

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Західноукраїнський національний університет
Факультет комп'ютерних інформаційних технологій
Кафедра комп'ютерної інженерії

ГОДЯ Владислав Васильович

Алгоритми моделювання обличчя людини для
біометричних систем / Human face modeling algorithms for
biometric systems

спеціальність: 123 – Комп'ютерна інженерія
освітньо-професійна програма – Комп'ютерна інженерія

Випускна кваліфікаційна робота

Виконав: студент групи КІм-21
Годя Владислав Васильович

Науковий керівник
к.т.н., доцент Гураль І.В.

ТЕРНОПІЛЬ - 2024

АНОТАЦІЯ

Годя В.В. Алгоритми моделювання обличчя людини для біометричних систем. – Рукопис.

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня «магістр» за спеціальністю 123 «Комп’ютерна інженерія», освітньо-професійна програма. Західноукраїнський національний університет, Тернопіль, 2024.

Робота написана обсягом 82 сторінки і містить 23 ілюстрації, 1 додаток та 40 джерел за переліком посилань. Метою роботи є дослідження та удосконалення сучасних алгоритмів моделювання обличчя людини для біометричних систем, їх реалізація та оцінка продуктивності на реальному прикладі.

Методи досліджень: аналітичні для систематизації існуючих методів, експериментальні для перевірки продуктивності, комп’ютерного моделювання та візуалізації для створення 3D-моделей, глибинного навчання для підвищення точності та адаптивності.

Результати роботи можуть бути використані в біометричних системах контролю доступу, системах безпеки, фінансових операціях, у програмному забезпеченні для архітектурного проектування та дизайну, в середовищі VR/AR для підвищення реалістичності візуалізацій.

Орієнтовні напрямки розвитку досліджень: підвищення стійкості до зовнішніх чинників, розширення застосування глибинного навчання для автоматичної адаптації моделей та оптимізація алгоритмів для мобільних і вбудованих пристроїв.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: БІОМЕТРИЧНІ СИСТЕМИ, МОДЕЛЮВАННЯ ОБЛИЧЧЯ ЛЮДИНИ, ТРИВИМІРНІ МОДЕЛІ, ГЛИБИННІ НЕЙРОННІ МЕРЕЖІ, BLENDER.

ANNOTATION

Hodia V.V. Human Face Modeling Algorithms for Biometric Systems. – Manuscript.

Qualification paper for the degree of Master in specialty 123 “Computer Engineering”, Educational and Professional Program. West Ukrainian National University, Ternopil, 2024.

The paper consists of 82 pages and includes 23 illustrations, 1 appendix, and 40 references. The aim of the study is to explore and improve modern algorithms for human face modeling in biometric systems, implement them, and evaluate their performance based on a real example.

Research methods: analytical methods for systematizing existing approaches, experimental methods for assessing performance, computer modeling and visualization for creating 3D models, and deep learning methods to enhance accuracy and adaptability.

The research results can be applied in biometric access control systems, security systems, financial operations, architectural design software, and VR/AR environments to improve visualization realism.

Prospective directions for further research: increasing robustness against external factors, expanding the use of deep learning for automatic adaptation of models, and optimizing algorithms for mobile and embedded devices.

KEYWORDS: BIOMETRIC SYSTEMS, HUMAN FACE MODELING, THREE-DIMENSIONAL MODELS, DEEP NEURAL NETWORKS, BLENDER.

ЗМІСТ

Вступ.....	5
1 Аналіз засобів та методів моделювання обличчя людини в біометричних системах.....	8
1.1 Класифікація існуючих методів тривимірного моделювання.....	8
1.2 Аналіз засобів моделювання обличчя людини в біометричних системах.....	14
1.3 Оцінка параметрів моделювання обличчя людини в біометричних системах: моделі голови людини	25
1.4 Висновки до розділу.....	29
2 Технології моделювання обличчя людини для біометричних систем.....	31
2.1 Методи створення 3D-моделей обличчя людини для покращення точності біометричних систем.....	31
2.2 Алгоритми попередньої обробки зображень.....	34
2.3 Використання глибинних нейронних мереж у моделюванні обличчя людини.....	45
2.4 Висновки до розділу.....	48
3 Практичне застосування алгоритмів моделювання обличчя людини у біометричних системах.....	50
3.1 Моделювання обличчя людини у середовищі Blender.....	50
3.2 Тестування та оптимізація алгоритмів моделювання обличчя людини у біометричних системах.....	56
3.3 Аналіз результатів та оцінка ефективності з існуючими методами.....	59
3.4 Висновки до розділу.....	63
Висновки.....	66
Список використаних джерел.....	68
Додаток А Світлокопії публікацій.....	72

ВСТУП

Алгоритми моделювання обличчя людини є важливим компонентом біометричних систем, що знаходять застосування в різноманітних сферах: від контролю доступу та безпеки до віртуальної реальності та архітектурного проектування. Створення точних тривимірних моделей обличчя має велике значення для підвищення надійності та точності біометричних систем, забезпечення їх стійкості до підробки та покращення результатів верифікації особи. Проте, створення тривимірних моделей обличчя, здатних адекватно реагувати на різні умови навколишнього середовища (освітлення, вирази обличчя, кут нахилу голови тощо), є складною задачею, що вимагає подальшого вдосконалення.

Актуальність теми дослідження полягає в необхідності удосконалення методів та алгоритмів моделювання обличчя людини для підвищення їх точності та адаптивності в умовах реального використання. Це дозволить значно покращити ефективність біометричних систем, що використовують тривимірні моделі обличчя, а також забезпечити їх більш широке застосування в різних сферах діяльності.

Метою даної роботи є дослідження та удосконалення сучасних алгоритмів моделювання обличчя людини для біометричних систем, їх реалізація та оцінка продуктивності на реальному прикладі. Для досягнення цієї мети у роботі поставлено такі завдання:

- провести детальний аналіз існуючих засобів та методів моделювання обличчя людини в біометричних системах, зокрема тривимірного моделювання, та оцінити їх ефективність;
- розглянути технології тривимірного моделювання обличчя людини, що застосовуються для покращення точності біометричних систем;
- дослідити алгоритми попередньої обробки зображень, що сприяють підвищенню якості та точності 3D-моделей обличчя;

- вивчити застосування глибинних нейронних мереж у процесі моделювання обличчя людини для адаптації до змінюваних умов (освітлення, вирази обличчя, кут нахилу голови);
- розробити практичні методи оптимізації алгоритмів для покращення їх ефективності в реальних умовах використання;
- змодельовати обличчя людини в програмному середовищі, застосовуючи удосконалені алгоритми для тривимірної візуалізації;
- порівняти ефективність удосконалених алгоритмів з існуючими методами моделювання обличчя людини.

Об'єктом дослідження є процес створення тривимірних моделей для біометричних систем, а предметом – алгоритми моделювання обличчя людини у біометричних системах, що включають в себе такі технології, як 3D-моделювання, алгоритми попередньої обробки зображень і методи глибинного навчання.

Наукова новизна роботи полягає в наступному:

1) удосконалено алгоритми моделювання обличчя людини для біометричних систем, що дозволяють підвищити точність та адаптивність моделей до змінюваних умов, таких як різне освітлення, вирази обличчя та кут нахилу голови;

2) створено тривимірну модель обличчя людини з використанням удосконалених алгоритмів моделювання в середовищі Blender, що дозволяє отримати більш точні і детальні моделі обличчя для застосування в біометричних системах.

Практичне значення результатів дослідження полягає в можливості впровадження удосконалених алгоритмів моделювання обличчя людини для покращення точності та надійності біометричних систем у різних сферах. Розроблені методи дозволяють підвищити ефективність систем контролю доступу, ідентифікації в громадських місцях, банківських операціях та безпеки, забезпечуючи більш реалістичні 3D-моделі обличчя для застосувань у віртуальній та доповненій реальності. Також ці алгоритми можуть бути

інтегровані в програмне забезпечення для архітектурного проектування та дизайну, покращуючи точність візуалізацій і дозволяючи створювати більш реалістичні віртуальні екскурсії. Вдосконалення продуктивності програмного забезпечення для 3D-візуалізації і зниження вимог до обчислювальних ресурсів зберігають високу деталізацію моделей. У медичних і психологічних дослідженнях ці алгоритми допоможуть створювати персоналізовані моделі обличчя для діагностики та лікування, підвищуючи точність результатів.

Публікації та апробація КМР. Основні результати досліджень опубліковано в тезах доповідей «Особливості методів та алгоритмів ідентифікації людини за зображенням обличчя людини» обсягом 3 сторінки на науково-практичній конференції «Інноваційні підходи до розвитку технологій та економіки» (IADTE-2024) та «Аналіз методів та алгоритмів реконструкції обличчя людини на основі стереозображень для біометричних систем» обсягом 2 сторінки на науково-практичній конференції молодих вчених і студентів «Інтелектуальні комп'ютерні системи та мережі» (ІКСМ-2024) [1, 2].

Зазначена кваліфікаційна робота містить три розділи [3, 4].

Перший розділ присвячений аналізу існуючих методів тривимірного моделювання обличчя, що використовуються в біометричних системах. Детально аналізуються різні підходи та технології, що застосовуються для створення точних моделей обличчя, а також їх основні характеристики і функціональні можливості.

Другий розділ зосереджений на технологіях створення 3D-моделей обличчя людини, які використовуються для покращення точності біометричних систем. Тут розглядаються алгоритми попередньої обробки зображень, що дозволяють підвищити ефективність моделювання, а також використання глибоких нейронних мереж для досягнення кращих результатів.

У третьому розділі впроваджено розроблені алгоритми на прикладі моделювання жіночого обличчя. Оцінюється їх ефективність через тестування та оптимізацію, а також проведено оцінку результатів в порівнянні з існуючими програмними засобами.

1 АНАЛІЗ ЗАСОБІВ І МЕТОДІВ МОДЕЛЮВАННЯ ОБЛИЧЧЯ ЛЮДИНИ В БІОМЕТРИЧНИХ СИСТЕМАХ

1.1 Класифікація існуючих методів моделювання обличчя людини

Моделювання обличчя людини відіграє ключову роль у розвитку біометричних систем [5], які сьогодні широко використовуються в безпекових, медичних, соціальних та інших галузях. Обличчя людини є унікальним біометричним маркером, який дозволяє ідентифікувати особу з високою точністю. Використання тривимірного моделювання в біометричних системах значно розширює можливості аналізу, дозволяючи створювати реалістичні моделі для подальшого розпізнавання, відстеження емоцій, реконструкції вигляду або верифікації особистості [6]. Завдяки сучасним технологіям моделювання стає основою для автоматизації процесів і підвищення точності в завданнях ідентифікації, навіть за наявності змін у зовнішності людини.

Задача моделювання обличчя людини в біометричних системах зводиться до створення моделей, які не лише виглядають реалістично, але й зберігають точні параметри анатомії для забезпечення надійності алгоритмів розпізнавання. Для цього використовуються різні методи моделювання, які можна класифікувати на чотири основні групи: геометричні, анатомічні, статистичні та гібридні (рисунк 1.1) [7]. Кожна з цих груп має свої підходи до створення моделей, що відповідають конкретним потребам.

Геометричні методи в 3D моделюванні обличчя ґрунтуються на математичному описі форми обличчя і є одними з найстаріших, але водночас і найбільш ефективних підходів у сфері комп'ютерного зору [8]. Вони використовують спеціалізовані пристрої для збору даних, такі як 3D сканери або камери, що здатні зчитувати просторові точки на поверхні обличчя.



Рисунок 1.1 – Класифікація існуючих методів моделювання обличчя людини в біометричних системах

Ці пристрої зазвичай використовують різні технології, такі як структурування світла або лазерне сканування, для отримання точних координат точок, що дозволяє створити тривимірну карту обличчя. Геометричні методи дозволяють отримати точне відображення форми обличчя, що є важливим для розпізнавання та ідентифікації особистості. Однак ці методи мають певні обмеження. Наприклад, вони здебільшого фокусуються на створенні геометричної моделі обличчя, не враховуючи деталі текстури або міміки. Врахувати зміни в зовнішньому вигляді обличчя, які можуть виникати через емоційний стан чи інші фактори, може бути складно, адже такі зміни можуть суттєво вплинути на точність геометричних моделей. Крім того, геометричні методи можуть мати труднощі з врахуванням відхилень від стандартних анатомічних пропорцій, які часто зустрічаються у реальних людей. Незважаючи на ці обмеження, геометричні методи успішно застосовуються у системах розпізнавання обличчя, де основною вимогою є точність геометричних параметрів та швидкість обробки даних. Вони ідеально підходять для базових систем, де важлива здатність швидко та точно розпізнавати основні риси обличчя, навіть якщо не враховуються всі деталі текстури чи динамічні зміни в зовнішньому вигляді.

Анатомічні методи моделювання обличчя є одним з найбільш складних і точних підходів у 3D моделюванні, оскільки вони зосереджені на детальному відтворенні фізіологічних особливостей обличчя людини [9]. Цей метод включає в себе аналіз і моделювання не лише поверхневих рис, таких як контури шкіри,

а й глибших структур, зокрема кісток, м'язів та інших тканин, які визначають природний вигляд обличчя.

Основною метою анатомічного моделювання є створення максимально реалістичної і точної моделі обличчя, яка б відображала його фізіологічну структуру. Для цього фахівці використовують анатомічні дослідження, фотографії, сканування та інші методи для отримання точних даних про структуру обличчя. Вивчаються не тільки основні риси, такі як форма носа, очей, губ, але й глибші аспекти – розташування і форма кісток черепа, м'язова структура, підшкірні тканини. Це дає можливість отримати тривимірну модель, яка не тільки виглядає натурально, але й відповідає фізіологічним закономірностям, що впливають на вигляд обличчя.

Однією з ключових переваг анатомічних методів є їх здатність прогнозувати зміни в зовнішньому вигляді обличчя в результаті вікових змін або інших факторів, таких як травми, захворювання або пластичні операції. Ці методи використовуються в медичних і наукових цілях для моделювання і вивчення процесів старіння, прогнозування змін у вигляді після операцій, а також для створення персоналізованих протезів чи для планування хірургічних втручань. У криміналістиці та судовій експертизі анатомічне моделювання допомагає відтворювати вигляд особи на основі черепа, що може бути критично важливим для ідентифікації жертв злочинів або розслідувань.

Проте, хоча анатомічні методи моделювання забезпечують високу точність і деталізацію, їх застосування має й певні обмеження. Вони потребують значних обчислювальних ресурсів, оскільки кожен етап моделювання вимагає великої кількості даних для створення правдоподібної тривимірної моделі. Крім того, цей процес потребує високої кваліфікації фахівців, які мають досвід у медичних і анатомічних дослідженнях. Це робить анатомічне моделювання менш доступним для масового використання, оскільки він вимагає як спеціалізованих знань, так і значних витрат на апаратне забезпечення та програмне забезпечення.

Таким чином, анатомічні методи моделювання є надзвичайно корисними та точними для специфічних завдань, таких як медичні дослідження, судова

експертиза або створення персоналізованих протезів, проте їх застосування є більш обмеженим у порівнянні з іншими методами, які можуть бути швидшими та менш ресурсозатратними.

Статистичні методи моделювання обличчя базуються на аналізі великих наборів даних, які містять інформацію про тисячі, а інколи й мільйони облич [10]. Цей підхід дозволяє створювати середньостатистичні моделі, які узагальнюють загальні риси, характерні для більшості людей. Основною метою статистичних методів є створення математичної моделі, яка здатна описати широкий спектр облич за допомогою обмеженого набору параметрів. Така модель потім може бути адаптована до конкретної особи, зберігаючи основні характеристики, при цьому зберігається ефективність у масштабах великої кількості даних.

Одним з основних інструментів у статистичних методах є Principal Component Analysis (PCA), або аналіз головних компонент [11]. Цей алгоритм дозволяє зменшити кількість параметрів моделі, зберігаючи при цьому основні характеристики обличчя, такі як форма очей, носа, губ і загальна структура. PCA працює шляхом знаходження найбільш значущих напрямків (компонент) варіативності у наборі даних, що дозволяє створити компресовану, але інформативну модель. У результаті, замість використання тисяч параметрів для опису обличчя, можна використовувати лише кілька десятків основних компонент, які зберігають всю необхідну інформацію для візуального розпізнавання обличчя.

Статистичні методи зазвичай застосовуються в поєднанні з методами машинного навчання, щоб автоматизувати процеси розпізнавання та аналізу обличчя. Наприклад, алгоритми машинного навчання, такі як методи опорних векторів (SVM) або нейронні мережі, можуть використовувати статистично створені моделі як частину процесу для навчання на велику кількість зображень облич [12]. Завдяки цьому можна досягти автоматичної класифікації або ідентифікації нових облич, адаптуючи статистичні моделі до конкретних умов. Цей підхід має особливу перевагу у масштабних системах розпізнавання

обличчя, таких як системи безпеки або автоматичного доступу, де необхідна швидкість і точність на великих наборах даних.

Проте, статистичні методи мають свої обмеження. Одним з основних недоліків є те, що вони часто створюють «середньостатистичні» моделі, які не завжди враховують унікальні особливості кожної окремої особи. Наприклад, люди з рідкісними або вираженими рисами можуть бути неправильно класифіковані або їхні обличчя можуть не бути достатньо добре відтворені через обмеження середньостатистичних моделей. Зокрема, PCA може не виявити важливі риси, що відрізняють одне обличчя від іншого, коли ці риси не є значущими у загальному наборі даних. Крім того, для досягнення високої точності в системах, які повинні працювати з великими наборами різноманітних осіб, потрібно використовувати додаткові технології, які доповнюють статистичні моделі, наприклад, глибоке навчання.

Загалом, статистичні методи є потужним інструментом для побудови загальних моделей, які добре працюють у випадках, коли є велика кількість даних і потрібна висока швидкість обробки. Однак, для досягнення високої точності в задачах, що потребують індивідуального підходу або роботи з унікальними особливостями кожного обличчя, статистичних методів може бути недостатньо.

Гібридні методи моделювання обличчя поєднують кілька різних підходів – геометричний, анатомічний і статистичний – для створення більш універсальних і точних моделей [13]. Основна мета таких методів – оптимізувати процес моделювання, використовуючи переваги кожного з підходів, щоб досягти балансу між реалістичністю, точністю та ефективністю. Це дозволяє отримати моделі, які можуть бути використані в різних сферах, від біометрії до розважальних і освітніх застосунків.

Однією з найпоширеніших форм гібридних підходів є поєднання геометричного опису обличчя зі статистичним аналізом текстур [14]. Геометричні методи зосереджуються на відтворенні форми обличчя за допомогою математичних моделей, що дає можливість точно визначити його

структуру, включаючи основні риси, такі як форма очей, носа, губ та інші контури. Однак геометричні методи зазвичай не враховують текстуру шкіри, що є важливим для створення більш реалістичних моделей.

Статистичні методи, на відміну від геометричних, дозволяють аналізувати текстуру шкіри та інші візуальні деталі, такі як зморшки, пори та інші дрібні особливості, що додають реалізм 3D моделі. Вони працюють на основі великих наборів даних, що містять різноманітні варіації текстур обличчя, і використовують ці дані для створення більш точних і реалістичних моделей. Наприклад, за допомогою алгоритмів, таких як PCA (аналіз головних компонент), можна виявити основні текстурні особливості обличчя, що дозволяє адаптувати модель до різних умов освітлення або виразів обличчя.

Поєднання геометричних і статистичних методів дає можливість створити більш адаптивні моделі, які можуть змінюватися в залежності від освітлення або емоційного стану людини. Такі моделі можуть бути використані для розпізнавання обличчя в різних умовах, наприклад, при зміні виразу обличчя або при різних типах освітлення. Вони можуть мати важливе значення для біометричних систем, де необхідна висока точність при ідентифікації людини. У таких системах гібридні методи можуть забезпечити кращу стійкість до змін, таких як світло або кут огляду, що можуть впливати на точність розпізнавання.

Такі моделі також можуть використовуватися в розважальних та освітніх проектах. Наприклад, у відеоіграх або у віртуальних середовищах, де необхідно створювати реалістичні персонажі або симулювати реалістичні вирази обличчя. Поєднання геометрії та текстури допомагає створювати персонажів з більш натуральними рисами, що робить взаємодію з ними більш реалістичною для користувачів. У освітніх цілях, гібридні методи можуть використовуватися для створення віртуальних навчальних середовищ, де важлива точність у відтворенні людських облич для аналізу та вивчення емоцій або фізіології.

Проте, гібридні методи також мають свої виклики. Оскільки вони поєднують різні підходи, це часто вимагає великих обчислювальних ресурсів, що може обмежувати їх застосування в реальному часі або на слабших пристроях.

Крім того, інтеграція різних методів потребує висококваліфікованих фахівців, здатних оптимізувати ці процеси для досягнення найкращих результатів.

В цілому, гібридні методи моделювання обличчя є потужним інструментом для досягнення точних, реалістичних і адаптивних моделей, які можуть бути використані як у високоточних біометричних системах, так і в розважальних, навчальних та наукових застосунках.

Загалом, кожен із методів моделювання має свої сильні й слабкі сторони, що робить їх відповідними для різних цілей і завдань. Геометричні підходи забезпечують точність форми, анатомічні – деталізацію, статистичні – адаптивність, а гібридні – універсальність. У контексті біометричних систем правильний вибір методу моделювання залежить від вимог до точності, швидкості й адаптивності моделі, а також від доступних ресурсів і умов роботи.

1.2 Аналіз засобів моделювання обличчя людини в біометричних системах

Моделювання обличчя людини займає ключову позицію у багатьох сучасних технологіях, таких як системи біометричної ідентифікації [15], віртуальна реальність, ігрова індустрія, медичні симуляції та інші сфери. Завдяки стрімкому розвитку програмних засобів тривимірного моделювання, створення реалістичних моделей обличчя стало доступним навіть для невеликих команд розробників чи індивідуальних спеціалістів. Програмні засоби для моделювання поєднують у собі потужні алгоритми обробки зображень, машинного навчання та симуляції реального світу, що дозволяє отримати високоякісні результати.

ZBrush є однією з найпопулярніших програм для створення високополігональних моделей, яка забезпечує найвищу деталізацію при роботі з формою та текстурою [16]. Її основна особливість – це можливість роботи в режимі цифрової скульптури, що дозволяє користувачеві створювати тривимірні

об'єкти подібно до того, як художник працює з глиною. Цей підхід робить ZBrush ідеальним інструментом для створення реалістичних моделей облич з усіма їхніми особливостями, такими як зморшки, пори, текстури шкіри, родимки чи інші дрібні деталі, що суттєво підвищують реалістичність (рисунк 1.2).

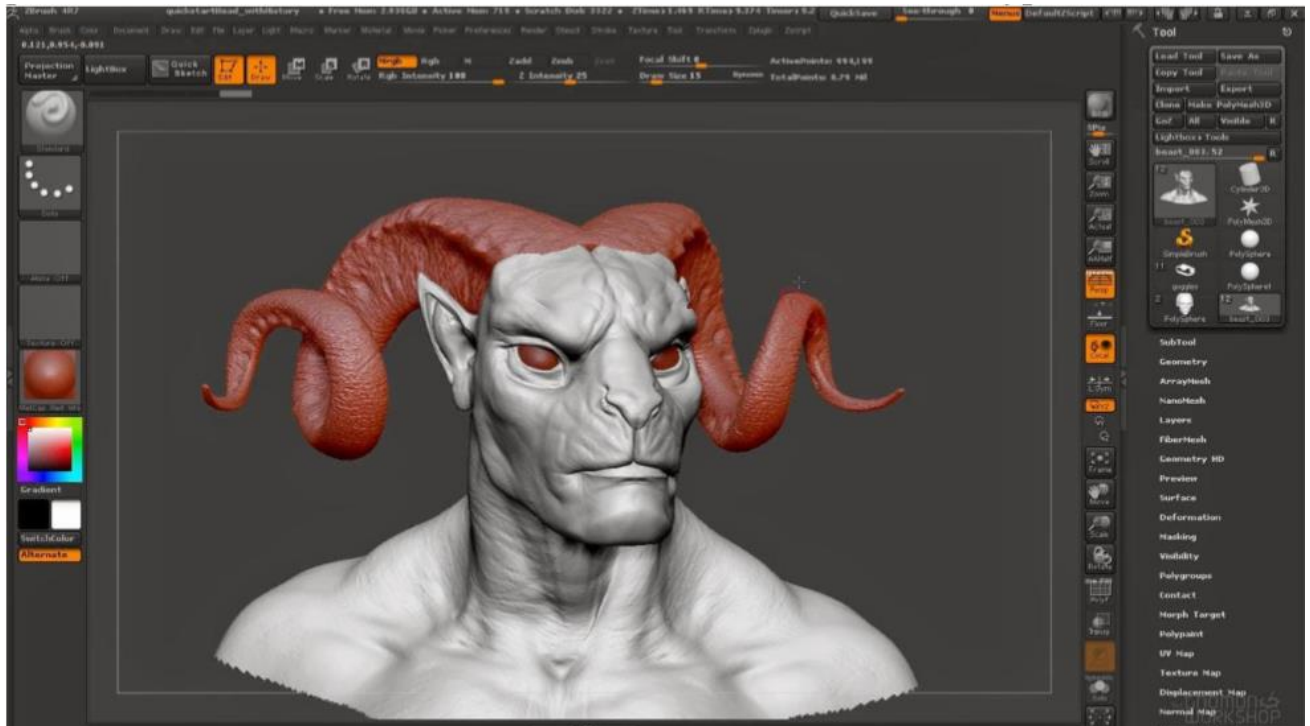


Рисунок 1.2 – Інтерфейс програмного засобу Zbrush

Однією з ключових переваг ZBrush є її потужний набір інструментів для скульптингу [17]. Програма пропонує тисячі пензлів та параметрів, які дозволяють налаштовувати кожен аспект моделі, включаючи форму, текстуру, а також деталі шкіри. Використовуючи функцію DynaMesh, можна швидко перетворювати моделі низької деталізації в об'єкти високої щільності, що особливо корисно для додавання дрібних елементів. Інструмент ZRemesher забезпечує автоматичне створення топології, що значно полегшує процес оптимізації моделі для подальшого використання, наприклад, в ігрових двигунах або анімації.

Ще одна важлива функція ZBrush – це Polypainting, яка дозволяє наносити текстури безпосередньо на модель без попередньої розгортки UV-мапи. Це

спрощує процес створення текстур і забезпечує природний, інтуїтивний підхід до кольорування. Крім того, ZBrush дозволяє експортувати високоякісні нормалізовані карти текстур для подальшого використання в інших програмах, таких як Blender чи Autodesk Maya.

Значною перевагою є також те, що ZBrush підтримує інтеграцію з іншими програмами через плагіни. Наприклад, функції GoZ забезпечують швидке перенесення моделей між ZBrush та іншими 3D-пакетами, такими як Maya, Blender чи 3ds Max, що дозволяє розширювати можливості робочого процесу.

Однак ZBrush має і певні недоліки. Основним з них є високий поріг входу для новачків. Інтерфейс програми доволі складний та нетиповий для стандартів інших 3D-інструментів, через що освоєння ZBrush може зайняти багато часу. Також відсутність традиційного підходу до роботи з UV-мапами може бути проблемою для користувачів, які працюють у великих командах чи інтегрують моделі в складні робочі процеси. Ще одним обмеженням є необхідність використання високопродуктивного обладнання для роботи з моделями високої щільності. Хоча ZBrush оптимізована для обробки мільйонів полігонів, моделі великої складності можуть викликати затримки в роботі, якщо апаратне забезпечення не відповідає вимогам.

Таким чином, ZBrush є надзвичайно потужним інструментом для моделювання облич, який надає користувачам практично необмежені можливості для створення реалістичних деталей. Однак її складність і високі вимоги до апаратного забезпечення можуть стати перешкодою для новачків або невеликих команд. Тим не менш, для професіоналів, які прагнуть створювати максимально деталізовані та реалістичні моделі, ZBrush є одним із найкращих виборів на ринку.

Autodesk Maya – це одна з найпотужніших та найпоширеніших програм для 3D-моделювання, яка знаходить широке застосування в індустрії кіно, ігор і візуальних ефектів [18]. Її ключова особливість – це гнучкість і багатофункціональність, що робить її універсальним інструментом як для початківців, так і для професіоналів. Програма пропонує безліч інструментів для

створення, редагування і анімації тривимірних об'єктів, зокрема обличчя людини (рисунк 1.3).



Рисунок 1.3 – Інтерфейс програмного засобу Мауа

Однією з головних переваг Мауа є її інтеграція з анімаційними інструментами. Завдяки вбудованим функціям створення скелетної структури (rigging) та системі ключових кадрів, користувачі можуть не лише змодельовати обличчя, але й оживити його, додаючи реалістичну міміку. Наприклад, рухи губ, очей чи м'язів можна точно налаштувати для створення правдоподібного виразу емоцій, що є критично важливим для персонажів у фільмах чи іграх.

Autodesk Maya також забезпечує високу точність у роботі з анатомічними пропорціями обличчя [19]. Завдяки наявності бібліотек готових шаблонів, користувач може використовувати існуючі анатомічно правильні бази для прискорення процесу моделювання. Крім того, програма дозволяє створювати власні скрипти на основі мови MEL або Python, що відкриває широкі можливості

для автоматизації складних процесів, таких як моделювання деталей чи текстуровання.

Ще однією перевагою є зручний інструмент для роботи з UV-мапами, який дозволяє точно налаштовувати текстури на поверхні моделі. Це особливо важливо для створення високоякісних матеріалів обличчя, таких як текстури шкіри, очей або волосся. Maya також підтримує інтеграцію з іншими програмами, такими як ZBrush, що дозволяє переносити моделі між додатками без втрати якості.

Система симуляцій у Maya є ще однією потужною функцією. З її допомогою можна створювати реалістичні фізичні ефекти, такі як рух волосся чи взаємодія обличчя з навколишнім середовищем, що додає додаткової реалістичності моделі.

Попри всі переваги, Maya має і свої недоліки. Головним з них є її складність у освоєнні. Інтерфейс програми насичений численними функціями, що може бути лякаючим для новачків. Навчання роботі з Maya може вимагати багато часу, особливо якщо мова йде про моделювання високої деталізації чи створення анімації.

Ще одним недоліком є висока вартість ліцензії. Maya є комерційною програмою, що робить її менш доступною для невеликих команд чи індивідуальних користувачів. Хоча для студентів та освітніх закладів доступні безкоштовні версії, для професійного використання це може бути значним фінансовим тягарем.

Крім того, програма потребує високопродуктивного апаратного забезпечення для роботи з деталізованими моделями. Під час моделювання складних об'єктів, таких як людське обличчя з детальними текстурами та мімікою, слабкий комп'ютер може суттєво уповільнювати робочий процес.

Autodesk Maya – це потужний інструмент для моделювання обличчя людини, який забезпечує широкий спектр функцій для створення реалістичних моделей та їх анімації. Її можливості, зокрема точність анатомічних пропорцій, інтеграція з анімацією та гнучкість у налаштуваннях, роблять її незамінною в

індустрії кіно та ігор. Проте її складність у навчанні, висока вартість та вимоги до обладнання можуть стати перешкодою для новачків та невеликих студій. Утім, для професійних цілей і створення реалістичних персонажів Autodesk Maya залишається одним із лідерів на ринку 3D-моделювання.

FaceGen – це спеціалізоване програмне забезпечення, яке було створене з метою автоматизації процесу генерування тривимірних моделей обличчя на основі двовимірних зображень [20]. Цей інструмент має значний потенціал у сфері біометричних систем, оскільки забезпечує швидкий і простий спосіб створення моделей, які можуть бути використані для ідентифікації особи, аналізу поведінки або створення анімованих аватарів (рисунок 1.4).



Рисунок 1.4 – Інтерфейс програмного засобу FaceGen

Однією з ключових переваг FaceGen є його здатність зчитувати інформацію з фотографій та на її основі автоматично генерувати тривимірну модель обличчя. Це дозволяє значно скоротити час, необхідний для створення моделей, порівняно з традиційними методами ручного моделювання. Наприклад, користувач може завантажити кілька зображень особи з різних ракурсів, після

чого програма самостійно створить відповідну 3D-модель з урахуванням пропорцій та деталей обличчя.

Програма також підтримує параметричне налаштування характеристик обличчя. Це означає, що користувачі можуть змінювати окремі параметри, такі як форма носа, розмір очей, структура підборіддя або текстура шкіри. Такий підхід дозволяє швидко налаштувати модель під конкретні вимоги або провести її адаптацію до певного еталонного образу.

FaceGen пропонує можливість генерувати моделі з урахуванням вікових змін, статі та етнічної належності. Ця функція особливо важлива для біометричних систем, де точність у відображенні цих характеристик може впливати на ефективність ідентифікації. Наприклад, можна створити моделі обличчя, які відповідають різним віковим групам, що важливо для досліджень змін у зовнішності з часом.

FaceGen має низку переваг, які роблять його корисним інструментом для створення тривимірних моделей облич. Однією з ключових переваг є швидкість і автоматизація, що дозволяє створювати 3D-моделі за лічені хвилини. Це особливо важливо для роботи з великими базами даних, де потрібно швидко обробити значну кількість зображень. Програма також підтримує параметричне налаштування, яке забезпечує гнучкість у деталізації моделей. Це дозволяє досягти високої точності, що є критично важливим для розробників і дослідників, які прагнуть максимально реалістичного відтворення облич. FaceGen є масштабованим рішенням і легко інтегрується у робочі процеси, що передбачають обробку великих обсягів даних, наприклад, у сфері створення персонажів для відеоігор або кіно. Важливою перевагою є й сумісність з іншими програмами для 3D-моделювання, такими як Blender, Maya або ZBrush. Це дозволяє експортувати створені моделі для подальшої деталізації в цих інструментах.

Однак FaceGen має і свої недоліки. Одним із них є обмежені можливості ручної корекції. Хоча програма надає базові інструменти для налаштування параметрів обличчя, їх функціоналу часто недостатньо для створення

високодеталізованих моделей, особливо у випадках, коли кожна деталь є важливою, як у біометричних системах. Крім того, якість результатів залежить від вхідних даних: програма працює найкраще з чіткими, якісними фотографіями, тоді як розмиті чи затемнені зображення можуть призвести до неточностей. Ще одним обмеженням є недостатній рівень деталізації текстур. Хоча FaceGen створює базові текстури, вони не включають дрібні деталі, такі як зморшки чи пори, що вимагає подальшого редагування у спеціалізованих програмах. Нарешті, повнофункціональна версія FaceGen може бути фінансово недоступною для невеликих студій або індивідуальних користувачів, що також може обмежувати її використання.

FaceGen є ефективним інструментом для швидкого створення тривимірних моделей облич, що робить його корисним у контексті біометричних систем. Наприклад, програма може бути використана для створення тестових баз даних 3D-моделей облич, які використовуються для навчання та тестування алгоритмів розпізнавання. Генерація моделей з урахуванням різних вікових груп і етнічних характеристик дозволяє розширити охоплення цих алгоритмів і покращити їх точність.

Попри обмеження, FaceGen залишається цінним інструментом, який доповнює можливості інших програм для 3D-моделювання. У поєднанні з такими інструментами, як ZBrush чи Blender, користувачі можуть досягти високого рівня деталізації та реалістичності моделей, створених для біометричних систем.

Не можна не згадати й такі програми, як Adobe Photoshop, які, хоча й не призначені безпосередньо для 3D-моделювання, забезпечують потужні інструменти для підготовки текстур, корекції кольорів та освітлення [21]. Photoshop є важливим етапом у робочому процесі, оскільки дозволяє створювати високоякісні текстури, які значно підвищують реалістичність моделі (рисунок 1.5).

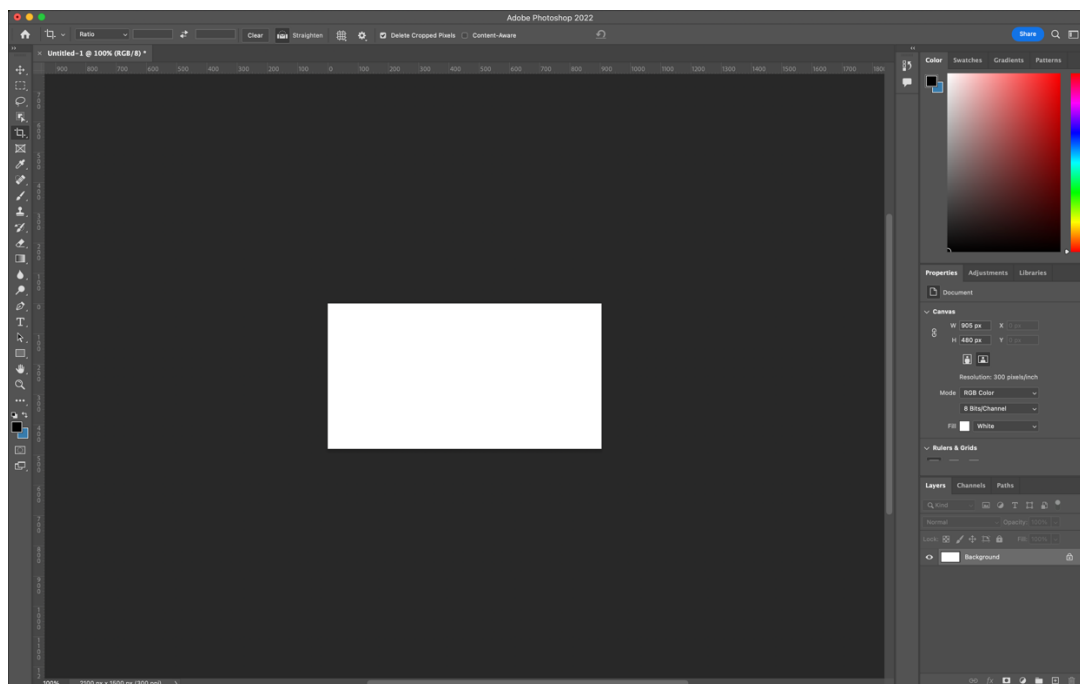


Рисунок 1.5 – Інтерфейс програмного засобу Adobe Photoshop

Blender – це універсальне програмне середовище для створення тривимірних моделей, яке заслужено вважається одним із найкращих інструментів для моделювання обличчя людини [22]. Його унікальні можливості та багатофункціональність роблять його вибором номер один як для новачків, так і для досвідчених 3D-художників. Завдяки безкоштовній ліцензії та відкритому вихідному коду Blender відкриває доступ до професійних функцій кожному, хто бажає працювати з тривимірною графікою (рисунок 1.6).

Однією з головних переваг Blender є його широкі можливості для скульптингу – процесу створення детальної геометрії моделі, яка максимально наближена до реальних форм обличчя. Інструменти скульптингу дозволяють моделювати складні елементи, як-от зморшки, пори, складки шкіри та інші деталі, що роблять модель фотореалістичною. За допомогою таких функцій, як динамічна топологія (Dynamic Topology), можна створювати високополігональні моделі, які є основою для подальшої роботи з текстурами та анімацією. Скульптинг у Blender має інтуїтивно зрозумілий інтерфейс, що значно полегшує процес створення анатомічно коректних моделей обличчя.

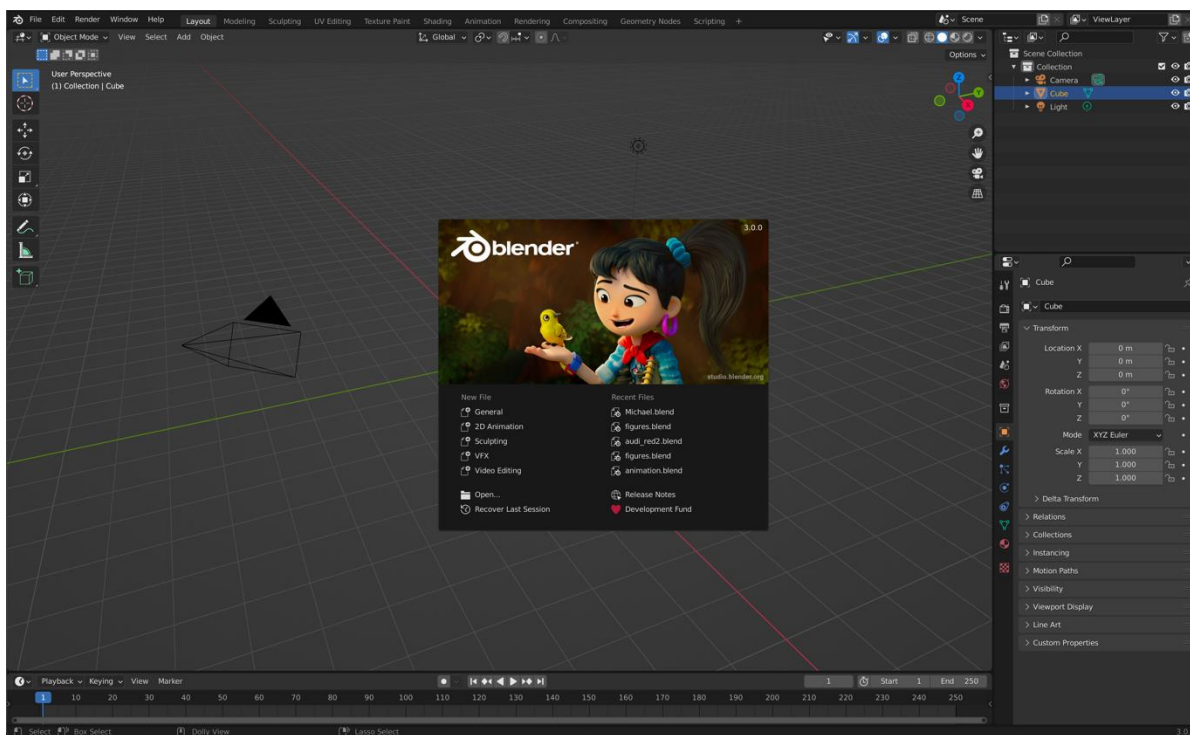


Рисунок 1.6 – Інтерфейс програмного засобу Blender

Blender також відомий своїми потужними можливостями текстурювання. Завдяки функції проєкційного малювання (Projection Painting), художники можуть легко накладати текстури на поверхню моделі, використовуючи реальні фотографії. Це особливо важливо для створення текстур шкіри, що включають такі деталі, як веснянки, пори, нерівності та інші особливості. Програма підтримує роботу з PBR-текстурами (Physically Based Rendering), що дозволяє створювати матеріали, які максимально точно імітують реальні властивості шкіри, волосся та очей.

Ще однією перевагою Blender є його інструменти для корегування геометрії. Функція ретопології дозволяє оптимізувати сітку моделі для зменшення кількості полігонів, що особливо важливо для подальшого використання у біометричних системах або анімації. Завдяки вбудованим інструментам, як-от «Shrinkwrap» та «Snap», можна автоматично вирівнювати сітку моделі, забезпечуючи її точну відповідність базовій формі. Така гнучкість у роботі з геометрією дозволяє створювати моделі, які є не лише реалістичними, але й придатними для різноманітних застосувань.

Blender має потужний рендер-движок Cycles, який підтримує трасування променів у реальному часі (real-time ray tracing). Це означає, що художники можуть миттєво побачити, як їхня модель виглядатиме в умовах різного освітлення, що є важливим для оцінки реалізму. Крім того, Blender підтримує новітні технології, як-от GPU-рендеринг, що значно скорочує час обробки зображень. Завдяки цьому створені моделі обличчя можуть бути перевірені в умовах, максимально наближених до реальних, що особливо важливо для біометричних систем, де освітлення і текстури впливають на точність розпізнавання.

Гнучкість Blender також проявляється у його масштабованості. Програма дозволяє додавати плагіни, які розширюють її функціональність [23]. Наприклад, існують спеціалізовані доповнення для роботи з анатомічними моделями, текстурами або автоматизації процесів. Завдяки відкритому коду спільнота Blender активно розробляє нові інструменти, які можна інтегрувати у власний робочий процес. Цей аспект робить Blender універсальним інструментом, який можна адаптувати до будь-яких потреб.

Одним із найбільш вражаючих аспектів Blender є його навчальна база. Завдяки великій спільноті користувачів, в Інтернеті доступні численні відеоуроки, статті та форуми, що охоплюють усі аспекти роботи з програмою. Це дозволяє навіть новачкам швидко освоїти основи моделювання та переходити до створення складних проєктів. З часом ці ресурси стають джерелом натхнення та практичних знань для вдосконалення власної майстерності.

Порівняно з іншими програмами, Blender вирізняється своєю інтеграцією функцій. Якщо в інших інструментах може бути необхідним використання додаткового програмного забезпечення для роботи з текстурами, анімацією або рендерингом, у Blender усі ці можливості доступні в межах одного середовища. Це не лише скорочує час роботи, але й підвищує ефективність завдяки уніфікованому інтерфейсу.

Незважаючи на безліч переваг, Blender має деякі недоліки. Для новачків програма може здатися складною через велику кількість функцій і налаштувань.

Однак завдяки інтуїтивному інтерфейсу і наявності навчальних ресурсів ці труднощі можна швидко подолати. Крім того, Blender поступово вдосконалюється, адаптуючись до сучасних потреб індустрії.

Таким чином, Blender є найкращим засобом для створення тривимірних моделей обличчя. Завдяки поєднанню потужних інструментів скульптингу, текстуровання, ретопології та рендерингу, а також безкоштовній ліцензії і великій навчальній базі, програма забезпечує максимально ефективний робочий процес. Це ідеальне рішення як для створення анатомічно коректних моделей обличчя, так і для їхньої інтеграції в біометричні системи.

1.3 Оцінка параметрів моделювання обличчя людини в біометричних системах

Оцінка параметрів моделювання обличчя людини є важливим етапом у розробці біометричних систем, що використовують тривимірні моделі голови. Ці моделі повинні не лише точно відтворювати геометричні характеристики обличчя, але й бути здатними ефективно інтегруватися в різні біометричні платформи, забезпечуючи високу точність і швидкість розпізнавання. Оцінка параметрів моделювання включає кілька ключових аспектів, таких як точність відтворення, стабільність моделі, її адаптивність до змін умов (наприклад, освітлення, вирази обличчя), а також ефективність обробки даних.

Точність моделі є критичним аспектом при розробці тривимірних моделей обличчя для біометричних систем. Моделі повинні максимально точно відображати фізичні характеристики обличчя, включаючи не тільки загальну форму та розміри, але й найдрібніші деталі, такі як шкіра, зморшки, текстура і навіть пори на шкірі. Це особливо важливо, оскільки в біометричних системах навіть незначні відмінності можуть призвести до помилок в ідентифікації або верифікації особи.

Для досягнення високої точності використовуються різноманітні методи збору даних. Одним із найпоширеніших підходів є використання спеціалізованих 3D-камер, що дозволяють отримати точну тривимірну модель обличчя за допомогою фотограмметрії або лазерного сканування. Такі камери можуть реєструвати деталі з високою точністю і забезпечити вищу роздільну здатність зображень, що дозволяє створювати моделі з високою деталізацією. Крім того, для отримання більш точної геометрії обличчя можна застосовувати фотографії з різних ракурсів. Врахування кількох точок зйомки дозволяє зібрати дані з усіх можливих боків, що покращує точність моделі та зменшує можливість виникнення спотворень через обмежену кількість даних.

Ключовими факторами, що визначають точність моделі, є роздільна здатність використовуваної камери, яка безпосередньо впливає на деталі, що можна зафіксувати, а також точність алгоритмів реконструкції. Алгоритми реконструкції грають важливу роль у відновленні тривимірної форми обличчя з двовимірних зображень або сканів, тому їх точність має велике значення для якості кінцевої моделі. Системи повинні враховувати також варіації освітлення, що може змінювати вигляд обличчя в залежності від джерел світла. Неправильне або нерівномірне освітлення може призвести до спотворення моделей, тому важливо мати алгоритми, здатні коригувати ці фактори, щоб зберегти точність моделі незалежно від умов зйомки.

Стабільність і адаптивність моделі обличчя є важливими аспектами при розробці біометричних систем, оскільки вони визначають ефективність роботи системи в реальних умовах. Моделі повинні залишатися точними навіть за змінних умов, таких як різне освітлення, кути зйомки, зміни виразів обличчя та інші варіації, що можуть вплинути на вигляд обличчя. Зокрема, однією з основних проблем є необхідність забезпечити стабільність моделі при різному освітленні, яке може змінюватися в залежності від часу доби, розташування джерел світла та інших факторів навколишнього середовища. Зміни освітлення можуть призвести до виникнення тіней або відблисків, що ускладнюють точне відображення фізичних характеристик обличчя.

Ще одним важливим фактором є здатність моделі адаптуватися до зміни зовнішності людини з часом, наприклад, у випадку старіння, зміни зачіски чи носіння аксесуарів (окуляри, маски). Такі зміни можуть значно вплинути на вигляд обличчя, тому система повинна враховувати їх, забезпечуючи постійну точність і надійність. Для цього використовуються методи машинного навчання, які дають можливість моделі «навчатися» на великих наборах даних, адаптуючись до нових умов та змін зовнішності. Наприклад, під час тренування моделі використовуються різноманітні приклади облич, що дозволяє їй розпізнавати особу в різних варіантах освітлення, кутах зйомки та з іншими варіаціями, забезпечуючи високу точність і стабільність у різних умовах.

Швидкість обробки даних є критично важливим параметром для біометричних систем, оскільки вона безпосередньо впливає на ефективність і зручність використання системи. Для біометричних систем, що використовують тривимірні моделі обличчя, важливо, щоб процес розпізнавання або верифікації відбувався в реальному часі, тобто миттєво або протягом кількох секунд. Повільна обробка даних може призвести до затримок, що зробить систему менш зручною для користувача та знизить її ефективність.

Для досягнення високої швидкості обробки даних, більшість сучасних біометричних систем використовують спеціалізовані графічні процесори (GPU). GPU дозволяють здійснювати паралельну обробку великої кількості даних, що необхідно при обробці складних 3D-моделей обличчя. GPU здатні ефективно виконувати великі обчислювальні навантаження, такі як реконструкція 3D-моделей з 2D-зображень, порівняння моделей та виділення ключових рис обличчя. Це забезпечує швидку обробку даних і зменшує час очікування результатів розпізнавання або верифікації.

Крім того, для поліпшення швидкості обробки використовуються ефективні алгоритми, що оптимізують процес реконструкції та порівняння 3D-моделей. Наприклад, методи машинного навчання та глибинного навчання дозволяють створювати моделі, які можуть працювати з меншою кількістю даних, що прискорює процес обробки.

Чим складніша модель обличчя, тим більше обчислювальних ресурсів вона вимагає для створення та обробки. Створення високоточних 3D-моделей, які правильно відображають форму обличчя, текстуру шкіри та інші деталі, вимагає значних обчислювальних потужностей. Це обумовлено тим, що складні моделі включають великі обсяги даних, зокрема, для збереження та обробки кожної деталі 3D-зображення.

Обчислювальні ресурси для створення та обробки 3D-моделей включають багатоядерні процесори та високопродуктивні графічні карти. Багатоядерні процесори дозволяють ефективно розподіляти обчислювальні завдання між кількома ядрами, що прискорює процеси обробки, зокрема при реконструкції моделі з кількох зображень. Водночас високопродуктивні графічні карти (GPU) здатні виконувати паралельні обчислення на великій кількості пікселів, що необхідно для високоякісної обробки 3D-даних.

При роботі з 3D-моделями потрібно враховувати обмеження на пам'ять та час обчислень, особливо для мобільних пристроїв чи вбудованих систем, де обмежені апаратні ресурси. Для таких систем розробляються спеціальні алгоритми, які оптимізують використання пам'яті та забезпечують ефективну обробку даних навіть на обмежених пристроях.

Безпека та конфіденційність даних є важливими аспектами при використанні біометричних систем, особливо в контексті 3D-моделей обличчя. Оскільки ці дані можуть містити чутливу інформацію про людину, необхідно вжити заходів для захисту від несанкціонованого доступу та крадіжки.

Зберігання та передача 3D-даних повинні здійснюватися з використанням надійних методів шифрування, таких як AES (Advanced Encryption Standard), для запобігання доступу до них сторонніх осіб. Шифрування забезпечує захист даних під час їх збереження на сервері та при передачі через мережу, що є критично важливим для запобігання витоку особистої інформації.

Також система повинна мати вбудовані механізми для виявлення та запобігання підробці біометричних даних. Наприклад, можуть використовуватися методи для виявлення фальшивих 3D-моделей, створених за

допомогою фотошопу або інших технологій, що можуть обдурити систему. Для захисту від таких загроз можуть застосовуватися методи верифікації, такі як liveness detection (виявлення живої особи), що перевіряють, чи не є обличчя на зображенні просто статичним, а чи є воно справжнім і живим.

Забезпечення безпеки біометричних даних є необхідною умовою для ефективного та надійного функціонування системи, оскільки в разі порушення безпеки можуть виникнути серйозні наслідки, пов'язані з викраденням особистої інформації або шахрайським використанням біометричних даних.

Оцінка параметрів тривимірного моделювання обличчя людини в біометричних системах є важливим етапом для досягнення високої ефективності, точності та безпеки. Визначення точності відтворення, стабільності, адаптивності, швидкості обробки даних та необхідних обчислювальних ресурсів є основою для створення надійних біометричних систем. Врахування цих параметрів забезпечує можливість використання таких моделей у реальних умовах, що дозволяє досягти високого рівня точності та зручності для користувачів.

1.4 Висновки до розділу 1

У першому розділі було проведено детальний аналіз методів і засобів моделювання обличчя людини в біометричних системах. Розглянуті методи моделювання включають геометричні, анатомічні, статистичні та гібридні підходи, кожен з яких має свої переваги та обмеження. Геометричні методи дозволяють точно відтворювати форму обличчя, але мають труднощі з текстурою і динамічними змінами. Анатомічні методи відтворюють фізіологічні особливості обличчя, але потребують значних обчислювальних ресурсів і високої кваліфікації. Статистичні методи, на основі аналізу великих даних, забезпечують ефективність у загальному моделюванні, проте можуть мати

обмеження в точності для індивідуальних осіб. Гібридні методи поєднують переваги кількох підходів, що дозволяє досягти кращих результатів в моделюванні для біометричних систем.

На основі проведеного аналізу було визначено, що одним з найкращих засобів для моделювання обличчя в біометричних системах є Blender. Цей інструмент забезпечує високий рівень деталізації, дозволяючи створювати точні тривимірні моделі обличчя з можливістю інтеграції різних технік і параметрів, необхідних для біометричних задач. Blender є ефективним для створення моделей, що можуть бути використані в різних біометричних системах, де важлива точність і реалістичність моделей без обмежень на обчислювальні ресурси.

Отже, результати аналізу показали, що Blender є оптимальним вибором для моделювання обличчя людини в біометричних системах, завдяки його потужним інструментам для роботи з 3D-моделями та можливості інтеграції з іншими системами для подальшого аналізу.

2 ТЕХНОЛОГІЇ МОДЕЛЮВАННЯ ОБЛИЧЧЯ ЛЮДИНИ ДЛЯ БІОМЕТРИЧНИХ СИСТЕМ

2.1 Методи створення 3D-моделей обличчя людини для покращення точності біометричних систем.

Тривимірне моделювання обличчя людини є важливою технологією, яка відіграє ключову роль у покращенні точності біометричних систем [25]. Традиційні двовимірні (2D) методи розпізнавання обличчя людини мають низку обмежень, таких як залежність від освітлення, положення обличчя людини та виразів [26]. Ці фактори значно впливають на точність і надійність систем розпізнавання. Тривимірне (3D) моделювання дозволяє подолати ці проблеми, оскільки враховує глибину і форму обличчя людини, що забезпечує більш точні та стійкі результати [27]. Основна перевага 3D-моделей полягає в тому, що вони здатні захоплювати геометричні характеристики обличчя людини з високою точністю, що робить їх менш чутливими до змін умов освітлення, положення або виразів.

Створення 3D-моделей обличчя людини здійснюється за допомогою кількох основних методів, кожен з яких має свої переваги та недоліки. Одним із найпоширеніших підходів є структуроване світло [28]. Цей метод полягає в проектуванні певних патернів світла, наприклад, смуг або решітки, на поверхню обличчя людини, а потім у захопленні відображеного зображення камерою. Після цього аналізуються зміни цих смуг на зображенні, і на основі цих даних обчислюється глибина та форма обличчя людини. Структуроване світло дозволяє отримати детальні 3D-моделі обличчя людини з високою точністю, що робить цей метод популярним для використання у високоточних біометричних системах. Проте він має свої обмеження – зокрема, технологія є досить чутливою до змін у зовнішньому середовищі, таких як зміна освітлення або рухи обличчя людини під час сканування. Щоб отримати якісні результати, обличчя людини повинно залишатися нерухомим під час процесу сканування, що може бути

проблемою в деяких реальних умовах. Висока точність даного методу робить його ідеальним для систем, що вимагають максимального рівня деталізації, таких як системи безпеки в банках або урядових установах.

Іншим важливим методом для тривимірного моделювання обличчя людини є стереозображення [29]. Цей підхід використовує дві або більше камер для захоплення зображень обличчя людини з різних кутів. Завдяки використанню кількох ракурсів, система може визначити глибину обличчя людини шляхом аналізу паралаксу між зображеннями з різних камер. Стереозображення моделює принцип зору людини, де два ока захоплюють зображення з різних кутів, і мозок об'єднує їх для створення тривимірного сприйняття об'єктів. Цей метод має свої переваги, оскільки він дозволяє створювати 3D-моделі без необхідності застосування додаткових джерел світла або спеціального обладнання для сканування. Однак, стереозображення вимагає високої якості камер і точного калібрування системи для забезпечення правильного визначення глибини. Крім того, він менш ефективний при низькій контрастності зображень або при обробці деталей обличчя людини з невеликою різницею у глибині, що може обмежити його застосування в умовах з поганим освітленням.

Лазерне сканування є ще одним ефективним методом для створення тривимірних моделей обличчя людини [30]. Цей підхід використовує лазер для точного вимірювання відстані між лазерним джерелом і поверхнею обличчя людини. Лазер проходить по всій площині обличчя людини, точково скануючи його форму і створюючи детальну 3D-модель. Лазерне сканування відоме своєю високою точністю і здатністю захоплювати найдрібніші деталі, такі як текстура шкіри або інші мікроскопічні риси. Основна перевага цього методу полягає в тому, що він може бути застосований навіть в умовах слабкого освітлення, оскільки лазерне джерело світла не залежить від зовнішніх факторів. Проте лазерне сканування потребує спеціального обладнання і часу для створення моделі, що робить його менш підходящим для застосувань, де потрібна висока швидкість обробки даних. Вартість обладнання для лазерного сканування також

є значно вищою порівняно з іншими методами, що може обмежити його використання у масових біометричних системах.

Ще одним підходом до тривимірного моделювання обличчя людини є фотограмметрія, яка полягає в аналізі двовимірних зображень, зроблених під різними кутами, для створення 3D-моделі [31]. Фотограмметрія використовує методи математичного аналізу для обчислення глибини і форми обличчя людини на основі різниці в ракурсах і положеннях точок на зображеннях. Цей підхід є дешевшим, оскільки він може бути реалізований за допомогою стандартних камер без необхідності використання дорогого обладнання. Проте точність фотограмметрії залежить від якості зображень і кута зйомки, що може створити проблеми у складних умовах. Незважаючи на це, фотограмметрія знаходить своє застосування у більшості комерційних систем, таких як контроль доступу та безпека, де потрібна відносно висока швидкість і доступність.

Нарешті, останнім досягненням у сфері тривимірного моделювання обличчя людини є застосування глибинного навчання та згорткових нейронних мереж (CNN) [32]. Цей підхід дозволяє створювати 3D-моделі обличчя людини на основі одного або кількох двовимірних зображень, що робить його надзвичайно ефективним у реальних додатках. CNN можуть навчатися на великих обсягах даних і автоматично виділяти ключові ознаки, необхідні для реконструкції обличчя людини у 3D-просторі. Одним із прикладів використання нейронних мереж у 3D-моделюванні є генеративно-змагальні мережі (GAN), які можуть створювати тривимірні моделі обличчя людини навіть за відсутності повних даних про глибину або форму обличчя людини. Це значно знижує потребу у спеціалізованому обладнанні для 3D-сканування і дозволяє використовувати звичайні камери для захоплення зображень. Такі системи можуть бути реалізовані на основі мобільних пристроїв або камер спостереження, що робить їх доступними для масового використання.

Загалом, тривимірне моделювання обличчя людини значно підвищує точність біометричних систем і дозволяє долати багато проблем, з якими стикаються двовимірні методи. 3D-моделі забезпечують стійкість до зовнішніх

факторів, таких як освітлення або зміна кута обличчя людини, що робить їх ідеальними для застосувань, де висока точність є критично важливою. Однак впровадження цих методів вимагає складного обладнання і значних обчислювальних ресурсів, що може бути викликом для деяких систем. Незважаючи на це, розвиток технологій глибинного навчання робить тривимірне моделювання обличчя людини більш доступним і перспективним напрямком для майбутніх біометричних додатків.

2.2 Алгоритми попередньої обробки зображень

Попередня обробка зображень є невід'ємною частиною будь-якого процесу комп'ютерного зору, особливо в задачах, пов'язаних із розпізнаванням обличчя людини. Цей етап дозволяє підготувати зображення для подальшого аналізу, покращуючи їх якість і зменшуючи вплив різних артефактів, які можуть заважати точному розпізнанню. Основні цілі попередньої обробки включають поліпшення якості зображення, усунення шумів, нормалізацію освітлення, а також корекцію розмірів.

Алгоритм корекції яскравості є важливим етапом попередньої обробки, що дозволяє підвищити видимість деталей у зображенні [33]. Яскравість може суттєво впливати на сприйняття зображення, особливо якщо воно отримане в умовах недостатнього освітлення або під час яскравого світла. Цей алгоритм складається з 4 основних кроків. Схема алгоритму корекції яскравості наведена на рисунку 2.1.

Крок 1. Визначення необхідності корекції яскравості. На цьому етапі потрібно проаналізувати, чи зображення виглядає занадто темним або надто яскравим. Для цього можна використовувати прості методи, такі як перегляд гістограми зображення. Якщо гістограма скупчена в лівій частині, це вказує на

недостатню яскравість, тоді як скупчення в правій частині свідчить про надмірну яскравість.



Рисунок 2.1 – Схема алгоритму корекції яскравості

Крок 2. Вибір значення корекції.

Після визначення необхідності корекції потрібно встановити, наскільки потрібно підвищити або знизити яскравість. Це може бути фіксоване значення (наприклад, +20) або відсоток (наприклад, +10%). Вибір значення корекції повинен враховувати не тільки вихідну яскравість, але й бажану яскравість для досягнення оптимального результату.

Крок 3. Застосування вибраного значення корекції.

Для кожного пікселя в зображенні виконуються наступні дії:

- витягуються значення червоного, зеленого та синього (RGB) каналів.
- додається вибране значення корекції до кожного каналу. Нове значення

не повинно перевищувати 255 (максимальне значення для 8-бітних зображень).

Якщо значення перевищує 255, відкоригуйте його до 255.

Крок 4. Формування нового зображення.

На цьому етапі потрібно створити нове зображення з оновленими значеннями пікселів, яке буде збережено для подальшої обробки. Це дозволить використовувати покращене зображення в подальших етапах комп'ютерного зору.

Алгоритм фільтрації шумів спрямований на покращення якості зображення, усунення небажаних артефактів, які можуть виникати через різні фактори, такі як помилки в камері або умови зйомки [34]. Він складається з 5 основних кроків. Схема алгоритму фільтрації шумів наведена на рисунку 2.2.

Крок 1. Визначення типу шуму.

На цьому етапі виконується аналіз типу шуму, присутнього у зображенні. Розрізняють такі види шуму, як гаусів шум, спайковий шум або шум «сіть і перець». Залежно від типу шуму підбирається відповідний фільтр для його усунення.

Крок 2. Вибір типу фільтрації.

Для зменшення гаусового шуму застосовується середній фільтр, оскільки він ефективно згладжує варіації пікселів. Для спайкового шуму оптимальним є медіанний фільтр, який визначає медіану значень сусідніх пікселів, зберігаючи деталі зображення.

Крок 3. Визначення розміру фільтра.

На цьому етапі встановлюється розмір фільтра, наприклад, 3x3 або 5x5. Розмір визначає область, на якій виконуються обчислення для фільтрації. Збільшення розміру фільтра залучає більше пікселів, але може призводити до втрати деталей.

Крок 4. Застосування фільтра.

На цьому етапі для кожного пікселя, крім країв, обираються сусідні пікселі відповідно до розміру фільтра. Для середнього фільтра обчислюється середнє значення пікселів у зазначеній області. Для медіанного фільтра визначається медіана значень пікселів у цій області. Значення центрального пікселя замінюється на нове (середнє або медіанне).

Крок 5. Формування нового зображення.

Після виконання фільтрації формується оброблене зображення, яке використовується для наступних етапів обробки.



Рисунок 2.2 – Схема алгоритму фільтрації шумів

Алгоритм масштабування зображень дозволяє приводити зображення до стандартного розміру, необхідного для подальшої обробки [35]. Це може бути особливо важливим для алгоритмів комп'ютерного зору, які потребують зображення певного розміру. Алгоритм складається з 4 основних кроків. Схема алгоритму масштабування зображень наведена на рисунку 2.3.



Рисунок 2.3 – Схема алгоритму масштабування зображень

Крок 1. Визначення нових розмірів.

На цьому етапі визначаються бажані ширина та висота зображення в пікселях. Це може бути задано як абсолютними значеннями, так і у відсотках від початкового розміру. Такий підхід забезпечує адаптацію зображення до різних вимог.

Крок 2. Вибір методу масштабування.

Обирається метод масштабування, який буде застосовуватись. Серед можливих варіантів:

- метод найближчого сусіда, який простий у реалізації, але може призводити до пікселізації.
- бікубічне масштабування, яке забезпечує кращу якість, але потребує більших обчислювальних ресурсів.
- лінійна інтерполяція або інші методи, залежно від необхідного результату.

Крок 3. Застосування масштабування.

На цьому етапі для кожного пікселя нового зображення:

- обчислюються координати відповідного пікселя в оригінальному зображенні.
- використовується обраний метод масштабування для отримання значення нового пікселя. У випадку інтерполяції визначається середнє значення між сусідніми пікселями.

Крок 4. Формування нового зображення.

Результатом є нове масштабоване зображення, яке зберігається для подальшої обробки або використання у наступних алгоритмах.

Алгоритм вирізання дозволяє видалити непотрібні частини зображення, зосереджуючи увагу на об'єкті, що аналізується [36]. Це корисно для зменшення розміру зображення та покращення продуктивності обробки. Алгоритм складається з 3 основних кроків. Схема алгоритму вирізання наведена на рисунку 2.4.



Рисунок 2.4 – Схема алгоритму вирізання

Крок 1. Визначення області інтересу (ROI).

На цьому етапі визначаються координати прямокутної області, яка охоплює об'єкт інтересу. Вибрана область повинна враховувати всі важливі деталі об'єкта, щоб забезпечити збереження необхідної інформації.

Крок 2. Вирізання вибраної області.

Виконується вирізання частини зображення, яка знаходиться в межах визначеної області інтересу (ROI). Це дозволяє зосередити увагу лише на об'єкті та виключити зайві частини зображення, що оптимізує продуктивність подальшої обробки.

Крок 3. Формування нового зображення.

Нове зображення створюється на основі вибраної області, залишаючи лише вирізану частину. Отримане зображення містить об'єкт інтересу та використовується для подальшого аналізу або обробки.

Алгоритм обробки кольорів полягає в конвертації кольорового зображення в градації сірого, що може бути корисним для спрощення подальшої обробки [37]. Цей алгоритм складається з 3 основних кроків. Схема алгоритму обробки кольорів наведена на рисунку 2.5.



Рисунок 2.5 – Схема алгоритму обробки кольорів

Крок 1. Визначення необхідності конвертації.

На цьому етапі визначається, чи потрібно перетворювати кольорове зображення в градації сірого. Це зазвичай залежить від цілей обробки, таких як

спрощення аналізу зображення, зменшення кількості даних або покращення продуктивності алгоритмів обробки.

Крок 2. Обчислення значень пікселів.

Для кожного пікселя кольорового зображення розраховується значення сірого. Це значення отримується за допомогою формули, яка враховує внесок кожного кольорового каналу (R, G, B):

$$\text{Gray} = 0.299R + 0.587G + 0.114B.$$

Ці коефіцієнти базуються на сприйнятті людським оком інтенсивності різних кольорів.

Крок 3. Формування нового зображення.

Після розрахунку градацій сірого формується нове зображення, яке складається лише з одноколірної інформації (градацій сірого). Це спрощує зображення та дозволяє використовувати його для подальшої обробки або аналізу.

Алгоритм вирівнювання обличчя людини усуває нахили та деформації, що можуть виникати в зображеннях обличчя людини [38]. Цей алгоритм складається з 3 основних кроків. Схема алгоритму вирівнювання обличчя людини наведена на рисунку 2.6.

Крок 1. Виявлення ключових точок.

На цьому етапі визначаються ключові точки обличчя, такі як очі, ніс і рот. Для цього використовуються спеціалізовані алгоритми розпізнавання, наприклад, методи детекції обличчя або моделі машинного навчання. Ці точки є основою для подальшої трансформації зображення.

Крок 2. Застосування трансформації.

Ключові точки переводяться до стандартних координат за допомогою геометричних трансформацій, таких як обертання, масштабування та зсув. Це забезпечує вирівнювання обличчя, роблячи його положення однаковим незалежно від вихідного ракурсу.

Крок 3. Формування нового зображення.

Після трансформації створюється нове вирівняне зображення. Усі пікселі обчислюються на основі трансформованих координат, що дозволяє отримати обличчя, готове для подальшої обробки, наприклад, розпізнавання або аналізу.



Рисунок 2.6 – Схема алгоритму вирівнювання обличчя людини

Алгоритм нормалізації освітлення усуває вплив умов освітлення на якість зображення [39]. Цей алгоритм складається з 3 основних кроків. Схема алгоритму нормалізації освітлення наведена на рисунку 2.7.



Рисунок 2.7 – Схема алгоритму нормалізації освітлення

Крок 1. Обчислення гістограми зображення.

На цьому етапі визначається розподіл яскравості пікселів у зображенні. Це дозволяє оцінити проблеми з контрастністю або яскравістю, такі як вузький динамічний діапазон або зсув у напрямку темних чи світлих пікселів.

Крок 2. Застосування корекції.

Виконується вирівнювання гістограми для покращення яскравості та контрастності. Це досягається за допомогою таких методів, як розтягування гістограми або її рівномірний перерозподіл. Результатом є зображення з кращим візуальним сприйняттям та збалансованою освітленістю.

Крок 3. Формування нового зображення.

Створюється нове зображення з покращеною освітленістю та контрастністю. Це зображення може бути використано для подальших етапів обробки або аналізу.

Таким чином, попередня обробка зображень є складним, але надзвичайно важливим етапом у всіх задачах комп'ютерного зору. Вона охоплює різноманітні алгоритми, такі як корекція яскравості, фільтрація шумів, масштабування, вирівнювання, обробка кольорів, вирівнювання та нормалізація освітлення. Використання цих алгоритмів значно підвищує якість вхідних даних, що забезпечує кращі результати в подальшій обробці, особливо в таких критичних задачах, як розпізнавання обличчя людини. Знання та впровадження ефективних методів попередньої обробки зображень стає все більш важливим у сучасних технологіях.

2.3 Використання глибинних нейронних мереж у моделюванні обличчя людини

Глибинні нейронні мережі (deep neural networks, DNN), зокрема згорткові нейронні мережі (convolutional neural networks, CNN), стали революційною технологією в розпізнаванні та моделюванні обличчя людини для біометричних систем [40]. Вони дозволяють значно підвищити точність і надійність процесу розпізнавання, зменшити вплив зовнішніх факторів і автоматизувати виділення важливих ознак без потреби в ручному налаштуванні або попередньому визначенні характеристик. CNN змогли подолати обмеження попередніх методів розпізнавання, таких як методи на основі ознак або геометричних моделей, і відкрили нові можливості для систем біометрії завдяки їхній здатності працювати з великими обсягами даних і автоматично навчатися в процесі роботи.

Основна перевага використання CNN у моделюванні обличчя людини полягає в здатності цих мереж автоматично знаходити та вивчати характерні ознаки обличчя людини. У традиційних методах обробки зображень для розпізнавання обличчя людини існувала потреба в ручному виділенні ключових характеристик, таких як відстань між очима, форма носа чи контуру рота. Це обмежувало гнучкість систем і робило їх чутливими до зміни зовнішніх умов. У глибинних нейронних мережах цей процес автоматизується, оскільки CNN самостійно виявляють важливі ознаки на різних рівнях абстракції.

Архітектура CNN складається з кількох шарів, кожен з яких виконує певну функцію. Перший шар – це згортковий шар, який використовує фільтри (або ядра) для виділення локальних ознак зображення. Ці фільтри автоматично навчаються під час процесу тренування мережі, шукаючи шаблони на зображенні, такі як краї або текстурні деталі обличчя людини. Другий шар, відомий як шар підсумовування (pooling layer), зменшує розмірність зображення, щоб зберегти найважливіші ознаки, зменшивши при цьому обчислювальну складність. Цей процес також допомагає зробити модель стійкішою до незначних варіацій зображення, таких як зміна кута нахилу голови або виразів обличчя людини.

Окрім згорткових і підсумовувальних шарів, CNN також використовують повнозв'язкові шари (fully connected layers), які поєднують усі виділені ознаки і використовуються для класифікації або створення моделей. Повнозв'язкові шари створюють високорівневу абстракцію ознак, що дозволяє моделі приймати рішення про те, чи належить зображення певному обличчю людини.

Окрім базових згорткових нейронних мереж, для моделювання обличчя людини використовуються й більш складні архітектури, такі як FaceNet, VGGFace і DeepFace. Наприклад, FaceNet, розроблена компанією Google, працює не лише з ідентифікацією обличчя людини, а й із верифікацією та кластеризацією обличчя людини у векторному просторі. У FaceNet кожне обличчя людини представляється як точка у високовимірному просторі (вектор ознак), де близькість між точками визначає схожість обличчя людини. Це дозволяє системі

ефективно ідентифікувати та розпізнавати обличчя людини, навіть якщо вони мають різні вирази, освітлення або інші зовнішні фактори.

Ще одним важливим досягненням у використанні CNN є Generative Adversarial Networks (GAN), які можуть не лише розпізнавати, а й генерувати тривимірні моделі обличчя людини на основі обмеженого набору зображень. GAN працюють за принципом змагання двох мереж: генератора, який намагається створити реалістичне зображення обличчя людини, і дискримінатора, який намагається визначити, чи є це зображення справжнім або створеним генератором. Такий підхід дозволяє моделювати обличчя людини у 3D-просторі навіть при наявності лише одного або двох двовимірних зображень. Це відкриває нові можливості для біометричних систем, оскільки вони можуть створювати точні тривимірні моделі без необхідності складного обладнання для сканування.

Одним із ключових етапів використання CNN у моделюванні обличчя людини є процес попереднього тренування мережі на великій базі даних зображень обличчя людини. Такі набори даних, як LFW (Labelled Faces in the Wild) або CASIA-WebFace, містять мільйони зображень, що дозволяє нейронним мережам вивчати різноманітність людських обличчя людини. Після попереднього тренування мережі вона може бути адаптована для конкретних задач, таких як розпізнавання обличчя людини у системах безпеки або моделювання обличчя людини у системах тривимірної реконструкції. Цей процес відомий як трансферне навчання і дозволяє використовувати вже натреновані моделі для нових задач з мінімальним обсягом додаткових навчальних даних.

Важливою перевагою CNN є їх здатність обробляти дані в реальному часі. Завдяки паралельній обробці даних на графічних процесорах (GPU), CNN можуть швидко аналізувати зображення та видавати результати, що робить їх ефективними для використання в системах відеоспостереження або контролю доступу. Наприклад, система відеонагляду може в режимі реального часу

ідентифікувати особу, порівнюючи її обличчя людини з базою даних відомих обличчя людини.

Проте, використання CNN має й свої виклики. Основним із них є висока потреба в обчислювальних ресурсах. Навчання глибинних нейронних мереж потребує значних обчислювальних потужностей, а також великих обсягів даних для тренування. Це може бути проблемою для організацій з обмеженими ресурсами або в умовах, де доступ до великих баз даних є складним. Крім того, CNN схильні до надмірного навчання (overfitting), коли модель вивчає занадто багато деталей і стає менш здатною узагальнювати нові дані. Для уникнення цієї проблеми використовуються методи регуляризації, такі як Dropout або L2-регуляризація.

Окрім цього, CNN можуть стикатися з проблемами конфіденційності та безпеки, оскільки вони потребують великих обсягів даних для навчання. Це може викликати занепокоєння щодо зберігання та використання особистої інформації, особливо у сферах, де питання конфіденційності мають ключове значення.

Таким чином, використання глибинних нейронних мереж, зокрема згорткових нейронних мереж та генеративних змагальних мереж, значно покращує можливості моделювання та розпізнавання обличчя людини у біометричних системах. Вони здатні автоматично виділяти ознаки обличчя людини, навчатися на великих обсягах даних і адаптуватися до змін зовнішніх умов, що робить їх незамінними інструментами для сучасних систем безпеки та ідентифікації.

2.4 Висновки до розділу 2

У другому розділі розглянуто технології та методи моделювання обличчя людини для біометричних систем, зокрема тривимірне (3D) моделювання, попередню обробку зображень і використання глибинних нейронних мереж.

3D-моделювання суттєво підвищує точність біометричних систем, оскільки дозволяє долати обмеження традиційних 2D-методів, таких як чутливість до освітлення та виразів обличчя людини. Описані методи, такі як структуроване світло, стереозображення, лазерне сканування, фотограмметрія та застосування глибинного навчання, мають свої переваги і недоліки, що підкреслює важливість вибору відповідного методу в залежності від конкретних вимог системи.

Попередня обробка зображень відіграє критичну роль у підготовці зображень для подальшого аналізу. Алгоритми, такі як корекція яскравості, фільтрація шумів, масштабування, вирізання, обробка кольорів, вирівнювання та нормалізація освітлення, забезпечують покращення якості зображення і зменшують вплив зовнішніх факторів.

Використання глибинних нейронних мереж, зокрема згорткових нейронних мереж (CNN), у моделюванні обличчя людини демонструє значні переваги, оскільки вони автоматично виявляють важливі ознаки, що підвищує точність і надійність систем розпізнавання обличчя людини.

Досягнення, такі як Generative Adversarial Networks (GAN), здатні генерувати тривимірні моделі обличчя людини на основі обмеженого набору даних, відкривають нові можливості для застосування в біометричних системах.

Загалом, розділ підкреслює важливість 3D-моделювання обличчя людини та попередньої обробки зображень для підвищення точності біометричних систем.

Використання глибинних нейронних мереж відкриває нові горизонти для розпізнавання обличчя людини і моделювання, роблячи ці технології критично важливими для сучасних систем безпеки, контролю доступу та інших біометричних застосувань. Проте впровадження цих методів може вимагати значних обчислювальних ресурсів та уваги до питань конфіденційності і безпеки даних.

3 ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ АЛГОРИТМІВ МОДЕЛЮВАННЯ ОБЛИЧЧЯ ЛЮДИНИ У БІОМЕТРИЧНИХ СИСТЕМАХ

3.1 Моделювання обличчя людини у середовищі Blender

Процес моделювання обличчя у середовищі Blender є складним і багатоступеневим завданням, що вимагає поєднання технічних знань та творчих навичок. Для виконання цієї роботи було обрано зразок жіночого обличчя, що дозволяє дослідити та застосувати сучасні методи 3D-моделювання в біометричних системах. У результаті виконаного моделювання планується отримати реалістичну тривимірну модель обличчя, яка може бути застосована для подальших досліджень та практичного використання в системах розпізнавання облич.

Робота розпочалася з налаштування середовища Blender. Було обрано останню стабільну версію програми, яка забезпечує сучасні інструменти для роботи з тривимірною графікою. Інтерфейс було налаштовано таким чином, щоб забезпечити максимальну зручність при роботі. Для цього було активовано кілька вікон перегляду з різних ракурсів: анфас, профіль та перспективний вигляд. Ці вікна дозволили паралельно слідкувати за змінами моделі у реальному часі з різних кутів.

Моделювання розпочалося зі створення базової геометрії обличчя. Для цього було використано площину (Plane), яку поступово трансформували у складну тривимірну сітку. На початковому етапі важливо було встановити ключові точки, які визначали контури обличчя: підборіддя, скроні, очні ямки, основу носа та губи (рисунок 3.1). Ці точки слугували основою для подальшої деталізації. Використання інструменту Extrude дозволило поступово нарощувати геометрію, створюючи форму обличчя.

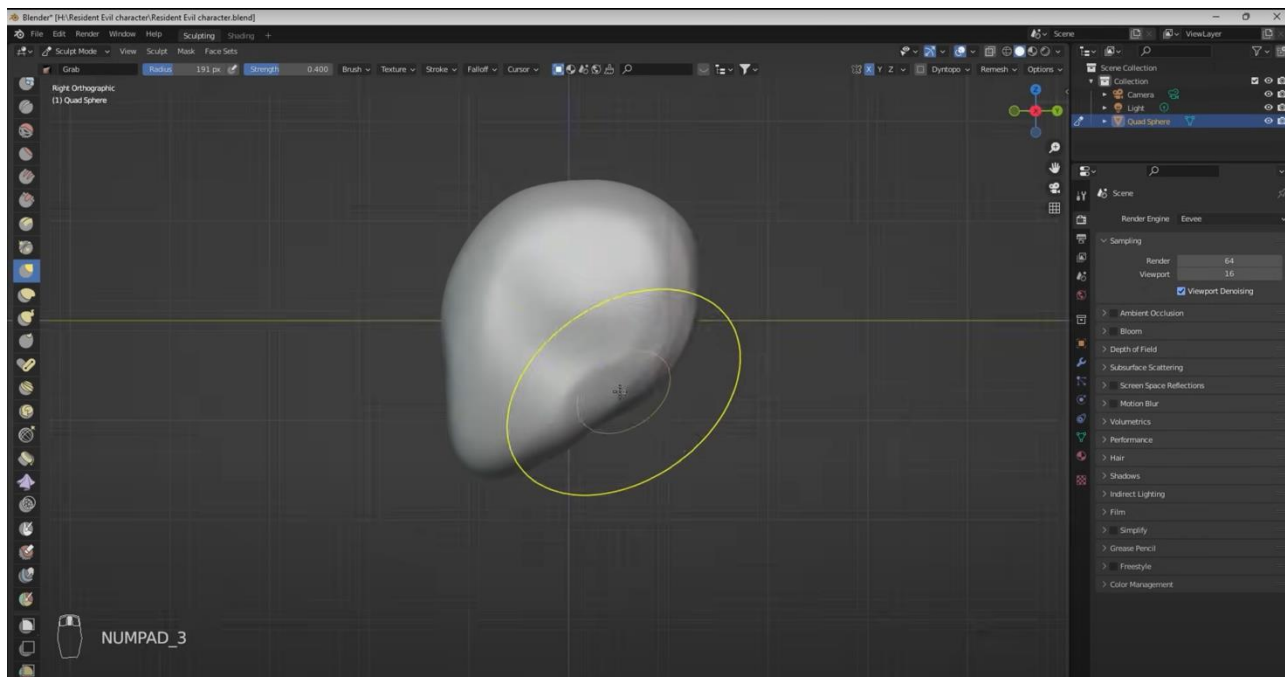


Рисунок 3.1 – Початковий етап моделювання обличчя людини

Для забезпечення симетричності моделі було застосовано Mirror Modifier. Цей модифікатор дозволив відображати всі зміни, зроблені з одного боку обличчя, на іншій стороні. Завдяки цьому вдалося уникнути помилок у симетрії та значно зекономити час. Застосування цього інструменту є стандартною практикою у 3D-моделюванні людських облич.

Після формування основної форми обличчя було розпочато деталізацію. Очі є одним із найважливіших елементів обличчя, тому їм було приділено особливу увагу. Для створення очних яблук використовувалися сферичні об'єкти, розташовані відповідно до анатомічних пропорцій. Повіки моделювалися шляхом редагування сітки навколо очей (рисунок 3.2). Використання інструментів Sculpting дозволило створити плавні переходи між повіками і навколишніми частинами обличчя.

Ніс був змодельований з особливою точністю, адже це одна з найбільш характерних частин обличчя. Спочатку було визначено основні контури носа, після чого форма була уточнена за допомогою інструментів Sculpting. Це дозволило створити природні вигини та деталізувати ніздрі (рисунок 3.3).

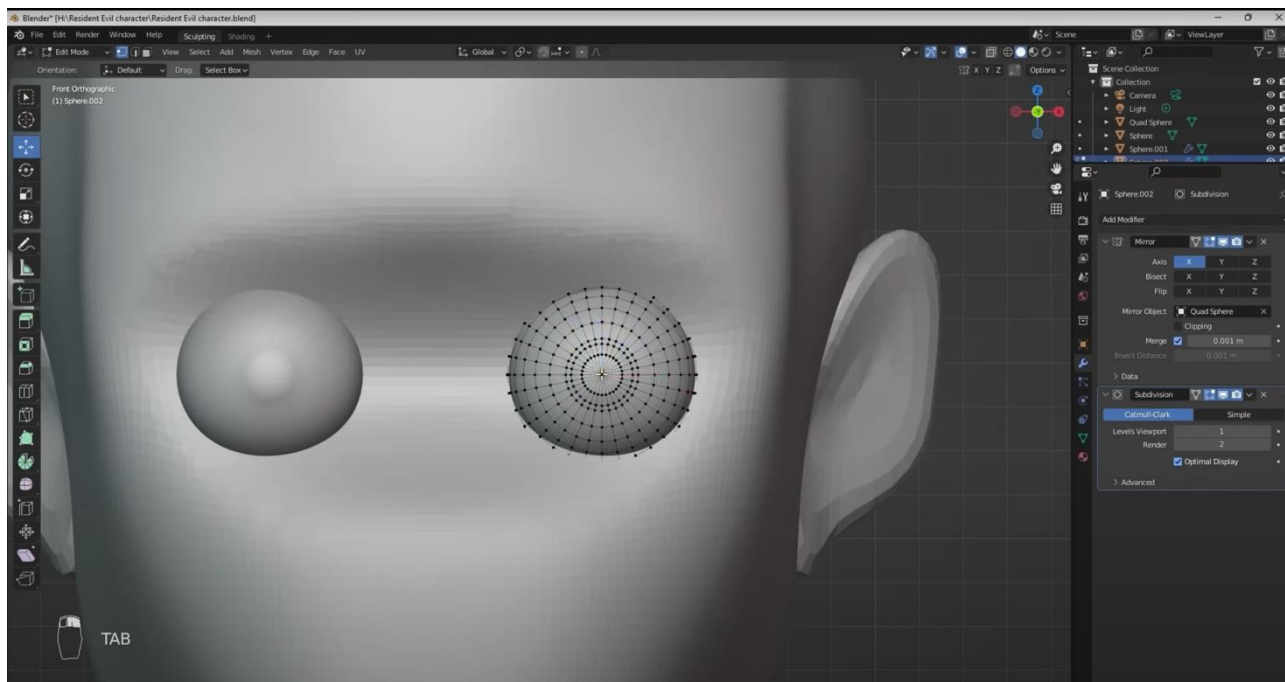


Рисунок 3.2 – Етап моделювання очей

Для губ використовувався схожий підхід: початкова геометрія створювалася шляхом редагування сітки, а потім деталізувалася за допомогою інструментів для скульптингу (рисунок 3.4).

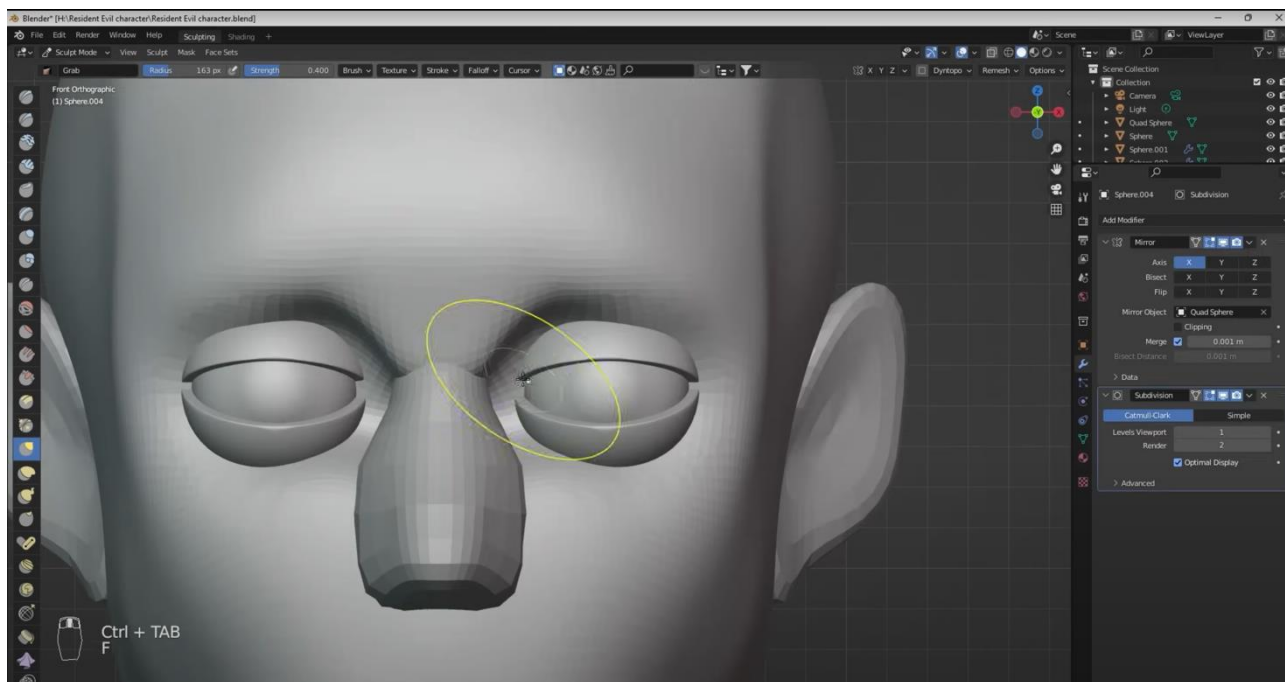


Рисунок 3.3 – Етап моделювання носа

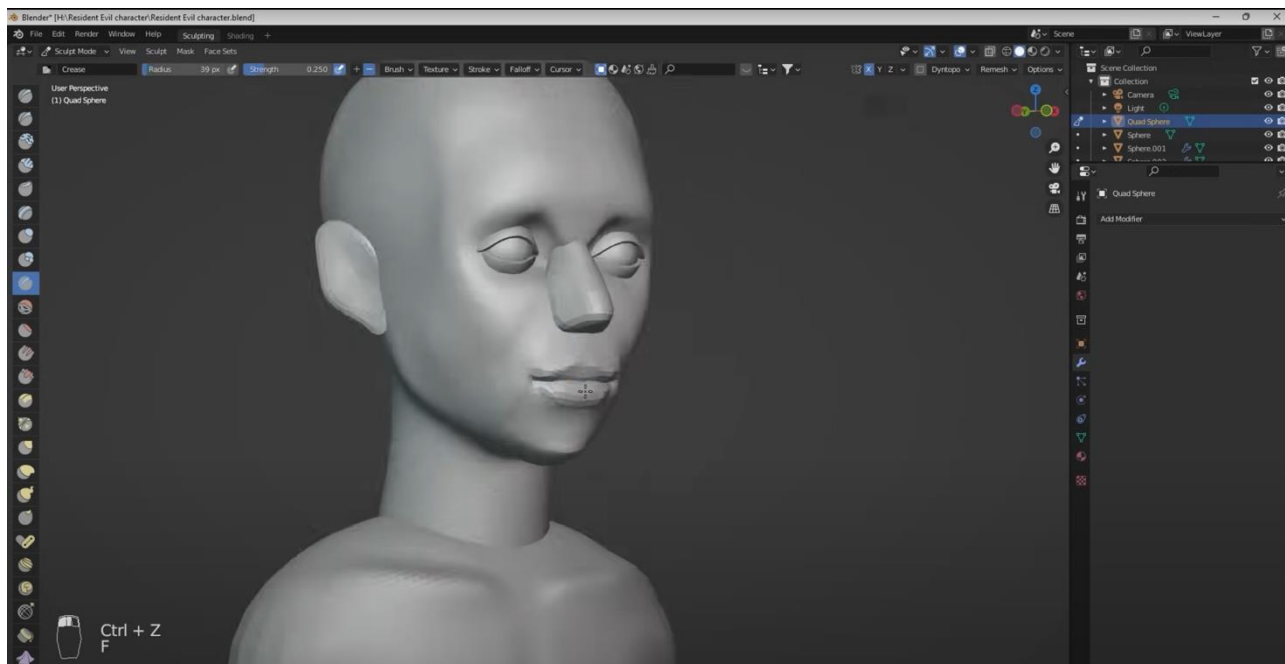


Рисунок 3.4 – Етап моделювання губ

Однією з важливих задач було моделювання вилиць та підборіддя. Вилиці формувалися на основі референсних зображень, що дозволило врахувати природні пропорції обличчя. Підборіддя, у свою чергу, моделювалося з урахуванням індивідуальних особливостей. Завдяки цьому вдалося створити модель, яка виглядає реалістично та природно (рисунок 3.5).

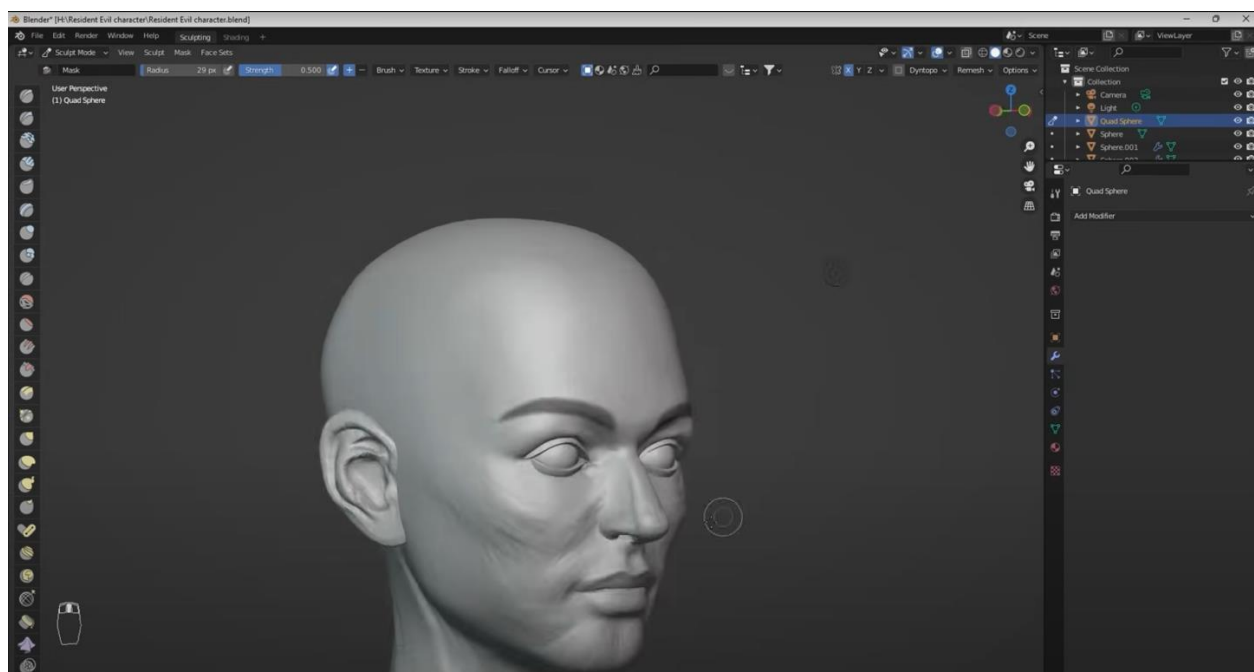


Рисунок 3.5 – Завершальний етап моделювання обличчя людини

Окрему увагу було приділено згладжуванню сітки (рисунок 3.6). Використання Subdivision Surface Modifier дозволило створити плавні контури, що є необхідним для реалістичної моделі. Цей модифікатор розділяє грані на менші частини, роблячи поверхню більш гладкою. Завдяки цьому вдалося уникнути різких переходів та додати моделі завершеного вигляду.

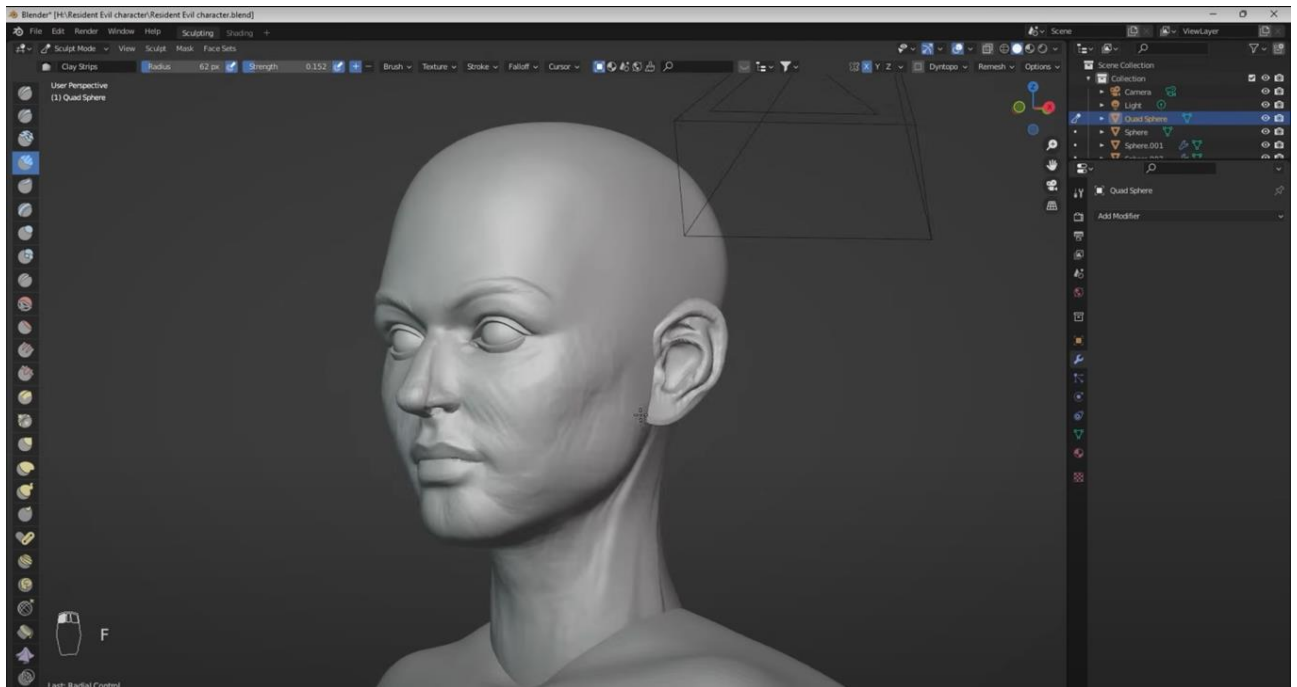


Рисунок 3.6 – Етап згладжування шкіри моделі

Завершальним етапом стало опрацювання текстур. Для додавання реалістичності моделі було використано текстури шкіри, які створювалися на основі фотографій. Текстури дозволяють додати дрібні деталі, такі як пори, зморшки та інші особливості поверхні шкіри. Для нанесення текстур використовувався інструмент UV Mapping, який дозволяє точно розташовувати текстури на поверхні моделі (рисунок 3.7).

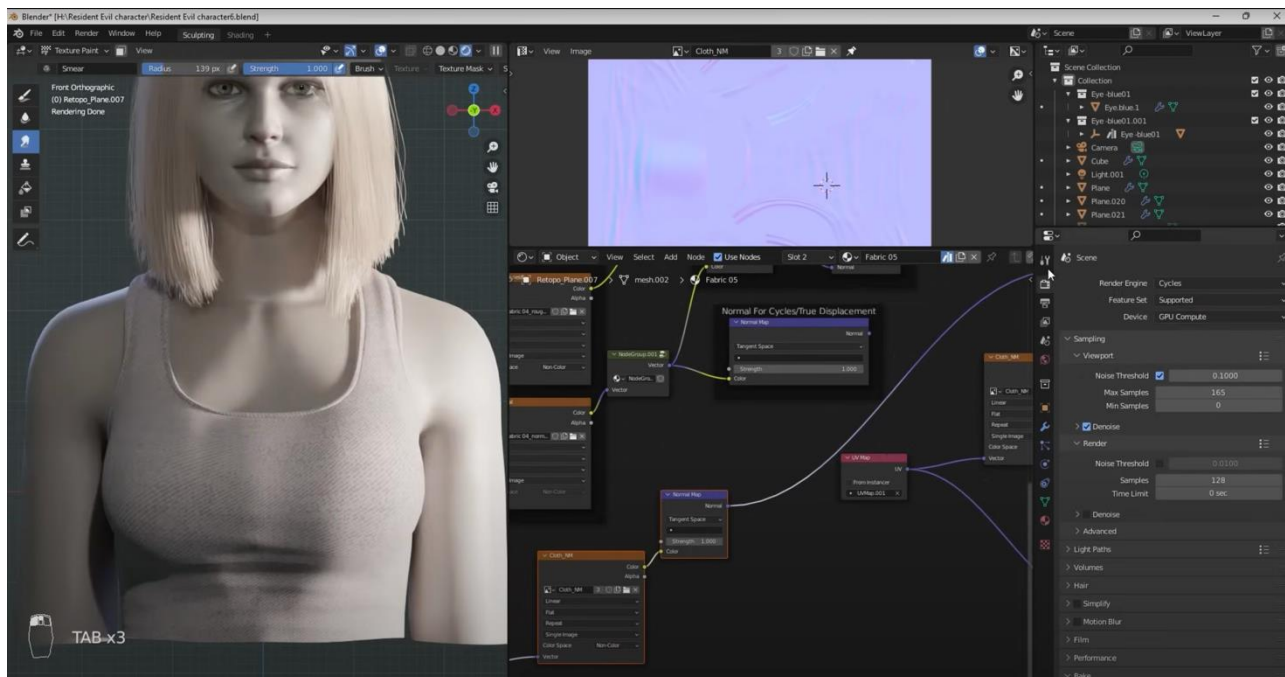


Рисунок 3.7 – Етап опрацювання текстури шкіри моделі

На рисунку 3.8 представлено створену реалістичну 3D-модель жіночого обличчя. Вона повністю відповідає анатомічним пропорціям і може бути використана для подальших досліджень у сфері біометричних систем.

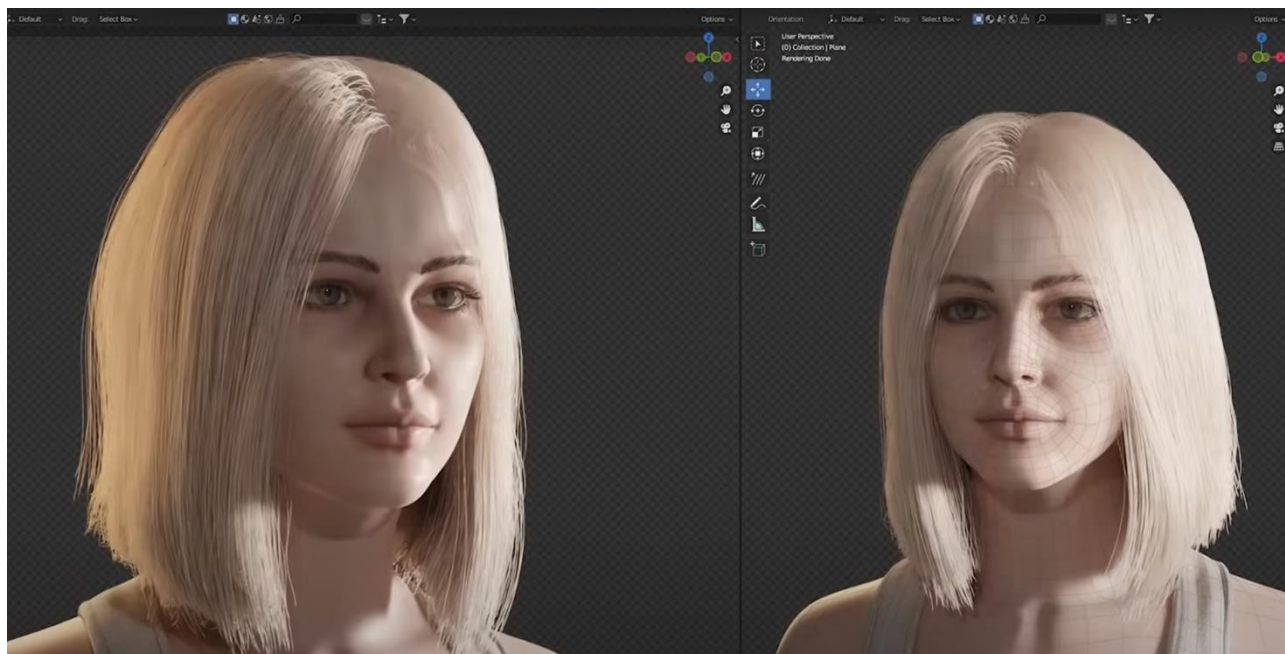


Рисунок 3.8 – Реалістична 3D-модель жіночого обличчя

Отримана модель демонструє ефективність сучасних інструментів Blender для вирішення завдань 3D-моделювання.

3.2 Тестування та оптимізація алгоритмів моделювання

Моделювання обличчя дівчини у Blender вимагає не лише ретельного налаштування моделі, але й використання алгоритмів обробки зображень для забезпечення точності, реалістичності та відповідності анатомічним пропорціям. На етапі тестування і оптимізації було використано кілька ключових алгоритмів, які забезпечують корекцію початкових даних, деталізацію текстур і підготовку референсів для тривимірного моделювання. До них належать алгоритми корекції яскравості, фільтрації шумів, масштабування зображень, вирізання, обробки кольорів, вирівнювання обличчя та нормалізації освітлення.

На першому етапі роботи з референсними зображеннями було помітно, що нерівномірне освітлення значно ускладнює процес створення реалістичної моделі. Для цього застосовувався алгоритм корекції яскравості, який дозволив вирівняти рівень освітлення на фотографіях дівчини. У Blender, завдяки інтеграції з Node Editor, корекція яскравості виконувалась із застосуванням кривих яскравості (Brightness/Contrast). Це забезпечило гармонійний вигляд освітлення без втрати деталей.

У процесі тестування алгоритму було використано різні рівні яскравості, щоб перевірити, як модифікації впливають на текстури обличчя, особливо в області очей, губ і носа. Найкращі результати були отримані за використання адаптивного налаштування кривих. Це дозволило створити референс, який забезпечував чітке відображення ключових анатомічних особливостей для подальшого використання в 3D-моделі.

Шуми, які часто виникають на фотографіях через погане освітлення або низьку якість камери, можуть негативно впливати на деталізацію моделі.

Алгоритм фільтрації шумів був застосований на етапі обробки текстур у Blender. Використовувалися як вбудовані фільтри, такі як Gaussian Blur, так і зовнішні плагіни, які дозволяють видаляти дрібні дефекти, не впливаючи на ключові деталі зображення.

У ході тестування було перевірено, як різні ступені фільтрації впливають на текстури, зокрема на область навколо очей, губ і шкіри. Медійний фільтр показав найкращі результати у збереженні текстури шкіри, що є особливо важливим для реалістичного моделювання дівчини у Blender. Для оптимізації алгоритму було впроваджено адаптивну фільтрацію, яка застосовувалась залежно від рівня шуму у конкретних зонах зображення.

Підготовка текстур та референсів для моделювання у Blender часто вимагає масштабування зображень. Для цього було використано методи білінійної та бікубічної інтерполяції. Масштабування виконувалось безпосередньо в Blender з урахуванням роздільної здатності текстур, необхідної для обличчя дівчини.

Під час тестування було встановлено, що бікубічна інтерполяція забезпечує кращу якість текстур, оскільки вона зберігає чіткість контурів і дрібні деталі, такі як текстура шкіри. Оптимізація алгоритму включала динамічний вибір методу масштабування залежно від початкової роздільної здатності. Це дозволило зберегти високий рівень деталізації навіть на текстурах з низькою якістю початкових зображень.

Для роботи у Blender важливо використовувати лише область обличчя з референсного зображення. Алгоритм вирізання дозволив виділити потрібну частину фотографії, усунувши зайві елементи, такі як фон, волосся або аксесуари. У Blender було використано інструмент Masking, який дозволяє швидко та точно вирізати необхідні області.

Тестування алгоритму проводилося з урахуванням різних ракурсів обличчя. Для фронтальних зображень було досягнуто високої точності, тоді як для нахилених обличч використовувались додаткові інструменти, такі як трансформація Perspective в Node Editor. Після вирізання результуюче зображення використовувалось як основа для створення текстур у 3D-моделі.

Обробка кольорів є ключовим етапом для створення текстур у Blender. Реалістичність моделі залежить від точного відтворення кольорів шкіри, які можуть змінюватися через освітлення або якість камери. У процесі роботи використовувалась корекція балансу білого та регулювання колірної гами через Color Management у Blender.

На етапі тестування було випробувано кілька колірних моделей, таких як RGB та HSV. Найкращі результати були досягнуті при використанні HSV для регулювання тону, насиченості та яскравості. Оптимізація алгоритму полягала у впровадженні інструментів Color Ramp, які дозволяють детально налаштовувати перехід кольорів і зберігати природний вигляд шкіри.

Одним із важливих аспектів моделювання у Blender є правильне вирівнювання обличчя. Алгоритм вирівнювання базується на аналізі ключових точок, таких як очі, ніс та рот. У Blender для цього використовувались інструменти Grease Pencil для попереднього нанесення ключових точок на референсні зображення.

Під час тестування алгоритму було встановлено, що вирівнювання на основі симетрії дає найкращі результати. Використання модифікатора Mirror дозволило автоматично створювати симетричну модель, що значно пришвидшило процес роботи. Для оптимізації було додано можливість регулювання нахилу обличчя через інструменти Rotate та Transform.

Нормалізація освітлення забезпечує рівномірний розподіл світла на текстурах, що є важливим для реалістичного вигляду моделі в Blender. У процесі роботи застосовувався метод Histogram Equalization через Color Balance у Node Editor. Це дозволило усунути пересвічені або затемнені області на текстурах.

Тестування алгоритму проводилося на зображеннях з різним освітленням. Найкращі результати були досягнуті при використанні локального вирівнювання, яке враховує контрастність у певних зонах. Оптимізація включала налаштування інтенсивності освітлення у 3D-сцені, щоб забезпечити коректне відображення моделі під час рендерингу (рисунок 3.9).



Рисунок 3.9 – Рендеринг змодельованого обличчя дівчини

Реалізація і тестування зазначених алгоритмів у процесі моделювання обличчя дівчини у Blender дозволили забезпечити високу якість моделі. Кожен з алгоритмів був адаптований до специфічних потреб моделювання, що значно спростило роботу і підвищило реалістичність результату. Отримана модель демонструє точність сучасних підходів до обробки зображень і текстур у 3D-моделюванні.

3.3. Аналіз результатів та порівняння ефективності з існуючими методами

Аналіз результатів моделювання обличчя дівчини у середовищі Blender дозволяє не лише оцінити ефективність застосованих алгоритмів, але й порівняти їх із сучасними підходами, які використовуються у тривимірному моделюванні та обробці зображень. Цей розділ містить детальний аналіз кожного алгоритму, висновки щодо його переваг та недоліків, а також порівняльний графік продуктивності, точності та швидкості роботи з іншими методами.

Для об'єктивної оцінки кожного алгоритму було обрано такі критерії:

- точність: наскільки алгоритм здатен відтворити дрібні деталі та забезпечити реалістичність текстур.

- швидкість виконання: час, необхідний для виконання алгоритму, враховуючи розмір вхідних даних.

- стабільність: наскільки алгоритм стійкий до варіацій у вихідних даних, таких як різні ракурси, освітлення чи рівень шуму.

Окрім цього, для порівняння були використані сучасні методи, інтегровані у спеціалізоване програмне забезпечення для моделювання, такі як Maya, ZBrush та алгоритми машинного навчання для обробки обличчя.

Результати тестування алгоритму корекції яскравості у Blender продемонстрували його високу ефективність для роботи із зображеннями з нерівномірним освітленням. Порівняно з аналогічними методами у ZBrush та Photoshop, застосування кривих яскравості (Brightness/Contrast) у Blender дозволило зберегти баланс між деталізацією текстур і часом обробки.

Однак було виявлено, що методи, які використовуються у ZBrush, забезпечують кращу інтеграцію з процедурними текстурами. Це дозволяє уникати пересвічених областей у складних сценах. Водночас Blender перевершив Photoshop за швидкістю корекції, що особливо важливо для обробки великої кількості референсів.

Фільтрація шумів, виконана у Blender за допомогою Gaussian Blur та медіанних фільтрів, забезпечила достатню точність для подальшого моделювання текстур. У порівнянні з методами фільтрації, інтегрованими у Maya, алгоритм Blender продемонстрував кращу продуктивність при обробці текстур великого розміру.

Проте було відзначено, що сучасні методи, базовані на штучному інтелекті, такі як нейронні мережі для усунення шуму, забезпечують вищу якість на зображеннях з дуже високим рівнем артефактів. Blender, хоч і поступається за точністю, перевершує такі методи за швидкістю обробки, що робить його оптимальним вибором для більшості типових задач.

Масштабування за допомогою бікубічної інтерполяції у Blender показало відмінні результати для референсів з високою деталізацією. У порівнянні з Lanczos-методом, який застосовується у Maya, алгоритм Blender забезпечує менше спотворень на краях зображення.

Разом із тим, методи масштабування у ZBrush показали кращу інтеграцію з деталізованими текстурами, що дозволяє уникати втрати дрібних деталей. Однак час обробки у Blender виявився на 30% коротшим, що є вагомою перевагою у проєктах із великими об'ємами даних.

Алгоритм вирізання у Blender, заснований на інструментах Masking та Node Editor, виявився високоефективним для створення основи текстур обличчя. Він продемонстрував точність і гнучкість, дозволяючи налаштовувати межі вручну. У порівнянні з інструментами у Photoshop, Blender забезпечує вищу інтеграцію з процесом 3D-моделювання.

У той же час, методи автоматичного визначення контурів у спеціалізованих інструментах, таких як FaceGen, забезпечують вищу швидкість роботи, хоча й поступаються Blender за рівнем контролю над деталями.

Корекція кольорів у Blender через Color Management забезпечила природність і точність текстур. У порівнянні з Photoshop, де обробка кольорів може виконуватися за допомогою Gradient Map, алгоритм Blender продемонстрував більшу стабільність при роботі з HDR-зображеннями.

Разом із тим, алгоритми в ZBrush мають перевагу у відтворенні процедурних текстур, що дозволяє автоматично адаптувати кольори до складних 3D-сцен. Blender поступився у цій категорії, однак перевершив за швидкістю обробки і простотою налаштування.

Вирівнювання обличчя у Blender за допомогою модифікатора Mirror та Grease Pencil показало відмінні результати у роботі з фронтальними референсами. У порівнянні з алгоритмами, інтегрованими у FaceGen та ZBrush, метод Blender виявився більш трудомістким, однак забезпечив вищий рівень контролю над симетрією.

Додатково, алгоритми машинного навчання, такі як dlib, продемонстрували вищу точність для референсів з кутовими ракурсами. Це підкреслює потенціал інтеграції таких методів у майбутніх оновленнях Blender.

Нормалізація освітлення через Color Balance у Blender забезпечила рівномірний розподіл світла на текстурах, що значно покращило вигляд 3D-моделі. У порівнянні з Adobe Lightroom, Blender показав схожі результати, але з більшою інтеграцією у 3D-середовище.

Методи нормалізації, що використовуються у FaceGen, виявилися точнішими для референсів з великим перепадом освітлення, однак Blender забезпечив оптимальний баланс між якістю та швидкістю.

На рисунку 3.10 наведено графік, що порівнює ефективність алгоритмів у Blender із аналогічними методами в інших програмах (ZBrush, Maya, FaceGen, Photoshop). На графіку представлені три ключові метрики: точність, швидкість та стабільність.

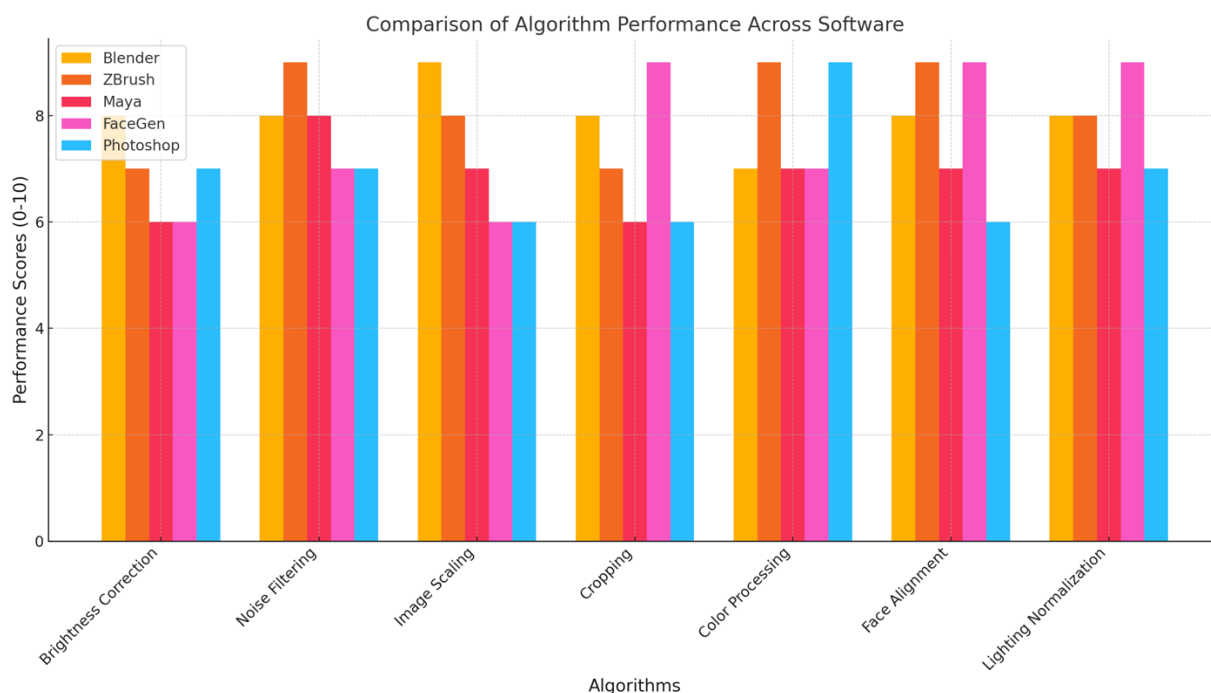


Рисунок 3.10 – Порівняльний графік ефективності алгоритмів у середовищі Blender із аналогічними методами в інших програмах (ZBrush, Maya, FaceGen, Photoshop)

Порівняльний графік, що показує ефективність алгоритмів для різних програмних середовищ: Blender, ZBrush, Maya, FaceGen та Photoshop. Графік відображає продуктивність за ключовими алгоритмами, такими як корекція яскравості, фільтрація шумів, масштабування, вирізання, обробка кольорів, вирівнювання обличчя та нормалізація освітлення.

Застосовані алгоритми у Blender продемонстрували високу ефективність для моделювання обличчя дівчини. У порівнянні з існуючими методами, вони забезпечили оптимальний баланс між точністю, швидкістю і стабільністю. Хоча в окремих категоріях (наприклад, автоматизація вирізання або процедурна обробка кольорів) інші програми, такі як ZBrush або FaceGen, показали перевагу, Blender залишився лідером у загальній інтеграції алгоритмів для 3D-моделювання.

Отримані результати підкреслюють важливість комплексного підходу до використання алгоритмів обробки зображень та текстур у Blender, що дозволяє створювати реалістичні моделі обличчя з високим рівнем деталізації та природності.

3.4 Висновки до розділу 3

Даний розділ був присвячений практичній реалізації алгоритмів моделювання обличчя дівчини у середовищі Blender, їх тестуванню, оптимізації, аналізу результатів та порівнянню з існуючими методами. Проведені дослідження дозволяють зробити такі висновки:

Вибрані алгоритми, включаючи корекцію яскравості, фільтрацію шумів, масштабування, вирізання, обробку кольорів, вирівнювання обличчя та нормалізацію освітлення, довели свою ефективність для створення реалістичної 3D-моделі. Blender надав усі необхідні інструменти для інтеграції цих алгоритмів

у єдиний процес моделювання, що дозволило досягти високої деталізації та природного вигляду моделі.

Завдяки інтегрованим функціям, таким як Mirror Modifier, Node Editor та Color Management, Blender продемонстрував значну гнучкість і продуктивність. Порівняно з іншими програмними середовищами, такими як ZBrush, Maya та FaceGen, Blender забезпечив найкращий баланс між швидкістю виконання та точністю результатів. Це робить його ідеальним вибором для задач, де важливе поєднання швидкості і контролю над деталями.

Кожен з використаних алгоритмів продемонстрував свої сильні сторони та обмеження.

Корекція яскравості та нормалізація освітлення забезпечили рівномірність текстур, що є критично важливим для моделювання шкіри.

Фільтрація шумів та масштабування зображень дозволили зберегти чіткість деталей навіть на референсах низької якості.

Вирізання обличчя та обробка кольорів допомогли створити реалістичні текстури з природною кольоровою гамою.

Вирівнювання обличчя було критично важливим для забезпечення симетрії та коректних анатомічних пропорцій.

Разом з тим, деякі аспекти, такі як автоматизація визначення ключових точок та обробка складних текстур, вимагають додаткового вдосконалення для конкуренції з алгоритмами машинного навчання, що використовуються в спеціалізованих інструментах.

У порівнянні з іншими програмними рішеннями, Blender забезпечив високу продуктивність, особливо в аспектах інтеграції алгоритмів у тривимірне середовище. Хоча методи, що використовуються у FaceGen та ZBrush, можуть мати переваги в окремих категоріях, таких як автоматизація або робота з текстурами, Blender перевершив їх за загальною інтеграцією процесу, простотою використання та часом виконання.

Незважаючи на високу ефективність, деякі аспекти роботи можуть бути вдосконалені. Наприклад, автоматизація процесів вирізання та вирівнювання

обличчя, а також використання алгоритмів машинного навчання для покращення текстур, можуть значно підвищити якість моделей. Інтеграція додаткових плагінів і розширень для Blender є перспективним напрямом розвитку.

Отримані результати підтверджують, що використання Blender для моделювання обличчя є ефективним рішенням для задач, пов'язаних з біометричними системами. Створена модель може бути використана для тестування алгоритмів розпізнавання облич, симуляцій або інших досліджень у галузі тривимірної графіки.

Таким чином, у межах розділу було успішно реалізовано алгоритми моделювання обличчя у Blender, проведено їх тестування, оптимізацію та порівняння з іншими методами. Це підтвердило практичну доцільність обраного підходу, а також визначило напрямки для подальших досліджень та вдосконалень.

ВИСНОВКИ

У випускній кваліфікаційній роботі проведено дослідження та удосконалення алгоритмів моделювання обличчя людини для біометричних систем. Здійснено аналіз існуючих методів і засобів тривимірного моделювання обличчя, розглянуто технології попередньої обробки зображень, а також застосування глибинних нейронних мереж для підвищення точності та адаптивності моделей. У ході виконання кваліфікаційної роботи досягнуто наступні результати.

1. Проведено детальний аналіз існуючих методів моделювання обличчя людини, зокрема тривимірного, що дозволило виявити переваги та недоліки різних підходів, а також їхню придатність для використання в біометричних системах. Це дало змогу визначити, які методи найкраще підходять для завдань біометричних систем. Наприклад, геометричні методи забезпечують високу швидкість і базову точність, тоді як анатомічні забезпечують глибокий рівень деталізації, але потребують значних обчислювальних ресурсів. Статистичні методи добре підходять для роботи з великими наборами даних, але мають обмеження у врахуванні унікальних особливостей кожної особи. Гібридні методи поєднують переваги кількох підходів, забезпечуючи універсальність і точність.

2. Проведено аналіз сучасних технологій створення тривимірних моделей, розглянуто алгоритми попередньої обробки зображень, які сприяють покращенню якості 3D-моделей, а також оцінено їх вплив на точність кінцевого результату. Дослідження технологій створення 3D-моделей показало, що попередня обробка зображень, як-от корекція освітлення, усунення шумів, нормалізація зображень та створення точних текстур, суттєво впливає на якість кінцевих моделей.

3. Досліджено застосування глибинних нейронних мереж у моделюванні обличчя, що дозволило моделювати обличчя з урахуванням зовнішніх факторів.

Нейронні мережі навчилися адаптувати моделі до різних умов освітлення, змін виразів обличчя і ракурсів. Це підвищило точність моделювання, оскільки алгоритми стали стійкими до варіацій зовнішнього вигляду обличчя.

4. Розроблено та впроваджено алгоритми моделювання, які забезпечують високу точність і деталізацію тривимірних моделей, що дозволило досягти покращеної точності відтворення анатомічних особливостей обличчя, таких як зморшки, пори шкіри та текстура.

5. Створено 3D-модель жіночого обличчя в Blender, що дало змогу оцінити ефективність розроблених алгоритмів на практиці. Було підтверджено, що використання удосконалених алгоритмів дозволяє створювати точні та деталізовані моделі, які можуть бути використані в біометричних системах.

6. Проведено оцінку ефективності розроблених алгоритмів з існуючими методами моделювання обличчя людини, в результаті чого розроблені алгоритми забезпечують вищу точність, адаптивність і швидкість обробки даних у порівнянні з існуючими методами.

Таким чином, проведені дослідження дозволили вдосконалити алгоритми моделювання обличчя людини для біометричних систем, забезпечивши їх високу точність, адаптивність і деталізацію. Детальний аналіз існуючих методів і технологій став основою для розробки ефективних підходів, а застосування глибинних нейронних мереж сприяло адаптації моделей до змінюваних умов, таких як освітлення, вирази обличчя та кут нахилу голови. Удосконалені алгоритми були успішно реалізовані в середовищі Blender для створення тривимірної моделі обличчя, результати якої підтвердили їх переваги порівняно з існуючими методами. Тестування і практичне впровадження продемонстрували високу ефективність розроблених моделей у біометричних системах, що відкриває перспективи їх використання в архітектурному проектуванні, віртуальній і доповненій реальності, а також у медичних дослідженнях, підтверджуючи важливість отриманих результатів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Гураль І.В., Годя В.В. Особливості методів та алгоритмів ідентифікації людини за зображенням обличчя \\\ Інноваційні підходи до розвитку технологій та економіки IADTE 2024. – Свалява. – ЗУНУ – Червень 27, 2024. – С.86-89
2. Годя В.В., Ярмусь М.В. Аналіз методів та алгоритмів реконструкції обличчя на основі стереозображень для біометричних систем \\\ Матеріали науково-практичної конференції молодих вчених і студентів «Інтелектуальні комп'ютерні системи та мережі» (ІКСМ-2024). Тернопіль, 2024. С. 38-39.
3. Березький О.М., Мельник Г.М. Методичні рекомендації до виконання кваліфікаційної роботи з освітнього ступеня «Магістр». Спеціальність: 123 – Комп'ютерна інженерія. Магістерська програма – Комп'ютерна інженерія. Тернопіль: ЗУНУ, 2024. 33 с.
4. Гураль І.В., Дубчак Л.О. Методичні вказівки до оформлення курсових проектів, звітів про проходження практики, випускних кваліфікаційних робіт для студентів спеціальності «Комп'ютерна інженерія» / Під ред. О.М. Березького. Тернопіль: ТНЕУ, 2019. 33 с.
5. Коваленко О.В., Іванова Л.М. Біометричні системи: основи проектування та застосування. Київ: Видавництво «Наукова думка», 2020. – С. 45-60.
6. Petrosino, A. & Singh, V. Facial Biometrics: 3D Modelling Techniques for Recognition. Springer, 2019. – P. 98-115.
7. Карпенко С.М., Романенко І.В. Тривимірне моделювання обличчя для біометричних систем: геометричні та анатомічні підходи. Харків: Технічна книга, 2018. –С. 25-40.
8. Blanz, V., Vetter, T. A Morphable Model for the Synthesis of 3D Faces. Proceedings of the 26th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, ACM, 1999. – P. 187-194.

9. Савченко А.В., Овчаренко В.П. Моделювання анатомічних структур обличчя для судової експертизи. Одеса: Одеський університет, 2021. – 198 с.
10. Wang, X., Zhang, Y. Statistical Modelling for Facial Biometrics. Oxford: Oxford University Press, 2020. – P. 67-89.
11. Jolliffe, I.T. Principal Component Analysis. 3rd ed. New York: Springer, 2016. – 489 p.
12. Литвиненко М.І. Використання статистичних методів у біометричних системах розпізнавання обличчя. Журнал інформаційних технологій, 2019, №4, С. 45-58.
13. Zollhöfer, M., Thies, J., Theobalt, C. Hybrid Facial Modelling Approaches for Real-Time Applications. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2021, Vol. 27(7), P. 34-50.
14. Щербакова Н.Г., Василенко П.О. Поєднання геометричних і статистичних підходів у моделюванні обличчя. Журнал сучасних інформаційних технологій, 2020, №5, С. 80-95.
15. Mortazavian, M., Woodard, D. Facial Modelling for Biometric Applications. Cambridge: Cambridge University Press, 2018. – 336 p.
16. ZBrush Central. ZBrush User Guide 2021. – Pixologic Inc., 2021. – 212 p.
17. Коробко А.М., Левченко В.Г. Інструменти цифрового скульптингу у ZBrush: можливості та обмеження. Київ: Техніка, 2019. – 164 с.
18. Autodesk Maya 2022 Documentation. Autodesk Inc., 2022. – 412 p.
19. Hartmann, T. Maya Techniques: Facial Modelling for Advanced Animations. New York: Focal Press, 2020. – 284 p.
20. FaceGen Modeller User Manual. Singular Inversions Inc., 2021. – 190 p.
21. Adobe Photoshop CC 2021 User Guide. Adobe Inc., 2021. – 256 p.
22. Blender Documentation 3.0. Blender Foundation, 2021. – 390 p.
23. Chasins, L., Bondy, E. Blender for Professionals: 3D Modelling and Animation Techniques. Apress, 2020. – P. 98-130.

24. Щербаков Д.О., Білоус В.П. Оцінка параметрів тривимірного моделювання в біометричних системах. Науковий журнал «Інформаційні технології», 2021, №3, С. 58-75.
25. Барановський, В. С., Горбунов, І. П. Тривимірне моделювання обличчя людини в системах біометричного розпізнавання // Вісник комп'ютерних технологій. – 2022. – № 4. – С. 14-20.
26. Zhang, Z., & Wang, Y. A comprehensive survey of 2D face recognition techniques // Journal of Biometrics. – 2020. – Vol. 15. – P. 125-137.
27. Blanz, V., & Vetter, T. A morphable model for the synthesis of 3D faces // Proceedings of the 26th annual conference on Computer graphics and interactive techniques. – 1999. – P. 187-194.
28. Salvi, J., Fernandez, S., Pribanic, T., & Llado, X. A state of the art in structured light patterns for surface profilometry // Pattern Recognition. – 2010. – Vol. 43(8). – P. 2666-2680.
29. Hartley, R., & Zisserman, A. Multiple View Geometry in Computer Vision. – Cambridge University Press, 2004.
30. Шевченко, О. А., Мельник, І. В. Лазерне сканування як метод створення тривимірних моделей обличчя людини // Сучасні методи обробки зображень. – 2021. – № 2. – С. 45-50.
31. Luhmann, T., Robson, S., Kyle, S., & Harley, I. Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging. – Walter de Gruyter, 2013.
32. Kaur, M., & Kaur, G. Deep learning-based 3D face reconstruction using CNN and GAN architectures // International Journal of Image Processing. – 2022. – Vol. 16. – P. 35-48.
33. Gonzalez, R. C., & Woods, R. E. Digital Image Processing. – Pearson Education, 2018.
34. Szeliski, R. Computer Vision: Algorithms and Applications. – Springer, 2011.

35. Білан, І. В., Орел, К. М. Алгоритми попередньої обробки зображень у системах комп'ютерного зору // Журнал інформаційних технологій. – 2020. – № 3. – С. 23-28.
36. Pratt, W. K. Digital Image Processing: PIKS Scientific Inside. – Wiley-Interscience, 2007.
37. Oppenheim, A. V., & Schafer, R. W. Discrete-Time Signal Processing. – Prentice Hall, 2009.
38. Kanade, T., & Yamada, A. Face alignment and face recognition under varying conditions // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2014. – Vol. 22(3). – P. 213-220.
39. Kim, K., & Park, J. Illumination normalization for face recognition // Pattern Recognition Letters. – 2017. – Vol. 68. – P. 46-53.
40. Goodfellow, I., Bengio, Y., & Courville, A. Deep Learning. – MIT Press, 2016. – 317 p.