методу морфінгу 3D-зображення обличчя користувача

Розроблений алгоритм передбачає інтеграцію технологій доповненої та/чи віртуальної реальності, використовуючи процес рендерингу, що реалізується за допомогою ігрового рушія SceneKit. Інтеграція цього рушія із системною бібліотекою ARKit, призначеною для роботи застосунків, що використовують технології ДР/ВР, забезпечує можливість візуалізації та маніпуляції синтезованою тривимірною моделлю в реальному світі.

Розроблений алгоритм (див. Рис. 2.4) використовує особливості формату USDZ, що забезпечує низку переваг для обчислювальної та інформаційної ефективності системи. Формат USDZ інкапсулює всі дані й ресурси, необхідні для представлення 3D-сцени, в одному файлі, що дає змогу спростити управління змішаними формами та пов'язаними з ними ресурсами.

Також, використання USDZ у розробленому алгоритмі є особливо вигідним завдяки його сумісності з програмним та апаратним забезпеченням для роботи з 3D-графікою в мобільній ОС iOS.

Окрім того, використання формату USDZ у розробленому алгоритмі сприяло досягненню поставлених у дисертаційній роботі цілей масштабованості та оптимізації продуктивності системи. Використовуючи переваги формату USDZ, зокрема його підтримуваність стиснення даних без втрат, алгоритм ефективно зберігає геометричні дані про тривимірну модель разом із наборами змішаних форм. Масштабованість забезпечується здатністю зберігати в USDZ-файлі великі набори змішаних форм без погіршення продуктивності мобільного застосунку.

Висновки до розділу 2

Сформовано вимоги до методу синтезу аватара користувача в мобільних операційних системах, а саме: можливість модифікації, як поверхонь зовнішнього вигляду, так і геометричної сітки моделі; сумісність та здатність до інтеграції з технологіями ДР/ВР; забезпечення інтерактивної взаємодії з користувачем; оптимальна продуктивність рендерингу на мобільних

пристроях, забезпечення високої частоти кадрів для взаємодії та модифікації аватара в реальному часі; ефективне використання обмеженого дискового простору, доступного на мобільному пристрої.

Проаналізовано та визначено за допомогою вирішення задачі БКО, що формат USDZ, завдяки мінімізованому розміру файлу, розширеній підтримованості ОС, зменшеному часу завантаження та розширеним можливостям, є оптимальним вибором для зберігання 3D-моделей користувача в мобільній ОС iOS.

Уперше розроблено метод синтезу 3D-моделі аватара користувача з використанням формату USDZ, який має на меті значне зменшення розміру 3D-моделі проти наявних рішень галузі. Розроблений метод передбачає використання змішаних форм для можливості відтворення різноманітних виразів обличчя користувача. Описано набір із 52 змішаних форм для різних виразів обличчя, що використовуються при синтезі зображення.

Отримав подальший розвиток метод морфінгу 3D-зображення користувача у форматі USDZ за допомогою заданих форм змішування. Цей метод забезпечує складні зміни в структурі 3D-зображення, даючи змогу користувачам досягати бажаних візуальних результатів а також змінювати геометричні форми окремих ділянок аватара користувача.

Розроблено алгоритми, що описують реалізацію вищезазначених методів з урахуванням вбудованих у мобільну платформу iOS методів та засобів.

Розділ 3. Розроблення методу шейдерного зафарбовування та методу синтезу текстур тривимірного зображення користувача

3.1 Розроблення методу шейдерного зафарбовування тривимірного зображення користувача

Для досягнення поставлених цілей дисертаційного дослідження розроблено метод шейдерного зафарбовування 3D-зображень користувача в режимі реального часу. Зафарбовування тривимірної моделі в реальному часі, яку традиційно не беруть до уваги на початковому етапі синтезу аватарів, додає додатковий вимір персоналізації аватарів. Розроблений метод дає змогу змінювати колірні атрибути тривимірного аватара в режимі реального часу, що, так само, забезпечує користувачам можливість виправляти потенційні неточності в синтезі текстур і налаштовувати аватари відповідно до своїх уподобань.

Розроблений метод розширює значну кількість досліджень у галузі 3D-візуалізації та текстурування, беручи свій початок у фундаментальній роботі Крейга Доннера у 2005 році [89], яка значно поглибила розуміння дифузії світла в багат шарових напівпрозорих матеріалах, у тому числі — шкіри людини.

Основна передумова розробленого методу зосереджена на відображенні в реальному часі аватарів у мобільних середовищах. Це вимагає балансу між обчислювальною потужністю мобільних пристроїв та необхідною якістю кінцевого продукту. Щоб досягти цього співвідношення, розроблений метод шейдерного зафарбовування поєднує дифузну карту в парі з фрагментним (піксельним) шейдером, який ґрунтується на застосуванні карти нерівності та карти нормалей [90]–[92], що схематично представлено на Рис. 3.1.

Зі схематичного зображення можна побачити, що спільний вплив дифузної карти й шейдера є ключовим у створенні результуючої текстури із

заданими користувачем кольорами. Після чого, текселі синтезованої текстури комбінуються з картами шорсткості та нормалі для створення більш рельєфного ефекту поверхні, що притаманно людській шкірі, як зображено на Рис. 3.2.

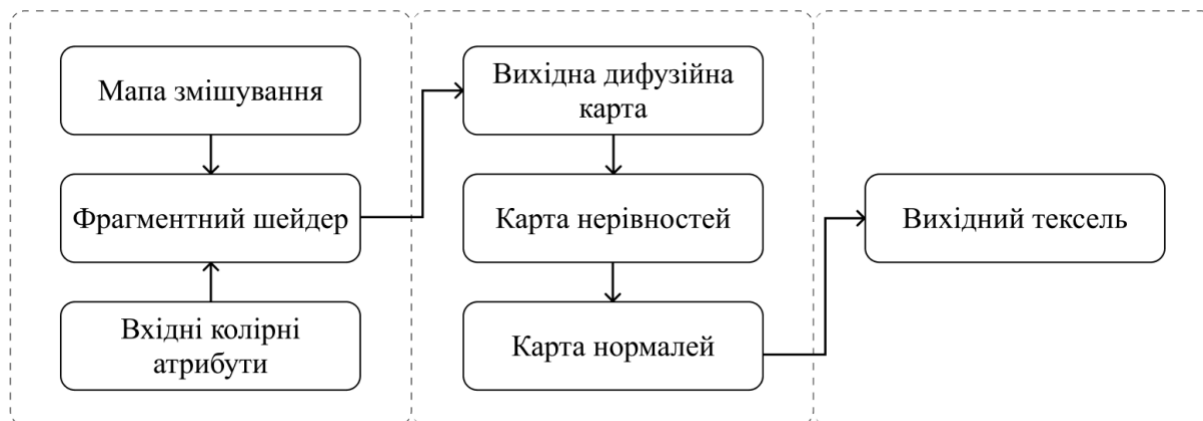


Рисунок 3.1 — Схема методу шейдерного зафарбовування поверхні аватара користувача

Іншим важливим компонентом розробленого методу, що доповнює використання шейдерів і дифузних карт, є застосування мап змішування також відомих як «blend maps» чи «splat maps» [93]. У сфері комп'ютерної графіки використання методів мап змішування переважно застосовується для візуалізації рельєфу [94], [95], зважаючи на їхню придатність для роботи з детальними ландшафтами, особливо великих ділянок простору [96], [97].

Реалізація техніки мап змішування в розробленому методі полегшує розфарбовування в реальному часі різноманітних атрибутів обличчя на аватарі, використовуючи одну дифузійну текстуру. Це реалізується за допомогою шейдера, який використовує інформацію про колір із мапи змішування, застосовуючи різні кольори до певних ділянок обличчя аватара. Головною перевагою такого підходу є його обчислювальна ефективність. Процес розфарбовування на основі шейдерів працює з однією текстурою, що дає змогу виконувати його за той самий час, який був би потрібен для однієї текстури, незалежно від варіацій кольору на обличчі.

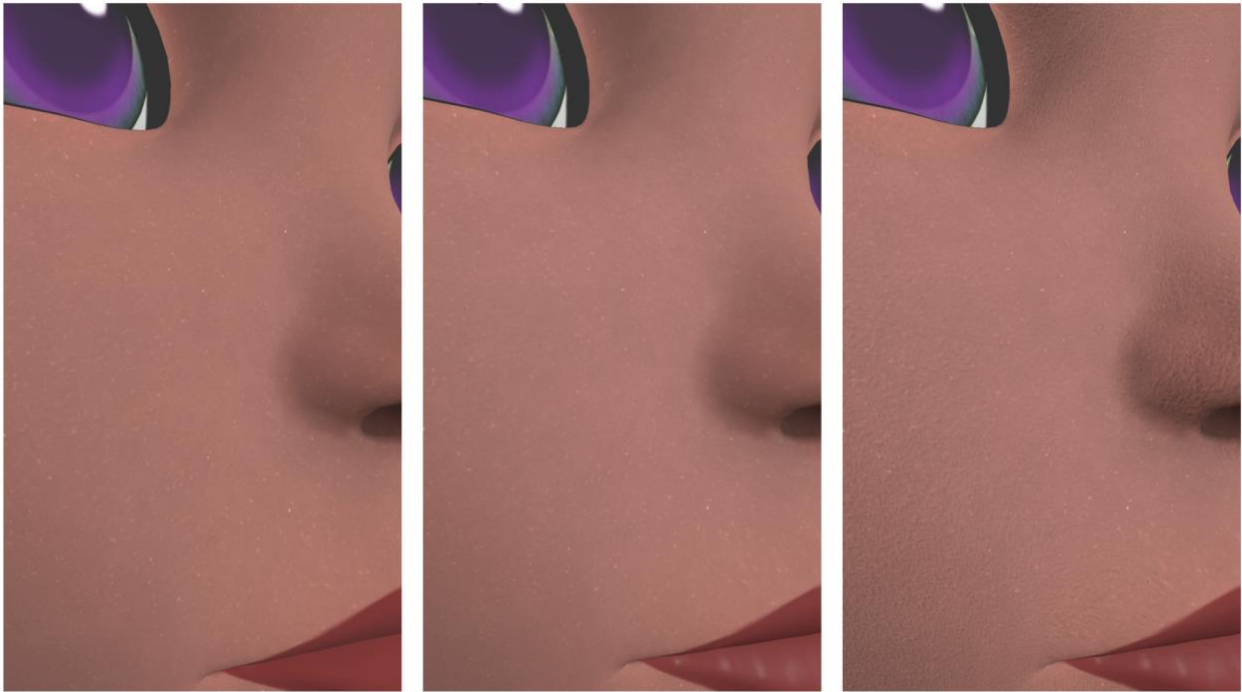


Рисунок 3.2 — Приклад накладання текстур, зліва на право: дифузійної карти, карти нерівностей, карти нормалей.

Традиційний підхід до налаштування кольору з використанням текстур можна представити формулою:

$$C(x, y) = C_1 * T_1(x, y) + C_2 * T_2(x, y) + C_3 * T_3(x, y) + C_4 * T_4(x, y), \quad (3.1)$$

де $C(x, y)$ — кінцевий колір текселя в позиції (x, y) , C_1, C_2, C_3, C_4 — значення заданих кольорів атрибутів обличчя а T_1, T_2, T_3, T_4 — різні текстури, застосовані для кожного окремого атрибута.

У розробленому методі модифікації атрибутів обличчя техніка мапи змішування використовує колірні канали (червоний — R , зелений — G , синій — B , альфа — A), для позначення окремих ділянок атрибутів 3D-моделі, як-от R — для виділення ділянки губ, G — для ділянки шкіри, B — для ділянки брів, A — для ділянки очей.

Отже, мапа змішування представлена у вигляді чотириканальної текстури:

$$B(x, y) = [R, G, B, A], \quad (3.2)$$

де (x, y) — координати текстури, а рівняння 3.1 можна модифікувати таким

чином:

$$C'(x, y) = RV_rT(x, y) + GV_gT(x, y) + BV_bT(x, y) + AV_aT(x, y), \quad (3.3)$$

де V_r, V_g, V_b, V_a — вектори кольору, що відповідають відповідним каналам мап змішування.

З огляду на те, що результуючий тексель 3D-моделі є функцією дифузної текстури, а також карти нормалей (N) та карти нерівностей (R), кінцева формула для відображення текселя модифікованого цим методом представлена виразом:

$$C''(x, y) = [RV_rT(x, y) + GV_gT(x, y) + BV_bT(x, y) + AV_aT(x, y)] * \\ * N(x, y) * R(x, y) \quad (3.3)$$

Отже, розроблений метод шейдерного зафарбовування, дає змогу досягти динамічної передачі кольору 3D-моделей та одночасно зберігаючи рельєф зображення під час рендерингу в реальному часі завдяки застосуванню техніки мап змішування в поєднанні з фрагментними шейдерами та багат шарових матеріалів.

Ще одна ключова перевага розробленого методу шейдерного зафарбовування, особливо щодо його реалізації на мобільних пристроях, полягає в ефективній оптимізації дискового простору. Завдяки використанню мап змішування, метод дає змогу вбудовувати до чотирьох унікальних кольорів в одну текстуру замість зберігання окремої текстури для кожного ділянки обличчя. Як наслідок, потреба в окремих текстурах зменшується, а отже, зменшуються вихідний розмір системи. Це дає змогу зменшити обсяг пам'яті для зберігання текстур в порівнянні з традиційним підходом, що передбачає використання окремої текстури для кожної бажаної ділянки зафарбовування тривимірної моделі.

Керуючи меншою кількістю текстур під час виконання фрагментного шейдера, розроблений метод також підвищує ефективність процесу рендерингу. У сфері рендерингу графіки в реальному часі складність і кількість операцій суттєво впливають на продуктивність конвеєра рендерингу. Метод шейдерного зафарбовування тривимірного зображення користувача,

мінімізуючи кількість залучених текстур, зменшує обчислювальне навантаження під час виконання фрагментного шейдера. Таке зменшення кількості текстур не лише прискорює роботу шейдерів, але і зменшує використання пропускну здатності пам'яті, що є критично важливим чинником для продуктивності рендерингу, особливо на мобільних пристроях з обмеженими ресурсами.

Ця оптимізація набуває особливого значення в мобільних пристроях, де обмежений обсяг пам'яті може бути стримуючим чинником. Інтеграція управління текстурою та кольором ілюструє ефективність та масштабованість розробленого методу, підтверджуючи його придатність для синтезу цифрових аватарів в умовах обмежених ресурсів.

3.2 Особливості алгоритмічної реалізації методу шейдерного зафарбовування тривимірного зображення користувача

Програмно-апаратна частина розробленого методу зафарбовування 3D-зображення користувача, схематично зображена на Рис. 3.3 та складається з таких компонентів:

- Попередньо розробленої 3D-моделі (Розділ 2.1).
- Набору базових текстур.
- Програмно-апаратної реалізації.

Програмна частину методу передбачає модифікацію дифузної текстури в реальному часі, яка потім поєднується з іншими текстурними шарами за допомогою вбудованого в мобільну ОС апаратного прискорювача Metal завдяки чому процес рендерингу тривимірної моделі залишається оптимізованим та ресурсоефективним для мобільних платформ.

Деякі елементи обличчя, як-от очі чи брови аватара, передбачають створення власних текстурних карт та шейдерів, які у свою чергу окремо програмно взаємодіють із фреймворком Metal. На відміну від наявних у галузі

підходах [89], [98], розроблений метод дає змогу змішувати кольори та генерувати градієнтні ефекти, забезпечуючи більш природний вигляд, ніж традиційні монохромні реалізації.

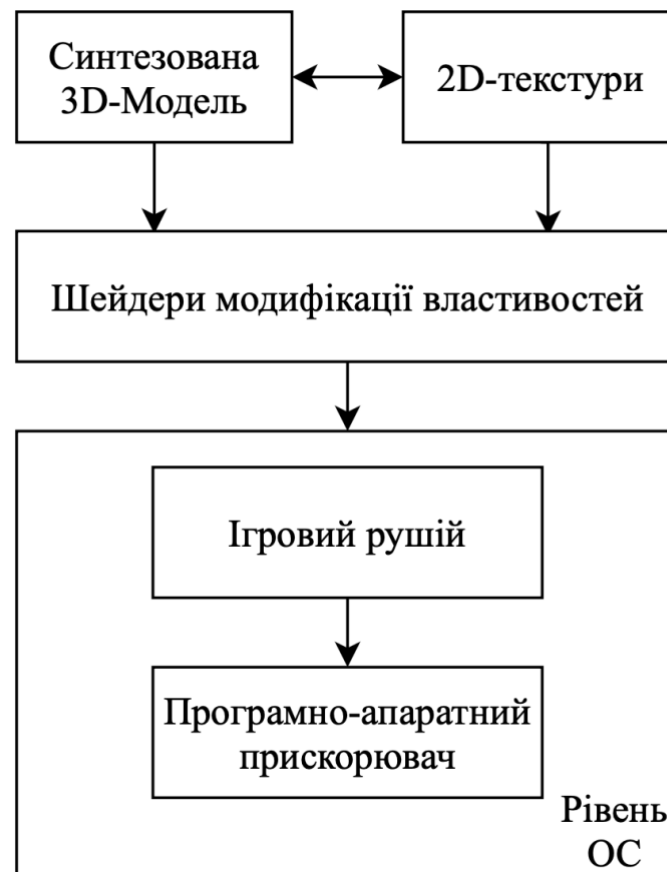


Рисунок 3.3 — Складові методу шейдерного зафарбовування 3D-зображення користувача

Ілюстрацією застосування розробленого методу в окремих ділянках цифрового аватара може слугувати розроблена в цьому дослідженні текстурна модель ока. Ця модель включає в себе ефект дзеркального відображення, що сприяє відтворенню глибини та підкреслює матеріальні атрибути 3D-моделі ока під час процесу рендерингу, як це продемонстровано на рис. 3.4.

Формула для опису градієнтної заливки рогівки складається з трьох складових і математично представляється у вигляді неперервної функції $G(p)$, де p — позиція градієнта, яка змінюється від 0 до 1.

$$G(p) = (1 - p) \cdot C_1 + p \cdot C_2, \text{ for } 0 \leq p < 0.5, \quad (3.4)$$

$$G(p) = (2 - 2 \cdot p) \cdot C_2 + (2 \cdot p - 1) \cdot C_3, \text{ for } 0.5 \leq p \leq 1, \quad (3.5)$$

де C_1 , C_2 і C_3 — вектори кольорів RGB, що представляють кольори градієнта, а $G(p)$ — вектор кольорів RGB у позиції градієнта. Функція $G(p)$ реалізована в шейдерній програмі, яка виконується на графічному процесорі, щоб створити безперервний і плавний градієнт по всій поверхні 3D-моделі ока. Значення p визначається за координатами попередньо створеної текстурної карти.

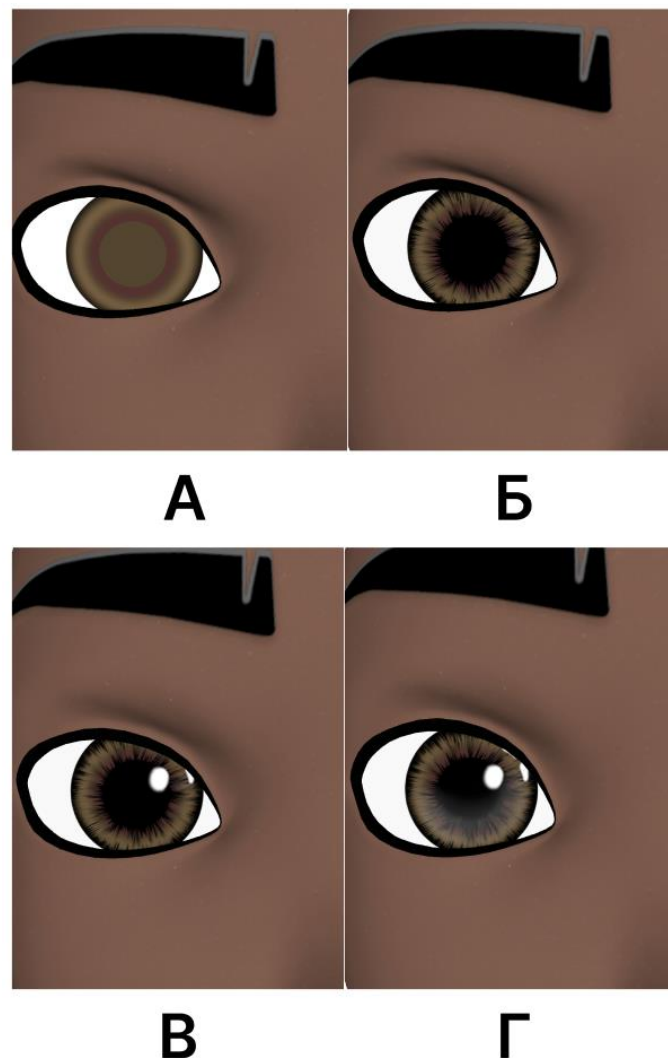


Рисунок 3.4 — Приклад нашарувань текстур під час рендерингу тривимірної моделі очей; А — без текстур, Б — змішування текстури рогівки, В, Г — змішування текстури з відблиском

Отже, розроблений метод, що використовує мапи змішування та попередньо визначені карти текстур у поєднанні з фрагментним шейдером, може адаптуватися до додаткових алгоритмів шейдерів, якщо це необхідно. Прикладом такої адаптивності може слугувати райдужна оболонка ока, де для

досягнення бажаних результатів у шейдер був інтегрований спеціальний алгоритм градієнту. Така розширюваність демонструє різноманітність і потенційну застосовність методу до багатьох сценаріїв у сфері синтезу 3D-аватарів.

Алгоритм роботи розробленого методу модифікації властивостей поверхонь тривимірних об'єктів, що використовує вбудований ігровий рушій SceneKit та фреймворк Metal на мобільній ОС iOS зображено на Рис. 3.5

Такий підхід дає змогу досягти ефективного та візуально привабливого результату під час відображення та інтерактивної взаємодії із синтезованою моделлю.

Наведений на Рис. 3.4 алгоритм описує такі кроки модифікації властивостей тривимірних поверхонь аватара:

Крок 1. Ініціалізація ігрового рушія SceneKit, який надає високорівневі можливості 3D-графіки, та фреймворку Metal для низькорівневого управління графічним процесора, що оптимізує продуктивність на пристроях iOS.

Крок 2. Завантаження попередньо розробленої 3D-моделі обличчя, що складається з різних наборів змішаних форм (Розділ 2), для відображення унікальних риси обличчя користувача.

Крок 3. Завантаження шейдерів модифікації властивостей обличчя. Цей крок передбачає налаштування та додавання в сцену всіх необхідних шарів текстур.

Крок 4. Завантаження шейдерів модифікації властивостей окремих елементів моделі аватара. Як і в попередньому кроці, на цьому етапі відбувається змішування текстур але використовується відмінні шейдери, як-от для модифікації кольорів ока.

Крок 5. Рендеринг усієї сцени, включно з моделями, текстурами та шейдерами використовуючи ігровий рушій SceneKit.

Крок 6. Керування сценою на високому рівні з використанням вбудованих методів ігрового рушія SceneKit та Metal для модифікації параметрів шейдерів.

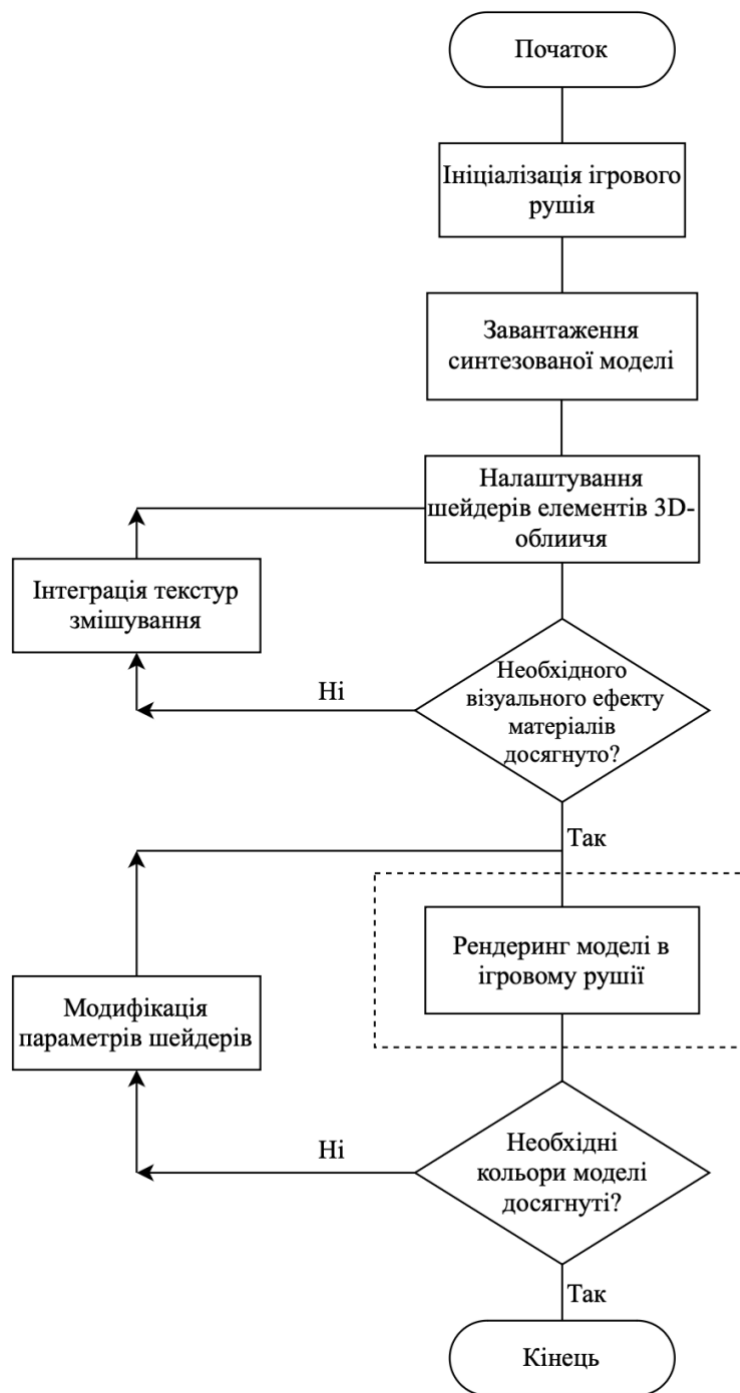


Рисунок 3.5 – Блок-схема реалізації алгоритму шейдерного зафарбовування 3D-зображення користувача

3.3 Розроблення методу синтезу текстур тривимірного зображення користувача в режимі реального часу

Для досягнення ефективного та якісного рендерингу 3D-зображень користувачів на таких поширених платформах, як мобільні пристрої, у

дисертаційному дослідженні розроблено метод синтезу текстур, спрямований на покращення процесу рендерингу. Ця задача є важливою, оскільки рендеринг відповідає приблизно за 60–80 % загального обчислювального навантаження [99], необхідного для створення тривимірних сцен, маючи велику вагу у визначенні продуктивності графічних систем. Розроблений метод синтезу текстур у режимі реального часу базується на застосуванні підходу «texture baking» [100], [101], що є поширеною технікою в програмному забезпеченні для тривимірного моделювання. Цей метод має на меті суттєво підвищити ефективність конвеєра рендерингу під час тривалої взаємодії користувача із цифровим зображенням, особливо після модифікацій, внесених користувачем.

Використання розробленого методу дає змогу виконати єдиний, початковий розрахунок кольорів кожного текселя моделі з подальшим синтезом вихідної текстури. Розроблений метод усуває необхідність постійних обчислень кольору текселя для кожного кадру під час подальших взаємодій користувача з тривимірним аватаром.

Розроблений метод враховує такі важливі чинники, як освітлення, затінення та відображення текстур, а також передбачає використання конвеєр рендерингу, спеціально пристосованого для мобільних платформ [102], [103].

Представимо розроблений метод синтезу текстур 3D-зображення користувача, як багатoelementний кортеж взаємопов'язаних компонентів, як от:

1. Базова 3D-модель цифрового аватара, що містить розроблені набори змішаних форм виразу обличчя користувача (розділ 2.1) а також форми для морфінгу тривимірної сітки (розділ 2.3).
2. Набір джерел світла, що використовуються для освітлення 3D-моделі. Кожне джерело світла може відрізнятися за інтенсивністю, кольором, напрямком і типом (наприклад, розсіяне, спрямоване, точкове або прожекторне), що значно впливає на сприйняття форми і глибини 3D-моделі [104]–[107].

3. Віртуальна камера, яка визначає перспективу, з якої розглядається аватар. Характеристики камери, такі, як її положення, орієнтація та поле зору, контролюють проекцію та візуалізацію 3D-аватара.
4. Набір текстур — масив зображень або процедурних шаблонів, нанесених на поверхню 3D-моделі для створення детальних візуальних ефектів, таких, як колір шкіри, губ чи інших елементів цифрового обличчя. Комбінація та налаштування текстур збагачують реалістичність моделі [108], [109], імітуючи вигляд складних поверхонь (розділ 3.1).
5. Набір програмно заданих кольорів, що використовується для різних аспектів аватара, таких, як дифузний колір (основний колір об'єкта), дзеркальний колір (колір відблисків) і випромінюючий колір (колір, який об'єкт випромінює, ніби він є джерелом світла).

Представлення такого кортежу даних може бути математично сформульовано в такому рівнянні.

$$Avatar = \langle 3D_{model}, M_{light}, C, M_T, M_C \rangle, \quad (3.6)$$

де $3D_{model}$ — базова 3D-модель, M_{light} — множина джерел світла, C — віртуальна камера, M_T — множина текстур, M_C — множина кольорів.

У розробленому методі синтезу текстур 3D-модель декомпонується на окремі дискретні сегменти від $1 \dots n$, як-от сегмент очей, сегмент шкіри та губ, і т. ін. Кожним із цих сегментів можна незалежно маніпулювати та конфігурувати, що забезпечує більш ефективний рендеринг під час модифікації моделі в режимі реального часу користувачем. Ці сегменти визначаються, як:

$$3D_{model} = \{U_1, U_2, \dots, U_n\}, \quad (3.7)$$

де кожен U_i представляє окремий сегмент 3D-моделі, Кожному сегменту моделі призначено окремий набір шейдерів розроблені в розділі 3.1, що дає змогу ретельно контролювати зовнішній вигляд і продуктивність кожної частини цифрового аватара. Ці шейдери визначаються, як:

$$S = \{S_1, S_2, \dots, S_n\}. \quad (3.8)$$

Також кожен окремий сегмент може містити від $0 \dots k$ текстур та кольорів (3.3), що використовуються шейдером для визначення фінального кольору зафарбовування текселя.

Отже, синтезована текстура представлена функцією:

$$TB_i = B(T_j, C_k, S_m), \quad (3.9)$$

де T_j — визначає набір вхідних текстур, C_k — набір параметрів кольорів заданих користувачем, S_m — набір шейдерів, кожного сегменту.

Функція (3.9) застосовується для створення синтезованої текстури TB_i для кожного сегменту $U_i \in 3D_{model}$ формули (3.7).

Отже, вихідні текстури в кортежі рендерингу разом із набором кольорів замінюються новоствореним набором синтезованих текстур

$$TB = \{TB_1, TB_2, \dots, TB_n\}, \quad (3.10)$$

$$Avatar = \langle 3D_{model}, M_{light}, C, M_{TB} \rangle, \quad (3.11)$$

де новий елемент кортежу M_{TB} — позначає набір синтезованих текстур.

За допомогою методу синтезу текстур у режимі реального часу текстури та кольори синтезуються в композитну текстуру TB_1 для кожного модельного блоку $U_i \in 3D_{model}$, у такий спосіб, усуваючи потребу в складних тексельних обчисленнях під час процесу рендерингу. Розроблений метод не лише підтримує різноманітність користувацьких налаштувань, але і значно підвищує обчислювальну ефективність конвеєра рендерингу під час тривалої взаємодії між користувачем та аватаром, що зображено в розділі 4.3.4.

Схематичне представлення методу синтезу текстур зображено на Рис. 3.6 починається з фази взаємодії між користувачем та системою модифікації цифрового зображення користувача (розділ 3.1). Застосування користувачем параметрів кольору і відповідних шейдерів сегментів до 3D-моделі змінює її візуальні атрибути, створюючи персоналізований аватар.

Потім процес переходить до функції синтезу текстури. На цьому етапі відбувається перетворення модифікованої користувачем 3D-моделі на одну

або декілька текстурних карт [110]–[112]. Синтезована текстура інтегрує, як текстуру, так і інформацію про колір, задану користувачем, у такий спосіб, значно зменшуючи потребу в обчисленнях у реальному часі під час процесу рендерингу.



Рисунок 3.6 — Схема методу синтезу текстур тривимірного зображення користувача в режимі реального часу

Зрештою, спрацьовує конвеєр рендерингу, який використовує 3D-модель і синтезовану текстуру, як вхідні дані. Цей етап генерує остаточний візуальний результат, ефективно підтримуючи високу частоту кадрів, що дає змогу оптимізувати інтерактивну взаємодію між користувачем і аватаром.

3.4 Розроблення алгоритму синтезу текстур тривимірного зображення користувача в режимі реального часу.

Розроблений метод синтезу текстур 3D-зображення користувача в режимі реального часу виражається через багатокроковий алгоритм, який сприяє покращенню взаємодії з користувачем та підвищенню обчислювальної

ефективності, який зображено на Рис. 3.7. Цей метод підхід зменшує обчислювальне навантаження під час рендерингу, прискорює взаємодію між користувачем і цифровим аватаром та забезпечує стабільну частоту кадрів.

Розроблений алгоритм складається з таких кроків:

Крок 1. Збір визначених користувачем параметрів кольору та змінних шейдерів. Цей крок передбачає фіксацію користувацьких вподобань для персоналізації візуальних характеристик цифрового аватара, створюючи, у такий спосіб, основу для подальших процесів трансформації.

Крок 2. На етапі синтезу текстури алгоритм використовує захоплені змінні користувачем параметри, як вхідні дані для створення текстури, що синтезуються. Ця текстура є двовимірним об'єктом, який містить інформацію про набір необхідних текстур та задані користувачем дані про колір у конкретній ділянці моделі. Основною метою процесу синтезу є мінімізація обчислень у реальному часі під час рендерингу, що дає змогу оптимізувати обчислювальні ресурси.

Крок 3. Застосування синтезованої текстури до 3D-моделі аватара. Ця дія, фактично, замінює оригінальну текстуру й колірні дані моделі новою текстурою, яка несе всю візуальну інформацію, призначену для користувача.

Крок 4. Ініціація повторного рендерингу, який приймає синтезовану 3D-модель із текстурою і опрацьовує її через конвеєр рендерингу для отримання остаточного візуального результату. Функція конвеєра рендерингу полягає в підтримованості високої частоти кадрів відображення тривимірної моделі.

Крок 5. Видалення шейдерів із конвеєра рендерингу за умови, що подальші модифікації 3D-моделі не потрібні. Оскільки кольори вже вбудовані в текстури, шейдери не потрібні для подальших обчислень кольорів. Ця дія оптимізує використання ресурсів під кроку фази взаємодії.

Розроблений алгоритм є ефективним рішенням, що забезпечує баланс між визначеними цілями підвищення якості взаємодії користувача з аватаром та підвищення ефективності процесу рендерингу. Алгоритм пропонує інноваційні методи, такі, як синтез текстур у режимі реального часу та

видалення шейдерів після модифікації, щоб зменшити обчислювальні витрати, водночас пропонуючи користувачам широкі можливості персоналізації аватара.

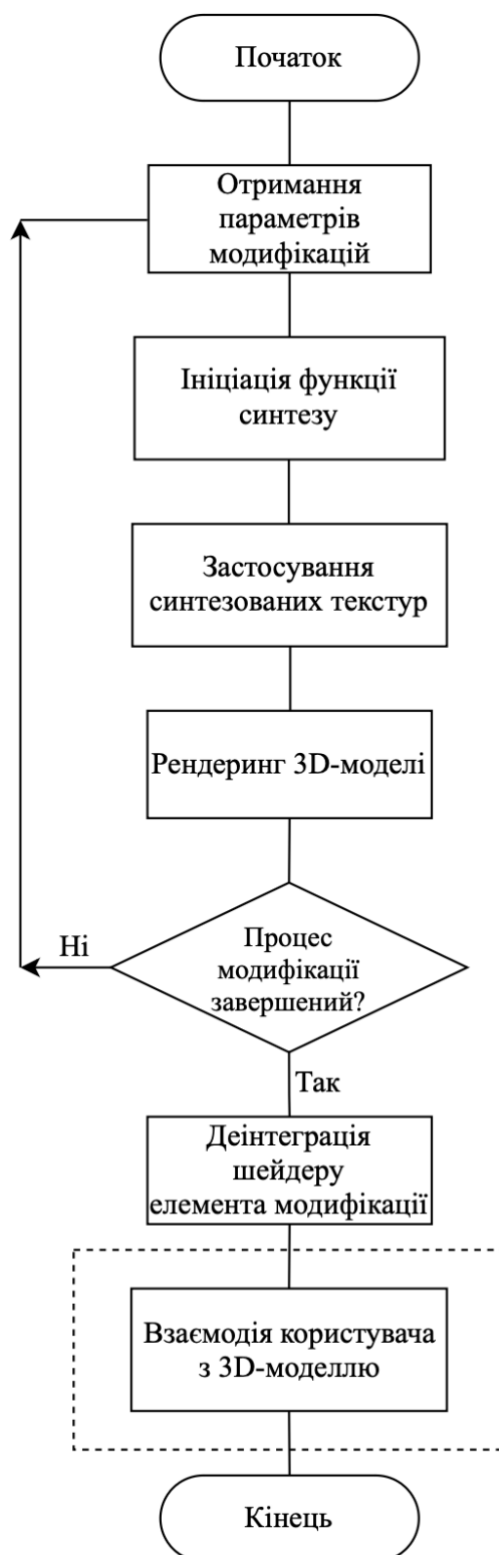


Рисунок 3.7 — Алгоритм оптимізації рендерингу цифрового аватара за допомогою синтезу текстур

Такий підхід сприяє високоякісному інтерактивному користувацькому досвіду без шкоди для ефективності рендерингу.

Висновки до розділу 3

Удосконалено метод шейдерного зафарбовування тривимірною зображення користувача, що використовує операцію текстуровання у поєднанні з фрагментними шейдерами. Алгоритм методу розроблений із використанням вбудованого в мобільну платформу iOS ігрового рушія SceneKit та низькорівневого апаратного прискорювача тривимірної графіки Metal, дає змогу помітно підвищити швидкість обробки об'єктів. Використання методу текстуровання «splat map», що традиційно застосовуються для роботи з генеруванням великих тривимірних об'єктів ландшафту, дає змогу скоротити використання текстур, тим самим зменшивши осяг необхідних даних для відображення аватара.

Удосконалено метод та алгоритм синтезу текстур тривимірною зображення користувача, що полегшує процес рендерингу за допомогою значної мінімізації обчислень у реальному часі. Метод синтезу текстур усуває необхідність обчислювати колір кожного текселя для кожного кадру, що сприяє покращенню процесу рендерингу. Як результат, алгоритм підтримує більш ефективний конвеєр рендерингу й забезпечує послідовну взаємодію з користувачем навіть після численних циклів модифікації аватара. Збільшення продуктивності рендерингу особливо помітне під час тривалої взаємодії між аватаром та користувачем, що додатково демонструє ефективність запропонованого методу в оптимізації процесу рендерингу.

Розділ 4. Особливості реалізації засобів синтезу тривимірного зображення користувача та результати розробленої системи під мобільну платформу

В дисертаційній роботі розроблено інформаційну технологію синтезу тривимірного зображення користувача для мобільних систем доповненої реальності. Структура розробленої інформаційної технології зображена на Рис. 4.1.

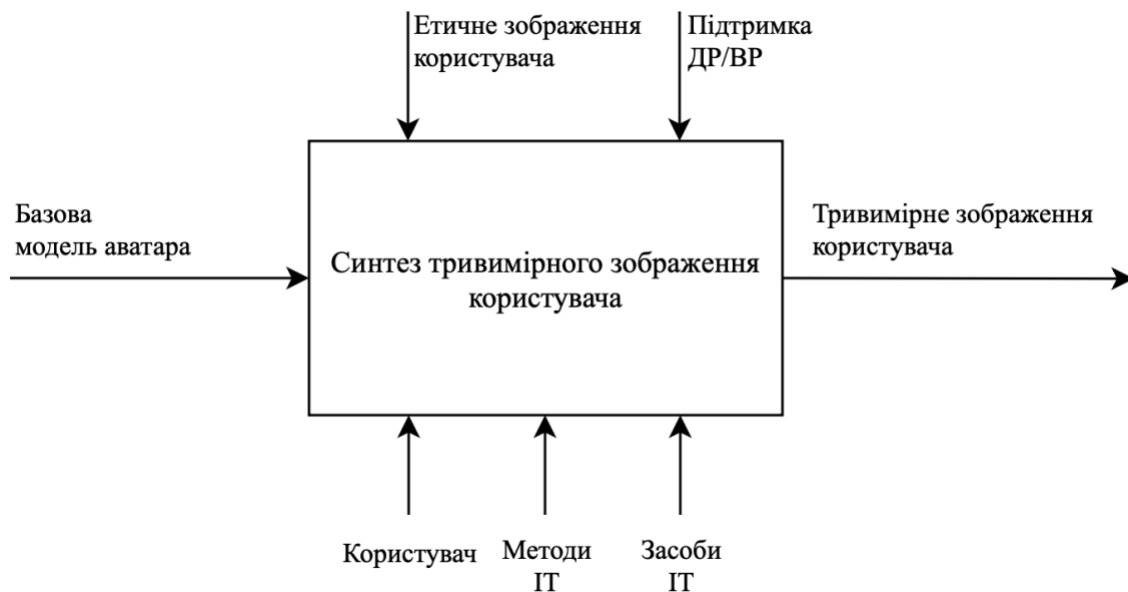


Рисунок 4.1 — Структура інформаційної технології синтезу тривимірного зображення користувача для мобільних систем доповненої реальності

Розроблена інформаційна технологія складається з наступних складових:

1. Центральний блок. Представляє собою ключову компоненту інформаційної технології, яка має за мету генерувати напів-реалістичне тривимірне зображення користувача.
2. Вхідні дані. Основою для синтезу 3D-зображення є «Базова модель аватара». Ця модель служить вхідним пунктом і адаптується згідно з індивідуальними особливостями користувача та детально описана

розділі 2 дисертаційного дослідження.

3. Механізми.

3.1 Користувач: особа, для якої виконується процес створення 3D-зображення на основі вхідних даних.

3.1 Методи ІТ: розроблені в дисертаційному дослідженні метод синтезу аватара користувача (Розділ 2), метод шейдерного зафарбовування тривимірного зображення користувача (Розділ 3) та метод синтезу текстур аватара користувача (Розділ 3).

3.1 Засоби ІТ: Розроблені алгоритми вищезгаданих методів з врахуванням обмежених ресурсів мобільної ОС iOS а також вбудовані в мобільну систему засоби для відображення 3D-моделей, як-от ігровий рушій SceneKit та апаратний прискорювач графіки – Metal.

4. Елементи керування. Основні принципи керування інформаційною технологією включають в себе забезпечення синтезованого аватара відповідно до етичних норм. Це необхідно для уникнення несанкціонованого використання аватара проти бажання користувача. Додатково, синтезований аватар повинен бути сумісний з технологіями доповненої та віртуальної реальності, що дає змогу забезпечити інтерактивну взаємодію між аватаром та користувачем.

Отже, розроблена інформаційна технологія синтезу аватара користувача для мобільних систем доповненої реальності використовує базову модель аватара для синтезу кінцевого тривимірного зображення користувача та забезпечує його етичне використання а також сумісність з технологіями ДР/ВР.

4.2 Розроблення архітектури програмної системи синтезу тривимірного зображення користувача на ОС iOS

В ході дисертаційного дослідження розроблено комплексну систему

синтезу 3D-аватара обличчя користувача, яка імплементує представлені в розділах 2 та 3 методи та алгоритми на мобільну ОС iOS. Структурна схема цієї системи зображена на Рис. 4.2 та складається з трьох шарів:

- Ресурсний шар.
- Презентаційний шар.
- Шар інтерфейсу.

Шар ресурсів являє собою репозиторій усіх ресурсів, зокрема файлів, вбудованих у розроблений додаток. Ці ресурси слугують основою, на якій базується синтез 3D-аватара обличчя користувача. Він надає вихідні дані та параметри, які використовуються вищими рівнями системи для виконання процесу синтезу.

Зі свого боку, презентаційний шар містить усі об'єкти, відповідальні за відображення та візуальний аспект синтезу. Цей шар використовує ресурси, надані попереднім шаром, для генерації та візуального представлення аватара користувача. Він виконує завдання перетворення абстрактних даних і числових параметрів у послідовне і візуально зрозуміле 3D-представлення а також використовує вбудовані методи та засоби ОС iOS.

Водночас шар інтерфейсу інкапсулює розроблені методи модифікації геометрії та колірних атрибутів аватара. Окрім синтезу 3D-моделі, цей шар забезпечує інтерфейс для взаємодії з користувачем, даючи йому змогу налаштовувати аватар у режимі реального часу. Цей шар забезпечує перетворення вхідних дані користувача на параметри модифікації 3D-моделі, що дає змогу системі персоналізувати аватар відповідно до уподобань користувача.

У структурному огляді системи синтезу аватарів, зображеному на Рис. 4.3, кілька ключових модулів охоплюють попередньо описані три шари, кожен із яких відповідає за окремі аспекти функціональності системи. Усі модулі складаються з декількох сервісів, що визначають конкретну програмну реалізацію для оптимізації процесу синтезу аватарів.

Модуль 3D-графіки в презентаційному шарі містить сервіс

ShaderConfigService, який відповідає за інтеграцію *.shader*-файлів, із шару ресурсів, до вбудованого ігрового рушія.

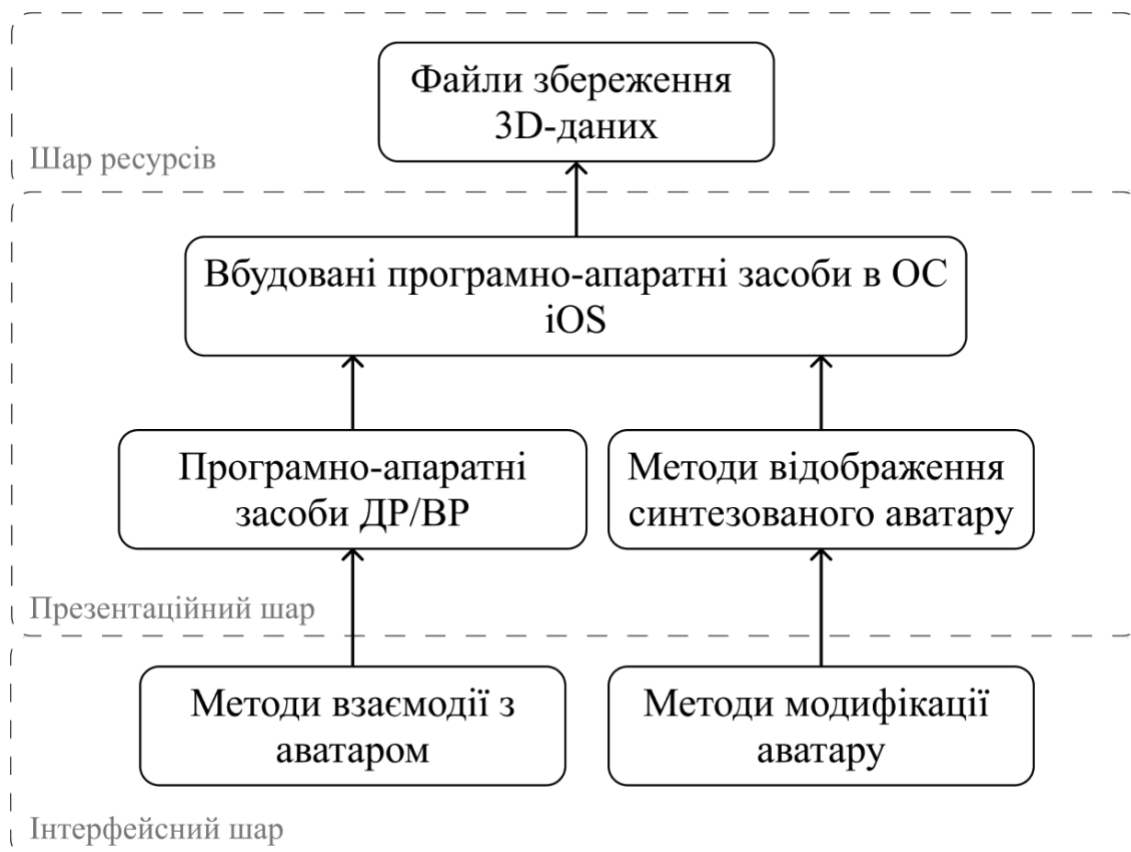


Рисунок 4.2 — Структурна схема системи синтезу цифрового аватара

Іншим невід’ємним компонентом цього модуля є сервіс *MaterialsConfigService*, призначений для отримання та налаштування всіх текстур 3D-моделей, розташованих у шарі ресурсів. Крім того, *SceneConfigService* відповідає за налаштування освітлення, перспективи камери та позиціонування моделі голови, використовуючи USDZ-файл із шару ресурсів.

Зі свого боку, модуль рендерингу інкапсулює сервіс *SceneRendering*. Цей сервіс реалізує описаний у Розділі 3.3 метод синтезу текстур тривимірного зображення користувача, керуючи візуальним виглядом моделі в системі синтезу тривимірного зображення користувача. Цей модуль забезпечує високоякісне візуальне представлення аватара, об’єднуючи різні графічні компоненти для створення цілісного візуального результату.

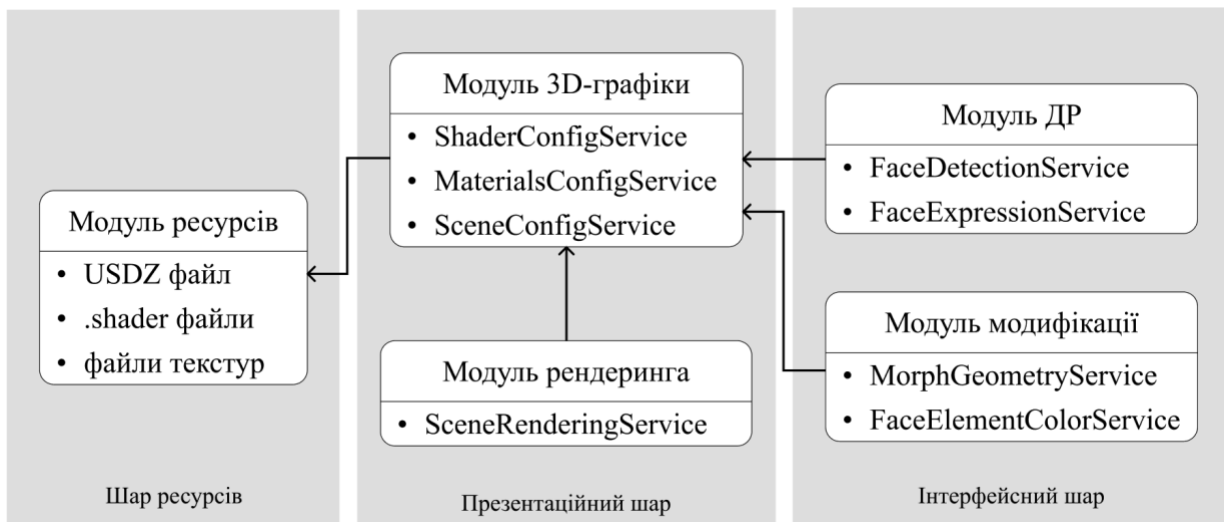


Рисунок 4.3 — Ключові модулі структури системи синтезу цифрового аватара

Модуль доповненої реальності, що міститься в інтерфейсному шарі, є невід’ємною частиною системи для визначення обличчя користувача, його положення та поточного виразу. Точність цього модуля забезпечується завдяки сервісам *FaceDetection* і *FaceExpression*. Ці сервіси виконують задачі розпізнавання широкого спектру виразів обличчя, генеруючи 52 значення змішаних форм для забезпечення всебічного представлення виразу обличчя користувача.

Водночас модуль модифікації інтегрує розроблені методи модифікації аватара в реальному часі. Це здійснюється за допомогою сервісів *MorphGeometry* та *FaceElementColor*. Сервіс *MorphGeometry* забезпечує здатність зміни геометрії тривимірної сітки аватара тоді як сервіс *FaceElementColor* дає змогу модифікувати колірні атрибути аватара, додаючи ще один рівень персоналізації для користувача. Разом ці сервіси забезпечують цілісний, інтерактивний та персоніфікований користувацький досвід, забезпечуючи гнучкість і можливість налаштування системи синтезу аватарів.

Структура системи синтезу цифрових аватарів, як зображено на Рис. 4.4, використовує низку вбудованих фреймворків в ОС iOS, кожен із яких використовується або є більш поширеним в окремих рівнях розробленої системи. Застосування вбудованих інструментів дає змогу уникнути

необхідності інтеграції зі сторонніми рішеннями, у тому числі з ресурсомісткими ігровими рушіями і, як наслідок, дає перевагу зменшенню розміру вихідного застосунку.

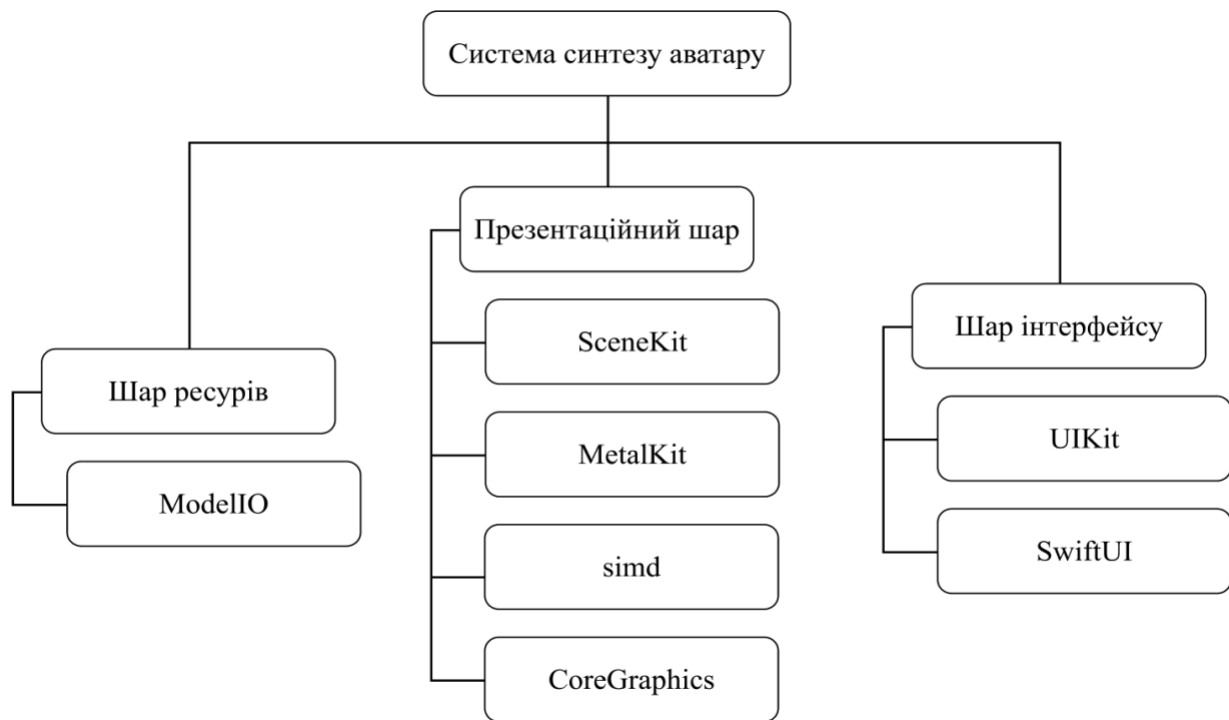


Рисунок 4.4 — Структурна схема використання вбудованих засобів iOS в системі синтезу цифрового аватара

Цей підхід базується на розробці ефективної системи, яка легко інтегрується в екосистему iOS, тим самим підвищуючи загальну продуктивність застосунку та забезпечуючи адаптивність до потенційних оновлень платформи iOS чи масштабування розробленої системи.

4.3 Особливості алгоритмічного забезпечення системи синтезу тривимірного зображення користувача

Згідно з висновками в Розділах 1.2 та 2.2 задля забезпечення сумісності та найбільшої ефективності під час рендерингу тривимірних файлів на мобільній ОС iOS важливо використовувати моделі представлені у форматі USDZ.

Відповідно до висновків, зроблених у розділах 2.2, 2.3 та 3.1

дисертаційного дослідження, встановлено, що попередньо розроблена 3D-модель обличчя має охоплювати не тільки геометричні дані тривимірної моделі. Фактично, комплексна 3D-модель для мобільних систем має також включати дані про текстуру й різні набори змішаних форм. Ці компоненти є важливими для забезпечення різноманітних модифікацій аватарів та інтерактивних можливостей у системах ДР/ВР.

У ході виконання практичної частини дисертації виявлено низку програмних обмежень серед поширених інструментів 3D-моделювання [7], як можна побачити з Таблиці 4.1. Незважаючи на їхнє широке використання, виявлено, що найбільш поширені інструменти моделювання, не здатні до експортування 3D-моделей у такі формати, як USDZ або USD-подібні (USDC, USDA), зберігаючи цілісну інформацію про змішані форми, що присутні у 3D-моделях. Це створило суттєву перешкоду в розрізі цілей і методу синтезу 3D-аватарів викладених у дисертаційному дослідженні.

З огляду на широке використання ПЗ Blender для розробки базової 3D-моделі зображення користувача, завдяки його відкритому коду, у ході реалізації практичної частини дисертаційної роботи розроблено алгоритм створення 3D-моделі в USDZ форматі, адаптований для вирішення виявлених обмежень експортування тривимірних файлів у рамках програмного забезпечення Blender.

У зв'язку із цим, розроблено алгоритм, що схематично представлений на Рис. 4.5, для створення 3D-моделей із наявною інформацією про змішані форми у форматі USDZ.

Розроблений алгоритм створення 3D-моделей у форматі USDZ із застосуванням змішаних форм працює на основі багатоетапного процесу, який детально описується таким чином:

Крок 1. Початковий крок алгоритму полягає в створенні 3D-моделі з набором змішаних форм за допомогою ПЗ Blender.

Крок 2. Після етапу створення, 3D-модель експортується з ПЗ Blender у проміжний формат файлу. Цей крок забезпечує зв'язок між власним

форматом ПЗ Blender та бажаним форматом USDZ, долаючи властиві ПЗ Blender обмеження щодо експорту даних про форму бленду разом із 3D-моделлями.

Таблиця 4.1.

Оцінка ПЗ для функціоналу експорту USDZ зі збереженням змішаних форм

Програмне забезпечення	Підтримання експорту в <i>USDZ</i>	Підтримання експорту в <i>USD-подібний формат</i>	Підтримання експорту змішаних форм
<i>Blender</i>	—	+	+
<i>Maya</i>	+	—	—
<i>Cinema 4D</i>	—	—	—
<i>Houdini</i>	+	+	—

Крок 3. На наступному етапі алгоритм використовує програмний код для вилучення геометричної інформації з проміжного 3D-файлу. Вилучені дані, що охоплюють усі змішані форми, систематично агрегуються у відповідну структуру даних, забезпечуючи її цілісність і придатність для використання на наступному етапі перетворення.

Крок 4. Агреговані дані з попереднього кроку конвертуються у формат USDZ за допомогою спеціального інструменту конвертації від Apple. Змішані форми, геометричні дані та інша важлива інформація, як-от текстури, 3D-моделі містяться в USDZ-файлі.

Отже, розроблений алгоритм дає змогу створювати 3D-моделі у форматі USDZ зі збереженням інформації про змішані форми в структурі тривимірного

файлу, що в кінцевому підсумку забезпечує виконання завдання використання найбільш оптимального формату файлів тривимірних даних на мобільний ОС iOS.



Рисунок 4.5 — Схематичне представлення алгоритму створення 3D-моделі в USDZ форматі

Результатом роботи алгоритму є 3D-модель, що зберігається в USDZ файлі, доповнена змішаними формами та готова до інтеграції в ігровий рушій iOS — SceneKit. Використання формату USDZ дає змогу оптимізувати розмір файлу порівнюючи з іншими поширеними 3D-форматами, що особливо корисно для мобільних додатків з обмеженим обсягом пам'яті. Крім того,

пряма сумісність формату USDZ з iOS забезпечує швидке та ефективне відкриття файлів, оскільки формат підтримується на рівні системи iOS.

Отже, алгоритм не тільки полегшує створення 3D-моделей із можливістю зберігання інформації про змішані форми у форматі USDZ, але і сприяє підвищенню загальної продуктивності та зручності використання синтезованих 3D-зображень користувача в ОС iOS.

4.4 Вимоги до апаратного забезпечення

Розроблена система синтезу аватарів, для мобільної платформи iOS, базується на специфічних апаратних вимогах, щоб гарантувати оптимальну продуктивність і безперебійну функціональність. Фундаментальним для цього є виконання ресурсоємних завдань, таких, як відтворення аватарів у реальному часі, модифікація геометрії сітки, змішування текстур, модифікація кольорів та накладання виразу обличчя за допомогою фігур змішування, які вимагають значних обчислювальних ресурсів та можливостей високоякісної графічної обробки.

Ключовою специфікацією для роботи системи є наявність потужного графічного процесора, здатного керувати графічно ресурсоємними завданнями. Зокрема, рендеринг 3D-аватара в реальному часі та застосування шейдерів Metal для модифікації кольору за допомогою змішування текстур є процесами, що залежать від цієї вимоги до апаратного забезпечення. Отже, пристрій iOS чи iPadOS з графічним процесором, що підтримує технологію Metal, є незамінним. Станом на сьогодні ця вимога, як правило, передбачає використання iPhone моделі iPhone X або новішої версії, або iPad моделі iPad Pro 11 2018 року або будь-якого iPad, випущеного після 2019 року, як показано в Таблиці 4.2.

Важливо зазначити, що для ефективної роботи системи потрібен або потужний процесор, наприклад, чип A12 Bionic від Apple або будь-який інший чипсет серії A чи серії M, або пристрій, оснащений фронтальною камерою

TrueDepth для розпізнавання обличчя в реальному часі та відстеження виразу обличчя.

Таблиця 4.2

Перелік вимог та підтримуваних апаратних засобів для роботи розробленої системи синтезу 3D-зображення користувача

Тип пристрою	Мінімально необхідне апаратне забезпечення	Мінімальна версія пристрою	Мінімальна версія ОС
iPhone	CPU A12 або TrueDepth Camera	iPhone X (A11 + TrueDepth Camera) представлений у вересні 2017 р.	iOS 13.0 або вище
		Усі пристрої представлені після вересня 2019 р.	
iPad	CPU A12 або TrueDepth Camera	iPad Pro 11" (A12X + TrueDepth Camera) представлений у вересні 2018 р.	iOS 13.0 або вище
		iPad Pro 12.9" 3rd gen. (A12X + TrueDepth Camera) представлений у вересні 2018 р.	
		Усі пристрої представлені після вересня 2019 р. окрім iPad 7th gen.	

Пристрої без камери TrueDepth, але з достатньо потужним процесором (A12 або новішої версії) можуть працювати із системою, хоча і з потенційно менш точною функціональністю відстеження виразу обличчя в реальному часі. І навпаки, пристрої, оснащені камерою TrueDepth, навіть без необхідного процесора, полегшують отримання точних даних про обличчя і сприятимуть розширенню функціональності системи відстеження виразу в реальному часі. Ця технологія має вирішальне значення для здатності системи відображати

вираз обличчя користувача на синтезованому 3D-аватарі в режимі реального часу, покращуючи загальний користувацький досвід.

Також, для роботи системи потрібна мінімальна версія ОС iOS 13.0, випущена у вересні 2020 року. Ця вимога забезпечує сумісність системи з передовими функціями та технологіями, представленими в цій та наступних версіях iOS.

Окреслені апаратні передумови наголошують на потребі системи в значних технічних можливостях. Однак вони також вказують на прагнення розробленої системи використовувати передові технології для забезпечення високоякісної, захоплюючої роботи користувачів у режимі реального часу. Очікувані майбутні досягнення в апаратному забезпеченні iOS сприятимуть подальшому вдосконаленню та оптимізації продуктивності системи синтезу цифрових аватарів.

4.5 Результати дослідження

Результатом розроблених моделей та методів є застосунок під мобільну платформу iOS, що написаний на мові програмування Swift. Розроблений застосунок дає змогу створювати та редагувати цифровий аватар користувача, а також взаємодіяти з ним за допомогою проектування емоцій обличчя людини на відображену модель.

4.5.1 Результати застосування методу синтезу тривимірного зображення користувача

Результати процесу синтезу тривимірного зображення користувача представлені за допомогою серії рисунків, починаючи з Рис. 4.6, який закладає основу, ілюструючи базову текстуровану 3D-модель, що супроводжується відповідною геометричною сіткою.

Як зображено на Рис. 4.7, продемонстровано здатність системи відтворювати різноманітні комбінації виразу обличчя користувача за

допомогою інтегрованих інструментів і розроблених змішаних форм. Ці форми здатні покращити взаємодію між користувачем і системою в контекстах доповненої і віртуальної реальності, що відповідає одній із ключових цілей цього дисертаційного дослідження — забезпечення адаптивності до інтеграції доповненої і віртуальної реальності.

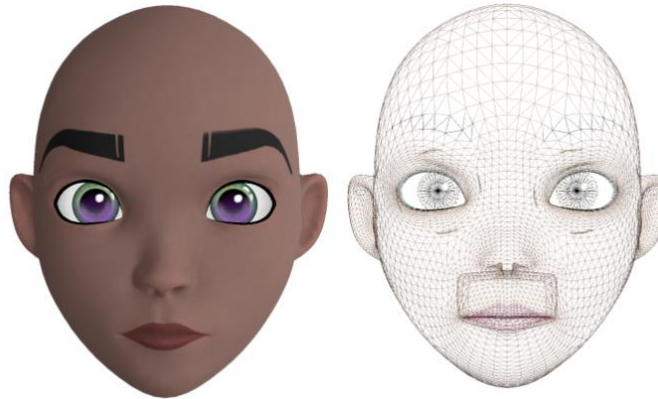


Рисунок 4.6 — Базовий вигляд моделі аватара та геометричної сітки моделі

Спираючись на підході, висвітлені в розділі 2.2, синтезована модель у прикладі охоплює 52 попередньо визначені змішані форми, пристосовані для відображення різних емоцій користувача, як проілюстровано на Рис. 4.7. та Рис. 4.8. Універсальність розробленого методу дає змогу переглядати, доповнювати або навіть масштабувати ці форми, щоб задовольнити конкретні вимоги користувача або сценарії застосування.



Рисунок 4.7 — Приклад віддзеркалення емоції усмішки користувача (з правого боку) з вихідного положення тривимірної моделі (з лівого боку)



Рисунок 4.8 — Приклад віддзеркалення різних виразів обличчя користувача на цифровому аватарі, зліва на право — вираз злості, вираз смутку

Отже, розроблений метод синтезу тривимірного зображення користувача включає базову модель, що складається з 52 унікальних форм, кожен з яких можна налаштувати з вагою в діапазоні від 0 до 1 (формула 2.16). Така гнучкість у конфігурації форм посилює здатність цифрового зображення відображати майже безмежний спектр виразів обличчя, що відповідає емоціям користувача під час його взаємодії з ДР/ВР. Регульована вага кожної змішаної форми підвищує реалістичність аватара, забезпечуючи більш тонке й точне відображення емоційного стану користувача, тим самим збагачуючи загальний віртуальний досвід.

Така широка конфігурація, що теоретично дає змогу отримати 11^{52} (формула 2.17) різних виразів обличчя, демонструє здатність синтезованої 3D-моделі представляти практично необмежений спектр людських емоцій. Такий результат має важливе значення в підвищенні інтерактивності та емоційного сприйняття середовищ ДР/ВР, забезпечуючи більш автентичний і захоплюючий досвід користувача під час віртуальної взаємодії.

4.5.2 Результати процесу морфінгу тривимірного зображення користувача

Базова модель, зображена на Рис. 4.6 слугує початком для подальших

перетворень, як показано на Рис. 4.9, 4.10 та 4.11.

Кожен наступний рисунок демонструє здатність моделі до поєднання форм змішування — центральну характеристику розробленого алгоритму.

На Рис. 4.9 показано можливість змінювати форму очей базової моделі.

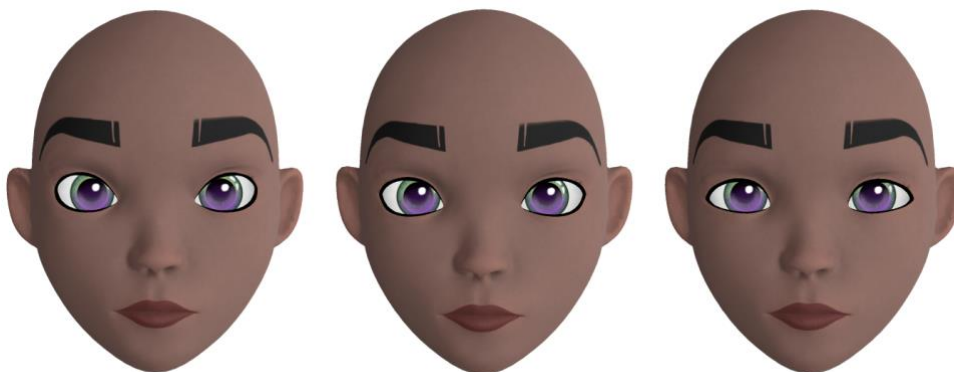


Рисунок 4.9 — Приклад налаштування форми очей цифрового аватара

На Рис. 4.10 показано можливість використання форм змішування на іншій рисі обличчя — підборідді. Структура підборіддя моделі може бути змінена до різних форм, що ще раз демонструє універсальність алгоритму та потенціал для широкої персоналізації.



Рисунок 4.10 — Приклад налаштування форми підборіддя цифрового аватара

Так само, Рис. 4.11 дає уявлення про маніпуляції з формою носа.



Рисунок 4.11 — Приклад налаштування форми носа цифрового аватара

Змішані форми, як видно з рисунків, є регульованими параметрами, які дають змогу суттєво змінювати фізичні атрибути тривимірної моделі зображення користувача. Величину й напрямок цих форм можна точно контролювати, надаючи користувачам можливість налаштовувати аватар відповідно до конкретних вимог продукту.

Як показано на вищезазначених рисунках, розроблений метод дає змогу змінювати не лише естетичні характеристики аватара, але і його структурні характеристики, що підкреслює здатність до широкої модифікації, закладену в цьому методі. Можливість коригування цих змішаних форм у режимі реального часу забезпечує великий набір налаштувань та інтерактивності, ілюструючи ефективність та гнучкість розробленого методу для задоволення різноманітних потреб користувачів та специфікацій продукту.

4.5.3 Результати застосування методу шейдерного зафарбовування тривимірного зображення користувача

На наступних рисунках зображених у цьому розділі представлено

практичне застосування розробленого методу шейдерного зафарбовування тривимірного зображення користувача. Потрібно зазначити, що на Рис. 4.12 зображено різноманітні модифікації кольору очей, досягнуті завдяки застосуванню методу змішування текстур і подальшому створенню градієнтних кольорних ефектів. Ці модифікації здійснено з використанням фреймворку Metal — апаратно графічного прискорювача вбудованого в ОС iOS.

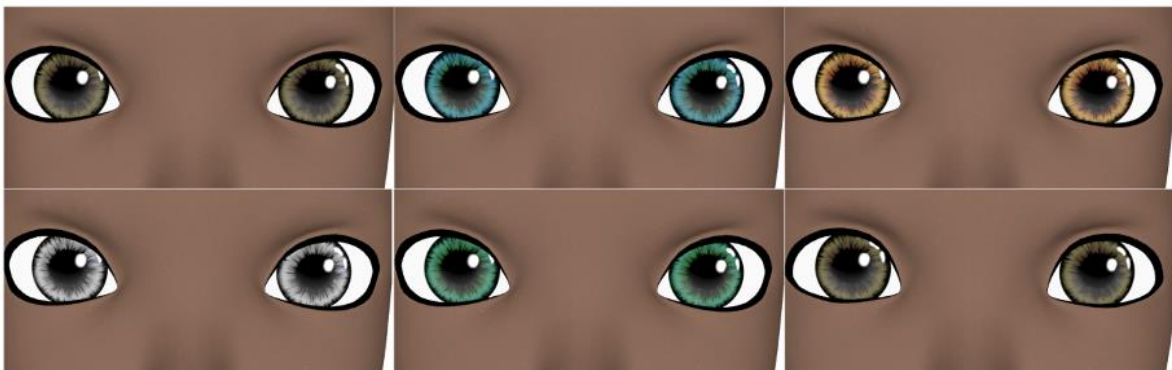


Рисунок 4.12 — Приклад модифікації кольору очей аватара в режимі реального часу

Можливості розробленого методу поширюються на позначення будь-якої ділянки 3D-моделі для модифікації в реальному часі за допомогою техніки змішування текстур, як це продемонстровано на рисунках 4.13, 4.14, 4.15.

На Рис. 4.13 зображено трансформацію кольору губ, а Рис. 4.14 демонструє можливості модифікації кольору брів. Разом із цим, Рис. 4.15 зображує різні комбінації зміни кольору в різних частинах обличчя.

Зображені функціональні можливості дають змогу користувачам легко налаштовувати певні ділянки моделі, тим самим підвищуючи рівень персоналізації та збільшуючи залученість користувачів. Такий рівень налаштування моделі не тільки сприяє більш захоплюючому користувацькому досвіду, але й демонструє універсальність розробленого методу, що дає змогу задовольнити різні уподобання користувачів.

Крім того, застосування методу змішування текстур у розробленому

методі шейдерного зафарбовування тривимірного зображення користувача полегшує застосування декількох текстурних шарів, створюючи, у такий спосіб, більш реалістичне та детальне представлення моделі.



Рисунок 4.13 — Приклад модифікації кольору губ аватара в режимі реального часу

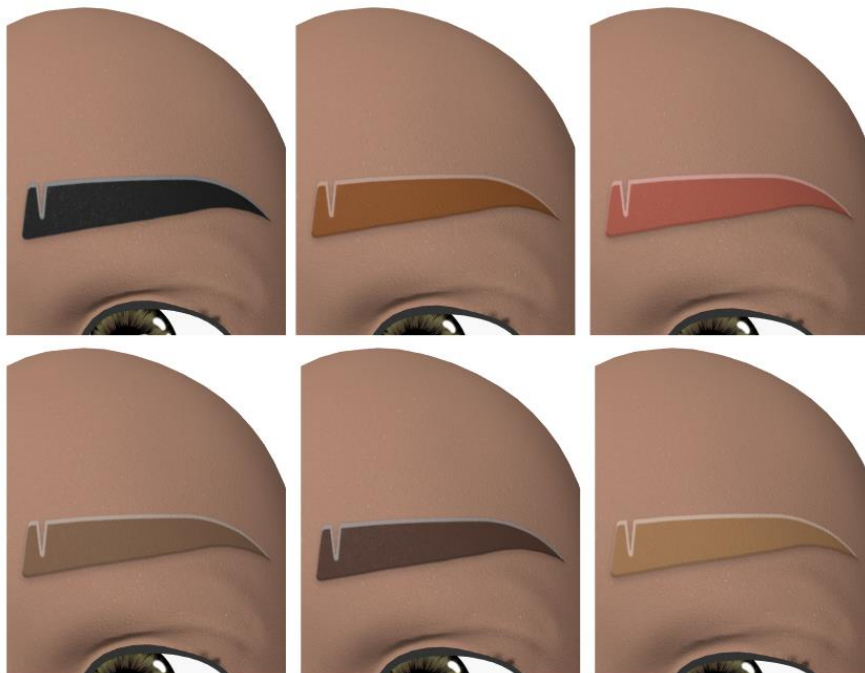


Рисунок 4.14 — Приклад модифікації кольору брів аватара в режимі реального часу

В ході розробки методу шейдерного зафарбовування проведено порівняльний аналіз розмірів текстур аватарів, що використовуються для рендерингу. Традиційне текстурування 3D-моделей, як правило, базується на текстурах, створених за допомогою програм для 3D-моделювання. Для базової моделі, описаної в розділі 2.5, створеної за допомогою програми Unity, результуюча текстура займала 6 МБ на диску. Зі свого боку, сукупний розмір текстур, включених до шейдерів обличчя та очей, склав 2,56 МБ. Важливо, що як згенеровані текстури, так і текстури-маски, використані в методі шейдерного зафарбовування, мали однакову роздільну здатність і однакові розміри по ширині та висоті.

Таким чином, застосування методу шейдерного зафарбовування дало змогу заощадити місце на диску з ефективністю приблизно 57%.

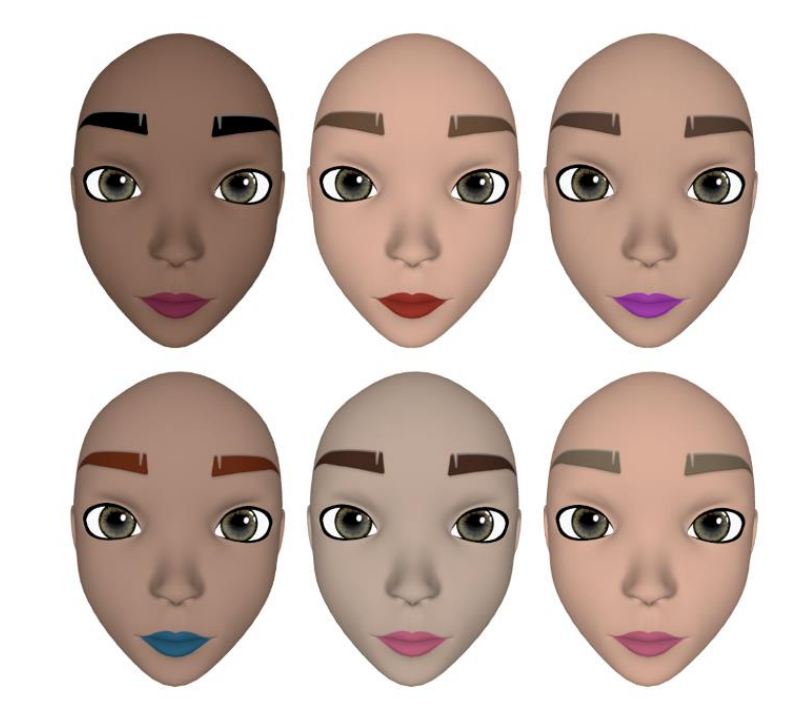


Рисунок 4.15 — Приклад модифікації різних елементів обличчя 3D-моделі в режимі реального часу

Під час виконання дисертаційного дослідження проведено комплексне оцінювання продуктивності розробленої системи та методу шейдерного зафарбовування аватара користувача на різних мобільних пристроїв, зокрема iPhone Xs (Пристрій А) під управлінням iOS 15.6.1, iPhone 12 Pro (Пристрій Б)

під управлінням iOS 16.1.1 та iPad Pro 11' (1-го покоління, Пристрій В) під управлінням iOS 16.3.

Отримані результати тестування демонструють стабільну продуктивність на всіх протестованих пристроях, причому кожен із них підтримує стабільну частоту кадрів 60 кадрів у секунду навіть при послідовній зміні колірних атрибутів аватара. Таку стабільність продуктивності чітко видно на Рис. 4.16, де кожен блок діаграми відображає послідовну модифікацію кольору тривимірного зображення користувача на кожному окремому пристрої.

Варто визнати, що під час швидкої зміни кольору очей на пристрої iPhone 12 Pro (Пристрій Б) спостерігається незначне падіння частоти кадрів, втрата до 10 кадрів. Це спостереження вказує на потенційний простір для вдосконалення розробленого шейдера, який відповідає за зміну властивостей моделей очей, що є складним завданням, відомим своєю обчислювальною інтенсивністю. Крім того, на продуктивність iPhone 12 Pro може впливати менш стабільна версія iOS 16, на якій він працює.

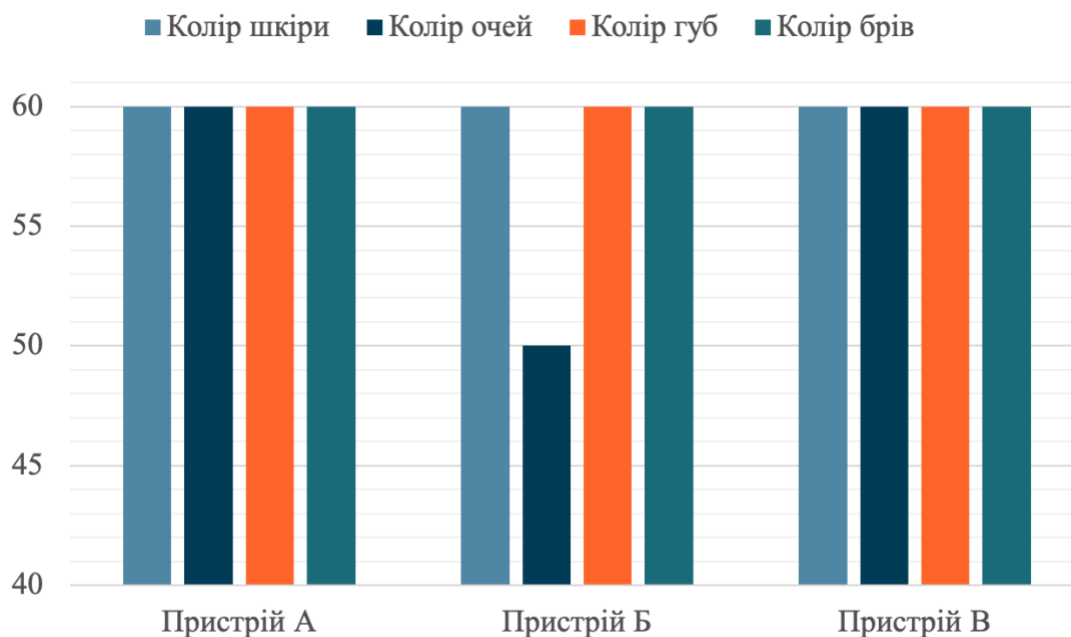


Рисунок 4.16 — Діаграма частоти кадрів на різних пристроях iOS для під час шейдерного зафарбовування тривимірного зображення користувача

Незважаючи на ці спостереження, результати, отримані під час

тестування iPhone Xs та iPad Pro, свідчать про стабільність та ефективність розробленого методу та підкреслюють його здатність забезпечувати високопродуктивні модифікації в режимі реального часу, зберігаючи водночас вражаючу візуальну точність та інтерактивність користувача.

Отже, розроблений метод шейдерного зафарбовування тривимірного зображення користувача демонструє значну надійність та ефективність на різних iOS пристроях. Завдяки розробці спеціалізованих шейдерів для різних рис обличчя, розроблена система підтримує постійну частоту кадрів, забезпечуючи безперебійну та якісну взаємодію з користувачем. Незважаючи на помітне падіння частоти кадрів під час зміни кольору очей на одному конкретному пристрої, загальна продуктивність залишається стабільною, демонструючи стійкість і адаптивність методу. Отримані під час тестування роботи системи результати підтверджують ефективність методу та підкреслюють його потенціал для майбутніх застосувань і вдосконалень у сфері зафарбовування аватарів у середовищах ДР/ВР.

4.5.4 Результати застосування методу синтезу текстур тривимірного зображення користувача в режимі реального часу

У дисертаційній роботі розроблену мобільну систему для iOS платформи, що ґрунтується на створених методах та алгоритмах протестовано на продуктивність. Проведене тестування спрямоване на аналіз енергетичного навантаження системи, використання центрального та графічного процесорів, а також тепловий стан пристрою, що забезпечило комплексну оцінку її операційної ефективності та стабільності. Цей аналіз дає змогу визначити потенційні галузі для вдосконалення розроблених методів та алгоритмів, підтверджуючи готовність системи до надійних реальних застосувань і забезпечуючи безперебійну роботу користувачів у різних робочих контекстах.

Аналіз розробленої системи проведений на трьох iOS пристроях, що вже використовувалися для тестування в розділі 4.3.3, наведений у Таблиці 4.3. Для кожного пристрою оцінені окремі метрики, щоб забезпечити всебічну

картину їхньої операційної продуктивності. У Таблиці 4.3 наведено дані кількості кадрів у секунду, досягнуту кожним пристроєм під час тривалого використання системи (> 30 хв). Також представлені дані теплового стану пристроїв, що класифікуються трьома категоріями — «Номінальний», «Задовільний» і «Серйозний». У «номінальному» стані не спостерігається значного впливу на працездатність пристрою або зручність користування. Категорія «Задовільно» означає мінімальне підвищення температури, що може призвести до ввімкнення вентиляторів пристрою та незначного скорочення часу роботи від батареї. «Серйозний» стан вказує на високий рівень перегріву, що потенційно може вплинути на продуктивність системи, оскільки пристрій вживає заходів для зниження температури. Крім того, у Таблиці 4.3 також детально проаналізовано використання оперативної пам'яті, виміряне в мегабайтах, і завантаження центрального процесора, представлене у відсотках від загальної доступної ємності.

Таблиця 4.3

Аналіз продуктивності розробленої системи синтезу тривимірного зображення користувача

	Кількість кадрів за секунду	Тепловий стан	RAM, Мб	CPU, %
Пристрій А	30	Серйозний	1100	55
Пристрій В	30	Серйозний	1126	53
Пристрій С	60	Номінальний	1130	59

Згідно отриманими даними (Таблиця 4.3) виявлено, що при тривалому використанні розробленої системи кількість кадрів за секунду під час рендерингу просідають на 30 кадрів для деяких пристроїв а також тепловий стан мобільного пристрою підвищуються. Такі показники можна пояснити, насамперед, інтенсивними вимогами до графічної обробки, які висуває метод

рендерингу разом із використанням шейдерів. З огляду на те, що процес рендерингу відбувається на графічному процесорі, а він зі свого боку зазнає високих навантажень.

У зв'язку із цим, під час тестування розробленої системи окремо досліджено динаміку падіння кадрів для обраних пристроїв. Як видно з Рис. 4.17, простежується чітка залежність між тепловим станом пристрою та частотою кадрів. Помітно, що, як тільки тепловий стан пристрою підвищується до «Серйозного», фіксується відповідне падіння частоти кадрів. Це явище є реакцією iOS системи на підвищений тепловий стан і сприяє оптимізації роботи користувачів. Вжиті заходи системи можуть включати зменшення використання, як центрального, так і графічного процесорів, а також очевидне зменшення кількості кадрів у секунду, що в сукупності має на меті стабілізувати робочу температуру пристрою, тим самим забезпечуючи безперебійну функціональність пристрою та взаємодію з користувачем.

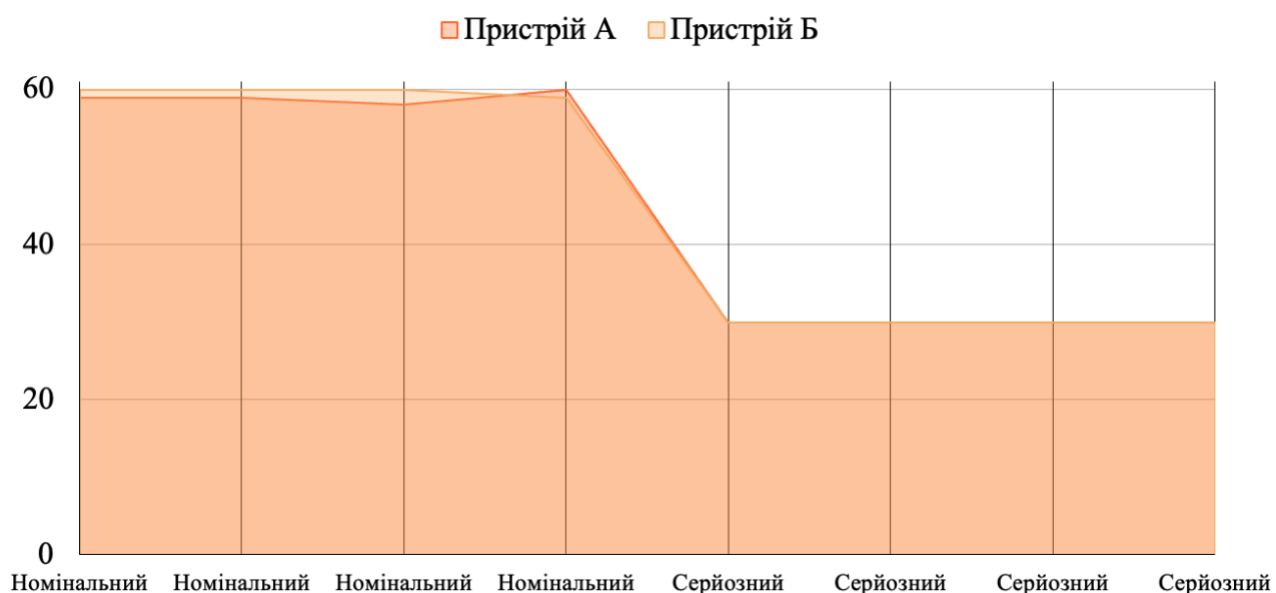


Рисунок 4.17 — Діаграма частоти кадрів та теплового стану вибраних пристроїв під час рендерингу тривимірного зображення користувача

Це спостереження підкреслює обчислювальну інтенсивність методу рендерингу і відповідні вимоги, які він потребує до апаратних ресурсів пристрою. Важливо враховувати ці наслідки при оцінці ефективності та

продуктивності методу, особливо в контексті мобільних пристроїв, де енергоефективність та управління ресурсами мають першорядне значення.

Щоби підвищити ефективність рендерингу та зменшити вплив теплового стану пристрою на тривимірну модель після застосування шейдерів, у дисертаційному дослідженні розроблено метод та алгоритм синтезу текстур тривимірної моделі користувача в реальному часі (Розділ 3.3 та 3.4). Розроблений підхід дає змогу деактивувати шейдери, замінюючи їхнє використання синтезованими текстурами, застосованими до 3D-моделі зображення користувача. Це сприяє оптимізації продуктивності системи під час рендерингу, суттєво мінімізуючи обчислювальне навантаження і, як наслідок, призводить до помітного зниження теплового стану пристрою. Така оптимізація роботи має на меті збереження високої якості рендерингу, одночасно підвищуючи операційну ефективність і стабільність системи, що свідчить про значний прогрес у сфері рендерингу та маніпулювання тривимірними моделями.

З результатів тестування системи синтезу, наведених у Таблиці 4.4, можна помітити значне покращення теплового стану та частоти кадрів (на рівні 60 кадрів/с) для «пристроїв А та Б» після застосування розробленого методу синтезу текст. Проведений аналіз також виявив помітне зменшення використання оперативної пам'яті під час процесу рендерингу, що підвищило операційну ефективність і надійність цих пристроїв. Хоча після застосування методу не відбулося суттєвих змін у використанні центрального процесора, підтримуваний відсоток залишається в прийнятних межах, забезпечуючи стабільну продуктивність системи. Важливо зазначити, що «Пристрій В», iPad Pro 11' (1-го покоління), демонстрував стабільну частоту кадрів у секунду 60 кадрів у секунду навіть до застосування розробленого методу синтезу текстур. Це можна пояснити його більшими фізичними розмірами, що забезпечує підтримання оптимального теплового стану проти більш компактних аналогів, «пристроями А та Б», які є моделями iPhone Xs та 12 Pro відповідно. Це демонструє вплив специфікацій конкретного пристрою на показники

продуктивності, додатково підтверджуючи ефективність розробленого методу синтезу текстур у підвищенні ефективності та продуктивності системи для різних моделей пристроїв.

Таблиця 4.4

Аналіз продуктивності мобільної системи із застосуванням методу синтезу тривимірних текстур

	Кількість кадрів за секунду	Тепловий стан	RAM, Мб	CPU, %
Пристрій А	60	Номінальний	270	51
Пристрій Б	60	Номінальний	295.5	53
Пристрій В	60	Номінальний	305	57

Ще однією перевагою розробленого методу синтезу текстур є використання однієї текстури, а не декількох текстур накладання, як зображено в порівнянні на Рис. 4.18. Відповідно до аналізу наведеному в Таблицях 4.4 та 4.5 метод синтезу текстур забезпечує не тільки значне скорочення вимог до зберігання даних а також зменшує навантаження та попит на ресурси пам'яті підвищуючи продуктивність системи. Ця ключова особливість розробленого методу помітно сприяє підвищенню загальної ефективності та продуктивності системи, тим самим представляючи більш ресурсоефективну альтернативу традиційним мультитекстурним підходам, що переважають у сфері рендерингу та текстурування тривимірних моделей [113].

Отже, результати, отримані під час тестування методу синтезу текстур у реальному часі для 3D-зображень користувача на платформі iOS, демонструють суттєве підвищення ефективності роботи та стабільності системи.



Рисунок 4.18 — Результат синтезу текстур (з лівого боку) у порівнянні з мультитекстурним нашаровуванням (з правого боку)

Незважаючи на інтенсивні вимоги до графічної обробки, розроблений метод та алгоритм ефективно знижує тепловий стан пристрою і забезпечує стабільну частоту кадрів під час рендерингу, що свідчить про значне покращення продуктивності системи.

Розроблений підхід значно зменшує використання оперативної пам'яті під час рендерингу та покращує управління ресурсами пам'яті. Використання єдиної синтезованої текстури, що усуває необхідність накладання декількох текстур, додатково сприяє підвищенню ефективності системи на різних моделях пристроїв iOS, підтверджуючи її значний потенціал для практичного застосування в різноманітних додатках для 3D-візуалізації та рендерингу.

Таблиця 4.5

Аналіз продуктивності мобільної системи з використанням мультитекстур

	Кількість кадрів за секунду	Тепловий стан	RAM, Мб	CPU, %
Пристрій А	60	Задовільний	374	55
Пристрій Б	60	Задовільний	378	53
Пристрій В	60	Номінальний	382	59

4.5.5 Обговорення отриманих результатів та наявних обмежень розроблених рішень

На відміну від рішень синтезу, описаних у наукових роботах [114]–[116], розроблені в дисертаційному дослідженні методи дають змогу користувачам модифікувати елементи обличчя за допомогою створення відповідних власних змішаних форм. Важливою особливістю цих форм є їхня здатність до регулювання та розширювання. Це дає змогу замінити базову 3D-модель у розробленій системі без необхідності внесення змін до її алгоритмів, що робить розроблений метод синтезу 3D-зображення користувача гнучким до масштабування та модифікацій. Крім того, розроблена система синтезу використовує вбудовані інструменти моделювання, такі, як ігровий рушій SceneKit та формати файлів USDZ, тим самим усуваючи залежність від сторонніх бібліотек. Це ефективно зменшує розмір вихідного мобільного застосунку, сприяючи підвищенню ефективності рішення.

Порівнюючи з мобільним застосунком, представленим в [114], який використовує ігровий рушій Unity, розроблене в цій роботі рішення займає значно менше місця на диску, приблизно ~80 МБ проти 300 МБ останнього. Це підкреслює ефективність використання USDZ-файлів для оптимізації використання дискового простору. На відміну від наявних рішень із

використанням згорткових НМ [117], [118], які потенційно можуть мати етичні проблеми, пов'язані з несанкціонованим створенням цифрових аватарів, розроблені в цьому дослідженні методи забезпечують уникнення таких проблем.

З погляду емоційної репрезентації, розроблені методи балансують між карикатурними підходами синтезу [119], [120] та напів-реалістичними рішеннями [121], [122]. Розроблені методи синтезу 3D-зображення користувача підтримують нейтральну геометрію, щоб запобігти потенційній шкоді від гіперболізації рис обличчя цифрового зображення користувача. На відміну від роботи [123], яка передбачає вибір та налаштування додаткових характеристик моделі, розроблені підходи також включають модифікацію елементів геометрії обличчя, яких бракує в [123].

У роботі [124] застосовується підхід, який поєднує розроблені змішані форми з налаштуванням програмного забезпечення під час синтезу, проте це стосується виключно змішаних форм для відображення виразу обличчя користувача. Розроблений метод морфінгу 3D-зображення користувача використовує подібну стратегію для модифікації геометрії обличчя аватара, доповнену об'єднанням із формами виразу обличчя користувача, що значно розширює функціональність системи, на відміну від [124].

Порівнюючи з високореалістичними 3D-реконструкціями облич [120], [123], [125], [126], розроблений метод шейдерного зафарбовування 3D-зображення користувача, має переваги в точності передачі кольору та візуальному розмаїтті. Розроблений метод розширює діапазон відтінків шкіри та кольору очей для 3D-аватарів і дає змогу уникнути упереджених зображень. Також розроблений метод шейдерного зафарбовування дає змогу користувачу редагувати відтінок шкіри, колір очей, губ і брів у режимі реального часу.

Невід'ємним компонентом розробленого методу є використання вбудованих у мобільну ОС методів та засобів, як-от фреймворку Metal та ігрового рушія SceneKit. Таке рішення для виконання задач відображення 3D-моделі відрізняється від праць, що використовують поширені ігрові рушії на

основі OpenGL або DirectX [127], оскільки є ефективним підходом до рендерингу для мобільних iOS-додатків [128]. У роботі [124] обговорюється важливість оптимізації системи синтезу аватарів для мобільних платформ, проте в ній не пропонується рішень, спеціально пристосованих для оптимізації мобільних платформ. Крім того, процес синтезу, окрім збору вхідних даних, виконується на персональному комп'ютері. Зі свого боку, розроблені в даній роботі методи, що передбачають роботу з вбудованими засобами ОС iOS дають змогу оптимізувати використання ресурсів на мобільних пристроях, забезпечуючи плавну та швидку модифікацію аватарів користувачів, а також підтримання продуктивності системи.

Водночас проведене дослідження має низку обмежень і недоліків, які необхідно враховувати при впровадженні розроблених рішень або при проведенні додаткових теоретичних досліджень. Одним з обмежень є зосередженість на пристроях iOS, які можуть не відображати продуктивність та можливості інших платформ. Хоча розроблений метод потенційно може бути застосований до інших мобільних платформ із використанням різних мов шейдерів та ігрових рушіїв, у дисертаційному дослідженні розглядається його реалізація лише на пристроях iOS. Це може обмежити можливість узагальнення результатів та їхнього застосування до інших пристроїв, операційних систем або апаратних конфігурацій. Крім того, хоча в роботі згадується потенціал зміни тривимірного волосся цифрового аватара [129], [130], у дослідженні не розглядаються можливі переваги створення окремого шейдера для рендерингу волосся. Впровадження спеціального шейдера для рендерингу волосся може призвести до більш природних і привабливих візуальних ефектів, що покращить загальний досвід користувачів. Майбутні дослідження можуть розширити отримані результати, вивчивши крос-платформну сумісність, реалізацію розробленого методу на інших пристроях та операційних системах, а також розробку спеціальних шейдерів для конкретних компонентів аватара, таких, як волосся.

Висновки до розділу 4

Розроблено та описано структуру інформаційної технології синтезу тривимірного зображення користувача.

Розроблено та описано архітектуру системи синтезу аватара користувача на мобільній операційній системі iOS. Крім того, детально описано алгоритмічне забезпечення системи, включно з створенням USDZ-файлів, та висвітлено основні функціональні можливості, що лежать в основі роботи системи.

Встановлено, що система ефективно виконує синтез тривимірних зображень, полегшуючи взаємодію з користувачем за допомогою застосування змішаних форм. Ці висновки підтверджують ефективність розробки та функціонування системи в створенні динамічного та захоплюючого користувацького досвіду, підкріплюючи наукову цінність та практичну корисність розробленого рішення.

Представлено результати застосування розробленого методу синтезу тривимірних зображень користувачів у форматі USDZ на мобільній платформі iOS з впровадженням в ігровий рушій SceneKit. Розроблений метод демонструє широкі можливості для модифікації різних сегментів тривимірної сітки обличчя, таких, як очі, ніс, підборіддя чи губи. Покращення та варіативність морфінгових сегментів досягаються без необхідності розширення або модифікації наявної системи. Отримані результати демонструють можливість налаштовувати та персоналізувати тривимірне зображення користувача в режимі реального часу.

Продемонстровано результати розробленого методу шейдерного розфарбовування 3D-зображень користувачів у реальному часі. Незважаючи на незначне падіння частоти кадрів на одному з пристроїв для тестування, розроблена система підтримує стабільну частоту 60 кадрів у секунду на різних iOS пристроях, що підкреслює її надійність при коригуванні в реальному часі. Плавні кольорові трансформації в реальному часі, досягнуті завдяки

інтегрованому в iOS платформу фреймворку Metal, підкреслюють універсальність методу й потенціал для більш широкого застосування в середовищах ДР/ВР, підтверджуючи його ефективність і результативність у підвищенні інтерактивності та придатності до редагування користувачами.

Досліджено розроблену систему синтезу тривимірного зображення користувача для мобільної платформи iOS. Проведено аналіз, що оцінює ключові операційні показники, включно з енергетичним навантаження та тепловим станом пристрою, при збереженні стабільної продуктивності на рівні 60 кадрів у секунду. Представлені дані тестування підтверджують підвищення ефективності та стабільності системи, підкреслюючи практичну застосовність розроблених методів синтезу тривимірного зображення, шейдерного зафарбовування та синтезу текстур тривимірного зображення користувача.

Представлено порівняльний аналіз розроблених рішень з аналогічними сучасними рішеннями, що дає чітке уявлення про продуктивність системи в більш широкому контексті. Також розглянуті обмеження розроблених рішень та висвітлені потенційні шляхи для подальших досліджень і розробок.

Висновки

У дисертаційній роботі розв’язано актуальну наукову задачу синтезу та візуалізації аватара користувача з забезпеченням малого часу адаптації та врахування обмежених ресурсів системи на основі використання розроблених та вдосконалених методів та засобів.

Проведено огляд літератури, що включає порівняльний аналіз сучасних методів та засобів синтезу тривимірного зображення користувача та виявлено недоліки у форматах збереження тривимірних моделей, для використання на мобільних пристроях. Крім того, виявлено брак комплексних досліджень щодо інтеграції синтезованих тривимірних зображень у мобільні платформи з використанням технологій доповненої та/чи віртуальної реальності.

Визначено критерії для синтезу тривимірного зображення користувача в мобільних системах і за допомогою вирішення задачі багатокритеріальної оптимізації, встановлено, що USDZ — оптимальний формат файлів збереження тривимірних моделей для синтезу аватара користувача на iOS платформі.

Уперше розроблено метод синтезу тривимірного зображення користувача з застосуванням USDZ формату, що використовує набір із 52 змішаних форми для відображення різних виразів обличчя. Розроблений метод передбачає використання процесу морфінгу аватара користувача забезпечуючи складні структурні модифікації тривимірної моделі аватара, що дають змогу індивідуально налаштовувати відображення синтезованої 3D-моделі. Розроблений метод дає змогу зменшити розмір мобільного застосунку на iOS платформі до 3.75 разів в порівнянні з існуючими аналогами.

Удосконалено метод шейдерного зафарбовування аватара користувача для платформи iOS, що поєднує операцію текстурування з фрагментними шейдерами. Використовуючи ігровий рушій SceneKit та апаратний прискорювач Metal, показано, що ефективність зменшення обсягу використання текстур зросла на 57%.

Розроблено метод та алгоритм синтезу текстур тривимірного зображення користувача, що оптимізує конвеєр рендерингу, зменшуючи кількість обчислень у реальному часі та забезпечуючи стабільний користувацький досвід, навіть при частих модифікаціях відображення тривимірної моделі з плавністю 60 кадрів на секунду.

Розроблено структуру інформаційної технології синтезу тривимірного зображення користувача з врахуванням обмежених ресурсів мобільної системи доповненої реальності, що забезпечує зменшення часу візуалізації аватара користувача. Розроблено архітектуру системи синтезу тривимірних зображень користувача на платформі iOS. Протестовано алгоритм системи синтезу тривимірного зображення користувача з урахуванням енергоспоживання та теплового стану пристрою. Підтверджено надійність та ефективність розробленої системи, особливо під час взаємодії користувача із синтезованими моделями.

Продемонстровано результати застосування розробленого методу синтезу на мобільній платформі iOS, що підтверджують можливість складних налаштувань та персоналізації тривимірного зображення обличчя користувача в режимі реального часу.

Отримано результати застосування методу шейдерного зафарбовування для тривимірного зображення користувача, що демонструють надійну продуктивність, стабільно досягаючи від 50 до 60 кадрів на секунду на різних iOS пристроях.

Проведено порівняння розробленої системи синтезу тривимірного зображення користувача з наявними сучасними рішеннями. Виявлено переваги, недоліки та обмеження розробленої системи. Запропоновано майбутні напрямки досліджень.

Список використаних джерел

- [1] Д. В. Островка і В. М. Теслюк, «Синтез моделі навколишнього середовища з використанням вбудованих у мобільні пристрої сенсорів на платформі iOS», *Науковий Вісник НЛТУ України*, вип. 32, вип. 5, Art. вип. 5, 2022, doi: 10.36930/40320512.
- [2] Д. Островка, В. Теслюк, і Н. Ріпак, «Система аналізу графічних форматів тривимірних об'єктів», *Комп'ютерні Технології Друкарства*, вип. 2, с. 58–76, 2022, doi: 10.32403/2411-9210-2022-2-48-58-76.
- [3] Д. В. Островка і В. М. Теслюк, «Модель синтезу тривимірного зображення користувача на підставі ігрового рушія SceneKit та USDZ формату під ОС IOS», *Науковий Вісник НЛТУ України*, вип. 33, вип. 1, Art. вип. 1, 2023, doi: 10.36930/40330112.
- [4] Д. В. Островка і В. М. Теслюк, «Метод модифікації геометрії 3D-поверхонь в USDZ-форматі з подальшим впровадженням в ігровий рушій SceneKit», *Науковий Вісник НЛТУ України*, вип. 33, вип. 2, Art. вип. 2, 2023, doi: 10.36930/40330209.
- [5] Д. В. Островка і В. М. Теслюк, «Розробка методу зміни властивостей поверхонь тривимірного аватару користувача», *Technol. Audit Prod. Reserv.*, вип. 2, вип. 2(70), Art. вип. 2(70), 2023, doi: 10.15587/2706-5448.2023.277933.
- [6] D. Ostrovka, T. Teslyuk, P. Veselý, і I. Prots'ko, «The Analysis and Comparison of File Formats for the Construction of iOS OS Three-dimensional Objects for Augmented Reality Systems», представлена на DCSMart, Lviv, Ukraine, 2019.
- [7] D. Ostrovka і V. Teslyuk, «The Analysis of File Format Conversion Tools for Storing 3D Objects for the iOS Platform», представлена на MoMLet&DS, Lviv, Ukraine, 2020.
- [8] D. Ostrovka, V. Teslyuk, M. Seneta, I. Kazymyra, і T. Smerdova, «A Method for Modifying the Geometry of 3D Surfaces in USDZ Format with Further Implementation in the SceneKit Game Engine», представлена на MoMLet&DS, Lviv, Ukraine, 2023, с. 435–445.

- [9] D. Ostrovka i V. Teslyuk, «The current state and prospects of advanced reality technology in smart mobile devices», в *Selected aspects of digital society development*, в Series of Monographs / Faculty of Architecture, Civil Engineering and Applied Arts. University of Technology, Katowice, no. monograph 45. , Katowice, Poland: Publishing House of University of Technology, 2021, с. 179.
- [10] G. Lin, T. Panigrahi, J. Womack, D. J. Ponda, P. Kotipalli, i T. Starner, «Comparing Order Picking Guidance with Microsoft Hololens, Magic Leap, Google Glass XE and Paper», в *Proceedings of the 22nd International Workshop on Mobile Computing Systems and Applications*, в HotMobile '21. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2021, с. 133–139. doi: 10.1145/3446382.3448729.
- [11] J. Fu *et al.*, «Recent Advancements in Augmented Reality for Robotic Applications: A Survey», *Actuators*, вип. 12, вип. 8, Art. вип. 8, 2023, doi: 10.3390/act12080323.
- [12] Skarredghost, «Augmented reality is reaching a mature state according to Gartner», The Ghost Howls. Дата звернення: 01, Жовтень 2023. [Online]. Доступний у: <https://skarredghost.com/2019/09/04/augmented-reality-mature-gartner/>
- [13] P. Nowacki i M. Woda, «Capabilities of ARCore and ARKit Platforms for AR/VR Applications», в *Engineering in Dependability of Computer Systems and Networks*, W. Zamojski, J. Mazurkiewicz, J. Sugier, T. Walkowiak, i J. Kacprzyk, Ред., в *Advances in Intelligent Systems and Computing*. Cham: Springer International Publishing, 2020, с. 358–370. doi: 10.1007/978-3-030-19501-4_36.
- [14] T. Wolf *et al.*, «Transformers: State-of-the-Art Natural Language Processing», в *Proceedings of the 2020 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing: System Demonstrations*, Online: Association for Computational Linguistics, 2020, с. 38–45. doi: 10.18653/v1/2020.emnlp-demos.6.

- [15] K. Lee, «Augmented Reality in Education and Training», *TechTrends*, вип. 56, вип. 2, с. 13–21, 2012, doi: 10.1007/s11528-012-0559-3.
- [16] J. Iqbal i M. S. Sidhu, «A review on making things see: Augmented reality for futuristic virtual educator», *Cogent Educ.*, вип. 4, вип. 1, с. 1287392, 2017, doi: 10.1080/2331186X.2017.1287392.
- [17] İ. Akkuş i P. Y. Arslan, «The Effects of Augmented Reality in the Technical Drawing Course on Engineering Students' Spatial Ability and Academic Achievement», *J. Learn. Teach. Digit. Age*, вип. 7, вип. 2, Art. вип. 2, 2022, doi: 10.53850/joltida.1020075.
- [18] E. Zhu, A. Hadadgar, I. Masiello, i N. Zary, «Augmented reality in healthcare education: an integrative review», *PeerJ*, вип. 2, с. e469, 2014, doi: 10.7717/peerj.469.
- [19] C. Kamphuis, E. Barsom, M. Schijven, i N. Christoph, «Augmented reality in medical education?», вип. 3, вип. 4, Art. вип. 4, 2014, doi: 10.1007/S40037-013-0107-7.
- [20] J. Gerup, C. B. Soerensen, i P. Dieckmann, «Augmented reality and mixed reality for healthcare education beyond surgery: an integrative review», *Int J Med Educ*, вип. 11, с. 1–18, 2020, doi: 10.5116/ijme.5e01.eb1a.
- [21] S. Meža, Ž. Turk, i M. Dolenc, «Component based engineering of a mobile BIM-based augmented reality system», *Autom. Constr.*, вип. 42, с. 1–12, 2014, doi: 10.1016/j.autcon.2014.02.011.
- [22] E. Bottani i G. Vignali, «Augmented reality technology in the manufacturing industry: A review of the last decade», *IIE Trans.*, вип. 51, вип. 3, с. 284–310, 2019, doi: 10.1080/24725854.2018.1493244.
- [23] J. C. P. Cheng, K. Chen, i W. Chen, «State-of-the-Art Review on Mixed Reality Applications in the AECO Industry», *J. Constr. Eng. Manag.*, вип. 146, вип. 2, с. 03119009, 2020, doi: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001749.
- [24] S. Meža, Ž. Turk, i M. Dolenc, «Measuring the potential of augmented reality in civil engineering», *Adv. Eng. Softw.*, вип. 90, с. 1–10, 2015, doi: 10.1016/j.advengsoft.2015.06.005.

- [25] «Pokemon GO Officially Hits 1 Billion Downloads Worldwide – NintendoSoup». Дата звернення: 01, Жовтень 2023. [Online]. Доступний у: <https://nintendosoup.com/pokemon-go-officially-hits-1-billion-downloads-worldwide/>
- [26] «Most popular messaging apps 2023 | Statista». Дата звернення: 01, Жовтень 2023. [Online]. Доступний у: <https://www.statista.com/statistics/258749/most-popular-global-mobile-messenger-apps/>
- [27] «Snap Inc. Announces Second Quarter 2020 Financial Results». Дата звернення: 01, Жовтень 2023. [Online]. Доступний у: <https://investor.snap.com/news/news-details/2020/Snap-Inc.-Announces-Second-Quarter-2020-Financial-Results/default.aspx>
- [28] «About Augmented Reality Ads», Meta Business Help Center. Дата звернення: 01, Жовтень 2023. [Online]. Доступний у: <https://www.facebook.com/business/help/2666931346707691>
- [29] L. H. Lee, T. Braud, K. Y. Lam, Y. P. Yau, i P. Hui, «From seen to unseen: Designing keyboard-less interfaces for text entry on the constrained screen real estate of Augmented Reality headsets», *Pervasive Mob. Comput.*, вип. 64, с. 101148, 2020, doi: 10.1016/j.pmcj.2020.101148.
- [30] G. Pleyers i I. Poncin, «Non-immersive virtual reality technologies in real estate: How customer experience drives attitudes toward properties and the service provider», *J. Retail. Consum. Serv.*, вип. 57, с. 102175, 2020, doi: 10.1016/j.jretconser.2020.102175.
- [31] M. Wedel, E. Bigné, i J. Zhang, «Virtual and augmented reality: Advancing research in consumer marketing», *Int. J. Res. Mark.*, вип. 37, вип. 3, с. 443–465, 2020, doi: 10.1016/j.ijresmar.2020.04.004.
- [32] «ARKit-only Apps Surpass 13 Million Downloads in First Six Months, Nearly Half from Games». Дата звернення: 01, Жовтень 2023. [Online]. Доступний у: <https://sensortower.com/blog/arkit-six-months>

- [33] M. Y.-C. Yim, S.-C. Chu, i P. L. Sauer, «Is Augmented Reality Technology an Effective Tool for E-commerce? An Interactivity and Vividness Perspective», *J. Interact. Mark.*, вип. 39, вип. 1, с. 89–103, 2017, doi: 10.1016/j.intmar.2017.04.001.
- [34] G. McLean i A. Wilson, «Shopping in the digital world: Examining customer engagement through augmented reality mobile applications», *Comput. Hum. Behav.*, вип. 101, с. 210–224, 2019, doi: 10.1016/j.chb.2019.07.002.
- [35] P. Kowalczyk, C. Siepmann (née Scheiben), i J. Adler, «Cognitive, affective, and behavioral consumer responses to augmented reality in e-commerce: A comparative study», *J. Bus. Res.*, вип. 124, с. 357–373, 2021, doi: 10.1016/j.jbusres.2020.10.050.
- [36] «Sales at 30 September 2018», L'Oréal Finance. Дата звернення: 01, Жовтень 2023. [Online]. Доступний у: <https://www.loreal-finance.com/eng/news-release/sales-30-september-2018>
- [37] S. Barta, R. Gurrea, i C. Flavián, «Using augmented reality to reduce cognitive dissonance and increase purchase intention», *Comput. Hum. Behav.*, вип. 140, с. 107564, 2023, doi: 10.1016/j.chb.2022.107564.
- [38] J. Brannon Barhorst, G. McLean, E. Shah, i R. Mack, «Blending the real world and the virtual world: Exploring the role of flow in augmented reality experiences», *J. Bus. Res.*, вип. 122, с. 423–436, 2021, doi: 10.1016/j.jbusres.2020.08.041.
- [39] «Wavefront OBJ: Summary from the Encyclopedia of Graphics File Formats». Дата звернення: 01, Жовтень 2023. [Online]. Доступний у: <https://www.fileformat.info/format/wavefrontobj/egff.htm>
- [40] «FBX | Adaptable File Formats for 3D Animation Software | Autodesk». Дата звернення: 01, Жовтень 2023. [Online]. Доступний у: <https://www.autodesk.com/products/fbx/overview>
- [41] «COLLADA - 3D Asset Exchange Schema», The Khronos Group. Дата звернення: 01, Жовтень 2023. [Online]. Доступний у: <https://www.khronos.org/>

- [42] «USDZ schemas for AR», Apple Developer Documentation. Дата звернення: 01, Жовтень 2023. [Online]. Доступний у: https://developer.apple.com/documentation/arkit/arkit_in_ios/usdz_schemas_for_ar
- [43] «OpenSubdiv from research to industry adoption», в *ACM SIGGRAPH 2013 Courses*, в SIGGRAPH '13. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2013, с. 1. doi: 10.1145/2504435.2504451.
- [44] V. Blanz і T. Vetter, «A morphable model for the synthesis of 3D faces», в *Proceedings of the 26th annual conference on Computer graphics and interactive techniques - SIGGRAPH '99*, Not Known: ACM Press, 1999, с. 187–194. doi: 10.1145/311535.311556.
- [45] S. G. Kong і R. O. Mbouna, «Head Pose Estimation From a 2D Face Image Using 3D Face Morphing With Depth Parameters», *IEEE Trans. Image Process.*, вип. 24, вип. 6, с. 1801–1808, 2015, doi: 10.1109/TIP.2015.2405483.
- [46] G. Baldi, R. Allègre, і J.-M. Dischler, «Differentiable point process texture basis functions for inverse procedural modeling of cellular stochastic structures», *Comput. Graph.*, вип. 112, с. 116–131, 2023, doi: 10.1016/j.cag.2023.04.004.
- [47] A. S. Jackson, A. Bulat, V. Argyriou, і G. Tzimiropoulos, «Large Pose 3D Face Reconstruction from a Single Image via Direct Volumetric CNN Regression». arXiv, 2017. doi: 10.48550/arXiv.1703.07834.
- [48] A. Morales, G. Piella, і F. M. Sukno, «Survey on 3D face reconstruction from uncalibrated images», *Comput. Sci. Rev.*, вип. 40, с. 100400, 2021, doi: 10.1016/j.cosrev.2021.100400.
- [49] J. Lin, L. Li, Y. Yuan, і Z. Zou, «Realistic Game Avatars Auto-Creation from Single Images via Three-pathway Network», в *2022 IEEE Conference on Games (CoG)*, 2022, с. 33–40. doi: 10.1109/CoG51982.2022.9893688.
- [50] J. Dupuy, E. Heitz, J.-C. Iehl, P. Poulin, F. Neyret, і V. Ostromoukhov, «Linear efficient antialiased displacement and reflectance mapping», *ACM Trans. Graph.*, вип. 32, вип. 6, с. 211:1-211:11, 2013, doi: 10.1145/2508363.2508422.

- [51] K. Picos, V. H. Díaz-Ramírez, i J. J. Tapia, «A roadmap to global illumination in 3D scenes: solutions for GPU object recognition applications», в *Optics and Photonics for Information Processing VIII*, SPIE, 2014, с. 37–48. doi: 10.1117/12.2062039.
- [52] S. Georgoulis *et al.*, «Reflectance and Natural Illumination from Single-Material Specular Objects Using Deep Learning», *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, вып. 40, вып. 8, с. 1932–1947, 2018, doi: 10.1109/TPAMI.2017.2742999.
- [53] E. Wood *et al.*, «3D Face Reconstruction with Dense Landmarks», в *Computer Vision – ECCV 2022*, S. Avidan, G. Brostow, M. Cissé, G. M. Farinella, i T. Hassner, Ред., в *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 13673. Cham: Springer Nature Switzerland, 2022, с. 160–177. doi: 10.48550/arXiv.2204.02776.
- [54] C. Raman, C. Hewitt, E. Wood, i T. Baltrusaitis, «Mesh-Tension Driven Expression-Based Wrinkles for Synthetic Faces», в *2023 IEEE/CVF Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV)*, Waikoloa, HI, USA: IEEE, 2023, с. 3504–3514. doi: 10.1109/WACV56688.2023.00351.
- [55] L. Li, F. Liu, C. Li, i G. Chen, «Realistic wrinkle generation for 3D face modeling based on automatically extracted curves and improved shape control functions», *Comput. Graph.*, вып. 35, вып. 1, с. 175–184, 2011, doi: 10.1016/j.cag.2010.08.003.
- [56] D. Jiang *et al.*, «Sphere Face Model: A 3D Morphable Model with Hypersphere Manifold Latent Space». arXiv, 2021. doi: 10.48550/arXiv.2112.02238.
- [57] X. You, F. Tian, i W. Tang, «Highly efficient facial blendshape animation with analytical dynamic deformations», *Multimed. Tools Appl.*, вып. 78, вып. 18, с. 25569–25590, 2019, doi: 10.1007/s11042-019-7671-8.
- [58] H. Fu, S. Bian, E. Chaudhry, S. Wang, L. You, i J. J. Zhang, «PDE Surface-Represented Facial Blendshapes», *Mathematics*, вып. 9, вып. 22, с. 2905, 2021, doi: 10.3390/math9222905.

- [59] C. Seibold, W. Samek, A. Hilsmann, i P. Eisert, «Accurate and robust neural networks for face morphing attack detection», *J. Inf. Secur. Appl.*, вип. 53, с. 102526, 2020, doi: 10.1016/j.jisa.2020.102526.
- [60] H. Dai, N. Pears, P. Huber, i W. A. P. Smith, «3D Morphable Models: The Face, Ear and Head», в *3D Imaging, Analysis and Applications*, Y. Liu, N. Pears, P. L. Rosin, i P. Huber, Ред., Cham: Springer International Publishing, 2020, с. 463–512. doi: 10.1007/978-3-030-44070-1_10.
- [61] Y. Qiu *et al.*, «3DCaricShop: A Dataset and A Baseline Method for Single-view 3D Caricature Face Reconstruction», в *2021 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Nashville, TN, USA: IEEE, 2021, с. 10231–10240. doi: 10.1109/CVPR46437.2021.01010.
- [62] K. Nagano *et al.*, «paGAN: real-time avatars using dynamic textures», *ACM Trans. Graph.*, вип. 37, вип. 6, с. 258:1-258:12, 2018, doi: 10.1145/3272127.3275075.
- [63] L. Zhang *et al.*, «DreamFace: Progressive Generation of Animatable 3D Faces under Text Guidance», *ACM Trans. Graph.*, вип. 42, вип. 4, с. 1–16, 2023, doi: 10.1145/3592094.
- [64] Z. Lin, J. Lin, L. Li, Y. Yuan, i Z. Zou, «High-Quality 3D Face Reconstruction with Affine Convolutional Networks», в *Proceedings of the 30th ACM International Conference on Multimedia*, Lisboa Portugal: ACM, 2022, с. 2495–2503. doi: 10.1145/3503161.3548421.
- [65] D. Jiang *et al.*, «Sphere Face Model: A 3D morphable model with hypersphere manifold latent space using joint 2D/3D training», *Comput. Vis. Media*, вип. 9, вип. 2, с. 279–296, 2023, doi: 10.1007/s41095-022-0286-4.
- [66] I. Masi, A. T. Trần, T. Hassner, J. T. Leksut, i G. Medioni, «Do We Really Need to Collect Millions of Faces for Effective Face Recognition?», в *Computer Vision – ECCV 2016*, B. Leibe, J. Matas, N. Sebe, i M. Welling, Ред., Cham: Springer International Publishing, 2016, с. 579–596. doi: 10.1007/978-3-319-46454-1_35.

- [67] D. Ma, J. Correll, i B. Wittenbrink, «The Chicago face database: A free stimulus set of faces and norming data», *Behav. Res. Methods*, вип. 47, 2015, doi: 10.3758/s13428-014-0532-5.
- [68] M. Walker, S. Schönborn, R. Greifeneder, i T. Vetter, «The Basel Face Database: A validated set of photographs reflecting systematic differences in Big Two and Big Five personality dimensions», *PLoS ONE*, вип. 13, 2018, doi: 10.1371/journal.pone.0193190.
- [69] S. Saito, L. Hu, C. Ma, H. Ibayashi, L. Luo, i H. Li, «3D hair synthesis using volumetric variational autoencoders», *ACM Trans. Graph.*, вип. 37, вип. 6, с. 208:1-208:12, 2018, doi: 10.1145/3272127.3275019.
- [70] C. Wu *et al.*, «Model-based teeth reconstruction», *ACM Trans. Graph.*, вип. 35, с. 1–13, 2016, doi: 10.1145/2980179.2980233.
- [71] Z. Velinov *et al.*, «Appearance Capture and Modeling of Human Teeth», *ACM Trans Graph*, вип. 37, вип. 6, 2018, doi: 10.1145/3272127.3275098.
- [72] A. Hewer, S. Wuhler, I. Steiner, i K. Richmond, «A multilinear tongue model derived from speech related MRI data of the human vocal tract», *Comput. Speech Lang.*, вип. 51, с. 68–92, Бер 2018, doi: 10.1016/j.csl.2018.02.001.
- [73] A. Serrurier, P. Badin, L. Lamalle, i C. Neuschaefer-Rube, «Characterization of inter-speaker articulatory variability: A two-level multi-speaker modelling approach based on MRI data», *J. Acoust. Soc. Am.*, вип. 145, вип. 4, с. 2149, Квіт 2019, doi: 10.1121/1.5096631.
- [74] C. Peng i Y. Cao, «A GPU-based Approach for Massive Model Rendering with Frame-to-Frame Coherence», *Comput. Graph. Forum*, вип. 31, вип. 2pt2, с. 393–402, 2012, doi: 10.1111/j.1467-8659.2012.03018.x.
- [75] S. Hachicha, A. Elkefi, i C. Ben Amar, «Optimization techniques of static 3D triangular mesh compression: A survey», в *2015 15th International Conference on Intelligent Systems Design and Applications (ISDA)*, 2015, с. 398–403. doi: 10.1109/ISDA.2015.7489262.
- [76] L. Hu, C. Ma, L. Luo, L.-Y. Wei, i H. Li, «Capturing Braided Hairstyles», *ACM Trans. Graph.*, вип. 33, Лис 2014, doi: 10.1145/2661229.2661254.

- [77] J. Echevarria, D. Bradley, D. Gutiérrez, i T. Beeler, «Capturing and Stylizing Hair for 3D Fabrication», *ACM Trans. Graph.*, вип. 33, с. 1–11, Лип 2014, doi: 10.1145/2601097.2601133.
- [78] V. Teslyuk, Д. Веніков, А. Зелінський, i О. Борейко, «Методи розв’язання задач багатокритеріальної оптимізації на основі зведення до розв’язання однокритеріальних», в *Проектування інформаційних управляючих систем екологічного моніторингу*, 2018.
- [79] V. Teslyuk, Д. Веніков, А. Зелінський, i О. Борейко, «Методи розв’язання задач багатокритеріальної оптимізації на основі побудови множини Парето», в *Проектування інформаційних управляючих систем екологічного моніторингу*, 2018.
- [80] R. T. Marler i J. S. Arora, «Survey of multi-objective optimization methods for engineering», *Struct. Multidiscip. Optim.*, вип. 26, вип. 6, с. 369–395, 2004, doi: 10.1007/s00158-003-0368-6.
- [81] J. S. Arora, «Chapter 18 - Multi-objective Optimum Design Concepts and Methods», в *Introduction to Optimum Design (Fourth Edition)*, J. S. Arora, Ред., Boston: Academic Press, 2017, с. 771–794. doi: 10.1016/B978-0-12-800806-5.00018-4.
- [82] V. Teslyuk, *МОДЕЛІ ТА ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ СИНТЕЗУ МІКРОЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ*, Видавництво ПП "Вежа і Ко". 2008.
- [83] S. Ploumpis *et al.*, «Towards a Complete 3D Morphable Model of the Human Head», *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, вип. 43, вип. 11, с. 4142–4160, 2021, doi: 10.1109/TPAMI.2020.2991150.
- [84] H. Xu, L. Dai, J. Fu, X. Wang, i Q. Wang, «High-Quality Real Time Facial Capture Based on Single Camera», 2021, doi: 10.48550/arXiv.2111.07556.
- [85] C. Cao, Q. Hou, i K. Zhou, «Displaced dynamic expression regression for real-time facial tracking and animation», *ACM Trans. Graph.*, вип. 33, вип. 4, с. 1–10, 2014, doi: 10.1145/2601097.2601204.

- [86] M. Radovan, «Facial Modelling and animation trends in the new millennium : a survey», 2008.
- [87] D. Thomas, «Real-time Simultaneous 3D Head Modeling and Facial Motion Capture with an RGB-D camera». arXiv, 2020. doi: 10.48550/arXiv.2004.10557.
- [88] H. Dai, N. Pears, W. Smith, i C. Duncan, «A 3D Morphable Model of Craniofacial Shape and Texture Variation», в *2017 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*, 2017, с. 3104–3112. doi: 10.1109/ICCV.2017.335.
- [89] C. Donner i H. W. Jensen, «Light diffusion in multi-layered translucent materials», *ACM Trans. Graph.*, вып. 24, вып. 3, с. 1032–1039, 2005, doi: 10.1145/1073204.1073308.
- [90] J. J. Scott i N. A. Dodgson, «Evaluating Realism in Example-based Terrain Synthesis», *ACM Trans. Appl. Percept.*, вып. 19, вып. 3, с. 1–18, 2022, doi: 10.1145/3531526.
- [91] X. Cai, Z. Yang, H. Sun, A. Gozho, Y. Ge, i R. Cai, «Terrain Elevation Map Synthesis Method based on Single Sample and User Sketch», *Int. J. Pattern Recognit. Artif. Intell.*, вып. 35, вып. 05, с. 2154016, 2021, doi: 10.1142/S0218001421540161.
- [92] H. F. Machado, «Procedural Generation of Volumetric Data for Terrain», 2019.
- [93] C. Koniaris, D. Cosker, i X. Yang, «Survey of Texture Mapping Techniques for Representing and Rendering Volumetric Mesostructure», 2013.
- [94] E. Galin *et al.*, «A Review of Digital Terrain Modeling», *Comput. Graph. Forum*, вып. 38, вып. 2, с. 553–577, 2019, doi: 10.1111/cgf.13657.
- [95] G. S. P. Miller, «The definition and rendering of terrain maps», в *Proceedings of the 13th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, в SIGGRAPH '86. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 1986, с. 39–48. doi: 10.1145/15922.15890.

- [96] J. J. Scott i N. A. Dodgson, «Example-based terrain synthesis with pit removal», *Comput. Graph.*, вип. 99, с. 43–53, 2021, doi: 10.1016/j.cag.2021.06.012.
- [97] J. Nohel, P. Zahradnicek, Z. Flasar, i L. Rak, «Possibilities of Modelling the Coordinated Maneuver of Units in Difficult Terrain Conditions», в *2021 Communication and Information Technologies (KIT)*, Vysoke Tatry, Slovakia: IEEE, 2021, с. 1–5. doi: 10.1109/KIT52904.2021.9583742.
- [98] E. d'Eon, D. Luebke, i E. Enderton, «Efficient Rendering of Human Skin», представлена на Eurographics Symposium on Rendering Techniques, Grenoble, France, 2007, с. 157. doi: 10.2312/EGWR/EGSR07/147-157.
- [99] О. Романюк, *Високопродуктивні методи та засоби кінцевої візуалізації тривимірних зображень у системах комп'ютерної графіки*. Вінниця: УНІБЕСУМ-Вінниця, 2006.
- [100] G. Turk, «Texture synthesis on surfaces», в *Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, в SIGGRAPH '01. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2001, с. 347–354. doi: 10.1145/383259.383297.
- [101] K. Lawonn, I. Viola, B. Preim, i T. Isenberg, «A Survey of Surface-Based Illustrative Rendering for Visualization», *Comput. Graph. Forum*, вип. 37, вип. 6, с. 205–234, 2018, doi: 10.1111/cgf.13322.
- [102] T.-C. Wang, M.-Y. Liu, J.-Y. Zhu, A. Tao, J. Kautz, i B. Catanzaro, «High-Resolution Image Synthesis and Semantic Manipulation with Conditional GANs», в *2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2018, с. 8798–8807. doi: 10.1109/CVPR.2018.00917.
- [103] L. Liu *et al.*, «Learning Dynamic Textures for Neural Rendering of Human Actors», *IEEE Trans. Vis. Comput. Graph.*, вип. 27, вип. 10, с. 4009–4022, 2021, doi: 10.1109/TVCG.2020.2996594.
- [104] L. E. Gamboa, J.-P. Guertin, i D. Nowrouzezahrai, «Scalable appearance filtering for complex lighting effects», *ACM Trans. Graph.*, вип. 37, вип. 6, с. 277:1-277:13, 2018, doi: 10.1145/3272127.3275058.

- [105] B. Wang, H. Deng, i N. Holzschuch, «Real-Time Glints Rendering With Pre-Filtered Discrete Stochastic Microfacets», *Comput. Graph. Forum*, вип. 39, вип. 6, с. 144–154, 2020, doi: 10.1111/cgf.14007.
- [106] X. Chermain, B. Sauvage, J.-M. Dischler, i C. Dachsbacher, «Procedural Physically based BRDF for Real-Time Rendering of Glints», *Comput. Graph. Forum*, вип. 39, вип. 7, с. 243–253, 2020, doi: 10.1111/cgf.14141.
- [107] J. Zhu, S. Zhao, Y. Xu, X. Meng, L. Wang, i L.-Q. Yan, «Recent advances in glinty appearance rendering», *Comput. Vis. Media*, вип. 8, вип. 4, с. 535–552, 2022, doi: 10.1007/s41095-022-0280-x.
- [108] E. Heitz, D. Nowrouzezahrai, P. Poulin, i F. Neyret, «Filtering color mapped textures and surfaces», в *Proceedings of the ACM SIGGRAPH Symposium on Interactive 3D Graphics and Games*, в I3D '13. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2013, с. 129–136. doi: 10.1145/2448196.2448217.
- [109] C. Grenier, B. Sauvage, J.-M. Dischler, i S. Thery, «Color-mapped Noise Vector Fields for Generating Procedural Micro-patterns», 2022, doi: 10.1111/cgf.14693.
- [110] K. He, X. Zhang, S. Ren, i J. Sun, «Deep Residual Learning for Image Recognition», в *2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2016, с. 770–778. doi: 10.1109/CVPR.2016.90.
- [111] N. Pietroni, P. Cignoni, M. Otaduy, i R. Scopigno, «Solid-Texture Synthesis: A Survey», *IEEE Comput. Graph. Appl.*, вип. 30, вип. 4, с. 74–89, 2010, doi: 10.1109/MCG.2009.153.
- [112] J. Chen i B. Wang, «High quality solid texture synthesis using position and index histogram matching», *Vis. Comput.*, вип. 26, вип. 4, с. 253–262, 2010, doi: 10.1007/s00371-009-0408-3.
- [113] V. I. Gonakhchyan, «Performance Model of Graphics Pipeline for a One-Pass Rendering of 3D Dynamic Scenes», *Program. Comput. Softw.*, вип. 47, вип. 7, с. 522–533, 2021, doi: 10.1134/S0361768821070057.

- [114] A. Lattas *et al.*, «AvatarMe: Realistically Renderable 3D Facial Reconstruction “In-the-Wild”», в *2020 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Seattle, WA, USA: IEEE, 2020, с. 757–766. doi: 10.1109/CVPR42600.2020.00084.
- [115] G.-H. Lee и S.-W. Lee, «Uncertainty-Aware Mesh Decoder for High Fidelity 3D Face Reconstruction», в *2020 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Seattle, WA, USA: IEEE, 2020, с. 6099–6108. doi: 10.1109/CVPR42600.2020.00614.
- [116] H. Luo *et al.*, «Normalized Avatar Synthesis Using StyleGAN and Perceptual Refinement». arXiv, 2021. doi: 10.48550/arXiv.2106.11423.
- [117] A. Ranjan, T. Bolkart, S. Sanyal, и M. J. Black, «Generating 3D faces using Convolutional Mesh Autoencoders». arXiv, 2018. doi: 10.48550/arXiv.1807.10267.
- [118] S. Lombardi, J. Saragih, T. Simon, и Y. Sheikh, «Deep Appearance Models for Face Rendering», *ACM Trans. Graph.*, вып. 37, вып. 4, с. 1–13, 2018, doi: 10.1145/3197517.3201401.
- [119] Z. Ye *et al.*, «3D-CariGAN: An End-to-End Solution to 3D Caricature Generation from Face Photos», *IEEE Trans. Vis. Comput. Graph.*, вып. 29, вып. 4, с. 2203–2210, 2023, doi: 10.1109/TVCG.2021.3126659.
- [120] H. Cai, Y. Guo, Z. Peng, и J. Zhang, «Landmark Detection and 3D Face Reconstruction for Caricature using a Nonlinear Parametric Model», 2020, doi: 10.48550/ARXIV.2004.09190.
- [121] T. Shi *et al.*, «Fast and Robust Face-to-Parameter Translation for Game Character Auto-Creation», *Proc. AAAI Conf. Artif. Intell.*, вып. 34, вып. 02, Art. вып. 02, 2020, doi: 10.1609/aaai.v34i02.5537.
- [122] J. Lin, Y. Yuan, и Z. Zou, «MeInGame: Create a Game Character Face from a Single Portrait», *Proc. AAAI Conf. Artif. Intell.*, вып. 35, вып. 1, Art. вып. 1, 2021, doi: 10.1609/aaai.v35i1.16106.

- [123] S. Sang *et al.*, «AgileAvatar: Stylized 3D Avatar Creation via Cascaded Domain Bridging», в *SIGGRAPH Asia 2022 Conference Papers*, Daegu Republic of Korea: ACM, 2022, с. 1–8. doi: 10.1145/3550469.3555402.
- [124] A. E. Ichim, S. Bouaziz, i M. Pauly, «Dynamic 3D avatar creation from handheld video input», *ACM Trans. Graph.*, вып. 34, вып. 4, с. 1–14, 2015, doi: 10.1145/2766974.
- [125] B. Egger *et al.*, «3D Morphable Face Models—Past, Present, and Future», *ACM Trans. Graph.*, вып. 39, вып. 5, с. 1–38, 2020, doi: 10.1145/3395208.
- [126] M. Li, B. Huang, i G. Tian, «A comprehensive survey on 3D face recognition methods», *Eng. Appl. Artif. Intell.*, вып. 110, с. 104669, 2022, doi: 10.1016/j.engappai.2022.104669.
- [127] J. Gui, Y. Zhang, i S. Li, «Realistic 3D Facial Wrinkles Simulation Based on Tessellation», в *2016 9th International Symposium on Computational Intelligence and Design (ISCID)*, Hangzhou: IEEE, 2016, с. 250–254. doi: 10.1109/ISCID.2016.1064.
- [128] Y. Abdallah, A. Abdelhamid, T. Elarif, i A.-B. M. Salem, «Comparison between OpenGL ES and metal API in medical volume visualisation», в *2015 IEEE Seventh International Conference on Intelligent Computing and Information Systems (ICICIS)*, 2015, с. 156–160. doi: 10.1109/IntelCIS.2015.7397213.
- [129] T. Beeler *et al.*, «Coupled 3D reconstruction of sparse facial hair and skin», *ACM Trans. Graph.*, вып. 31, с. 1–10, 2012, doi: 10.1145/2185520.2335468.
- [130] Z. Xu, H.-T. Wu, L. Wang, C. Zheng, X. Tong, i Y. Qi, «Dynamic Hair Capture using Spacetime Optimization», *ACM Trans. Graph.*, вып. 33, с. 1–11, 2014, doi: 10.1145/2661229.2661284.

ДОДАТОК А. АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ



ЗАТВЕРДЖУЮ
Проректор з наукової роботи
Національного університету
«Львівська політехніка»
д.т.н., проф. Іван ДЕМИДОВ
« 18 » _____ 2023 р.

АКТ

про використання результатів дисертаційної роботи
Островки Дмитра Васильовича
«Інформаційна технологія синтезу тривимірного зображення користувача
для мобільних систем доповненої реальності»,
представленої на здобуття наукового ступеня доктора філософії за
спеціальністю 122 «Комп'ютерні науки»,
при виконанні науково-дослідної роботи за темою:
«Експериментальна мобільна робототехнічна платформа з інтелектуальною
системою управління та захистом передачі даних»

Комісія у складі – начальника НДЧ д.т.н., ст. досл. Романа НЕБЕСНОГО та членів: зав. відділу науково-організаційного супроводу наукових досліджень к.т.н. Галини ЛАЗЬКО, заступника завідувача кафедри АСУ з наукової роботи к.т.н., доц. Юрія ЦИМБАЛА та заст. начальника планово-фінансового відділу Ірини ФАСТ цим актом підтверджують, що результати дисертаційної роботи здобувача наукового ступеня доктора філософії Островки Дмитра Васильовича на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 122 «Комп'ютерні науки» використані при виконанні науково-дослідної роботи, яка виконувалась за рахунок коштів загального фонду державного бюджету за темою: «Експериментальна мобільна робототехнічна платформа з інтелектуальною системою управління та захистом передачі даних» (номер державної реєстрації 0122U000891).

Дмитром ОСТРОВКОЮ розроблено архітектуру та алгоритмічне забезпечення системи синтезу тривимірного зображення користувача на мобільних платформах (Розділ 4.1 та Розділ 4.2) яких забезпечує покращену взаємодію з користувачем та безпечну інтеграцію даних в системі управління робототехнічної платформи.

Голова комісії:

Начальник науково-дослідної частини,
д.т.н., ст. досл.

Роман НЕБЕСНИЙ

Члени комісії:

Зав.відділу науково-організаційного
супроводу наукових досліджень

Галина ЛАЗЬКО

В.о. заступника начальника
планово-фінансового відділу

Ірина ФАСТ

Заступник завідувача кафедри АСУ
з наукової роботи, к.т.н., доц.

Юрій ЦИМБАЛ



ЗАТВЕРДЖУЮ
Проректор з наукової роботи
Національного університету
«Львівська політехніка»
д.т.н., проф. Іван ДЕМИДОВ
«15» 10 2023 р.

АКТ

про використання результатів дисертаційної роботи
Островки Дмитра Васильовича
«Інформаційна технологія синтезу тривимірного зображення користувача
для мобільних систем доповненої реальності»,
представленої на здобуття наукового ступеня доктора філософії за
спеціальністю 122 «Комп'ютерні науки»,
при виконанні науково-дослідної роботи за темою:
«Експериментальна система нейромережевого криптографічного захисту та
передачі даних у реальному часі з використанням баркероподібних кодів»

Комісія у складі – начальника НДЧ д.т.н., ст. досл. Романа НЕБЕСНОГО та членів: зав. відділу науково-організаційного супроводу наукових досліджень к.т.н. Галини ЛАЗЬКО, заступника завідувача кафедри АСУ з наукової роботи к.т.н., доц. Юрія ЦИМБАЛА та заст. начальника планово-фінансового відділу Ірини ФАСТ цим актом підтверджують, що результати дисертаційної роботи здобувача наукового ступеня доктора філософії Островки Дмитра Васильовича на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 122 «Комп'ютерні науки» використані при виконанні науково-дослідної роботи, яка виконувалась за рахунок коштів загального фонду державного бюджету за темою: «Експериментальна система нейромережевого криптографічного захисту та передачі даних у реальному часі з використанням баркероподібних кодів» (номер державної реєстрації 0121U109503).

Зокрема, Дмитром ОСТРОВКОЮ удосконалено метод синтезу текстур тривимірних зображень користувача в реальному часі (Розділ 3.3, Розділ 3.4), що забезпечив основу для тестування ефективної передачі візуальних даних у криптографічних системах.

Голова комісії:

Начальник науково-дослідної частини,
д.т.н, ст. досл.

Роман НЕБЕСНИЙ

Члени комісії:

Зав.відділу науково-організаційного
супроводу наукових досліджень

Галина ЛАЗЬКО

В.о. заступника начальника
планово-фінансового відділу

Ірина ФАСТ

Заступник завідувача кафедри АСУ
з наукової роботи, к.т.н., доц.

Юрій ЦИМБАЛ

ЗАТВЕРДЖУЮ
Проректор з науково-педагогічної
роботи
Національного університету
«Львівська політехніка»
Олег ДАВИДЧАК
_____ **2023 р.**



АКТ

**про впровадження в навчальний процес результатів
дисертаційної роботи
Островки Дмитра Васильовича**

Цей акт складено про те, що результати дисертаційної роботи Островки Дмитра Васильовича впроваджено у навчальний процес кафедри «Автоматизованих систем управління» Національного університету «Львівська політехніка».

Впровадження результатів дисертаційної роботи полягає в їхньому використанні при викладанні навчальних дисциплін як окремих розділів лекційних курсів, так і в циклах лабораторних робіт.

Зокрема, для викладання дисципліни «Доповнена реальність в освіті: впровадження європейського досвіду» для аспірантів освітньо-кваліфікаційного рівня «доктор філософії», що навчаються за напрямком 122 «Комп'ютерні науки», використано такі результати:

- синтез тривимірних зображень користувача в мобільних інтелектуальних системах (Розділ 1);
- удосконалені метод морфінгу тривимірного зображення користувача (Розділ 2);
- розробки в галузі методів шейдерного зафарбовування та синтезу текстур в режимі реального часу (Розділ 3).

Директор ІКНІ,
д.т.н., професор

 **Микола МЕДИКОВСЬКИЙ**

Заступник завідувача кафедри АСУ
з наукової роботи, к.т.н., доц.

 **Юрій ЦИМБАЛ**

Доцент кафедри АСУ,
к.т.н., доцент

 **Роман МАРЦИШИН**