

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

ПАСЬКО Вадим Володимирович

**Програмна тривимірна модель голови людини для
систем віртуальної реальності / Software three-
dimensional model of a human head for virt reality
systems**

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

Кваліфікаційна робота

Виконав: студент групи КІ-41
Пасько Вадим Володимирович

Науковий керівник
к.т.н. Гураль І.В.

ТЕРНОПІЛЬ - 2024

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота на тему «Програмна тривимірна модель голови людини для систем віртуальної реальності» зі спеціальності 123 «Комп'ютерна інженерія» освітнього ступеня «бакалавр» містить 72 сторінки пояснюючої записки, 14 рисунків, 4 додатки. Обсяг графічного матеріалу 2 аркуші формату А3.

Метою роботи полягає у розробці програмної тривимірної моделі голови людини для систем віртуальної реальності, яка забезпечить реалістичне та точне представлення користувачів у віртуальному середовищі.

Методи дослідження включають існуючі методи рендерингу, тривимірного моделювання, алгоритмічного проектування, програмування, експериментальних досліджень, оптимізації обчислювальних процесів та порівняльного аналізу.

Зазначена кваліфікаційна робота присвячена питанням розробки програмної тривимірної моделі голови людини для систем віртуальної реальності. У роботі проведений аналіз існуючих методів побудови геометричної моделі голови людини, а також розглянуто алгоритми побудови моделі голови людини для використання в системах віртуальної реальності.

Реалізовано програмну тривимірну модель голови людини для систем віртуальної реальності, а також створено текстуру для реалістичного візуального вигляду моделі. Розробка програмної моделі забезпечує реалістичне та точне представлення користувачів у віртуальному середовищі.

Ключові слова: ПРОГРАМНА МОДЕЛЬ, ТРИВИМІРНА МОДЕЛЬ, ГОЛОВА ЛЮДИНИ, ТЕКСТУРА, ВІРТУАЛЬНА РЕАЛЬНОСТЬ.

ANNOTATION

The qualification paper on the topic «Software three-dimensional model of a human head for virtual reality systems» in the specialty 123 «Computer Engineering» for the educational Bachelor degree contains 72 pages of explanatory note, 14 figures and 4 appendices. The volume of graphic material is 2 sheets of A3 format.

The aim of the work is to develop a software 3D model of a human head for virtual reality systems, which will provide a realistic and accurate representation of users in a virtual environment.

Research methods include existing rendering methods, 3D modeling, algorithmic design, programming, experimental research, optimization of computational processes, and comparative analysis.

This qualification work is devoted to the development of a software 3D model of a human head for virtual reality systems. The work includes an analysis of existing methods for constructing geometric models of the human head, as well as algorithms for building a human head model for use in virtual reality systems.

The software 3D model of a human head for virtual reality systems has been implemented, and a texture has been created for a realistic visual appearance of the model. The development of the software model ensures a realistic and accurate representation of users in the virtual environment.

Keywords: SOFTWARE MODEL, 3D MODEL, HUMAN HEAD, TEXTURE, VIRTUAL REALITY.

ЗМІСТ

Вступ.....	10
1 Аналіз методів побудови геометричної моделі голови людини	12
1.1 Класифікація основних методів побудови тривимірних моделей	12
1.2 Обґрунтування вибору невільної локальної моделі голови людини	14
1.3 Оцінка параметрів геометричної моделі голови людини	21
1.4 Постановка завдання кваліфікаційної роботи.....	25
2 Алгоритми побудови моделі голови людини для використання в системах віртуальної реальності	27
2.1 Основні етапи побудови тривимірних моделей голови людини	27
2.2 Алгоритм генерації базової текстури при побудові голови людини	30
2.3 Алгоритми синтезу текстури позаду вуха.....	33
2.3 Алгоритми синтезу текстури потилиці, тім'я та очей.....	35
3 Реалізація тривимірної моделі голови людини для систем віртуальної реальності.....	40
3.1 Налаштування та моделювання геометрії голови людини для систем віртуальної реальності	40
3.2 Створення текстур для реалістичного візуального вигляду моделі	44
3.3 Інтеграція та оптимізація моделі голови для використання у системах віртуальної реальності	48
Висновки	53
Список використаних джерел.....	54
Додаток А Світлокопія публікації.....	58

					КР.КІ. 07128/20.00.00.002 ПЗ			
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Програма тривимірна модель голови людини для систем віртуальної реальності	Літ.	Арк.	Акрюшів
Розробив	Пасько В.В.							
Перевір.	Гураль І.В.						7	
Консульт.	Савка Н.Я.					ЗУНУ,ФКІТ, КІ-41		
Н. Контр.								
Затвердив	Дубчак Л.							

Додаток Б Класифікація методів побудови тривимірної моделі голови людини.
 Схема структурна61
 Додаток В Схема накладання графічної текстури. Схема загальна.....62
 Додаток Г Техніко-економічне обґрунтування розробки програмної тривимірної
 моделі голови людини для систем віртуальної реальності.....63

					КР.КІ.07128/20.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

У сучасному світі віртуальна реальність стає дедалі популярнішою технологією, яка знаходить застосування в різних сферах, таких як освіта, бізнес, медицина, розваги та багато інших. Зокрема, тривимірні розподілені багатокористувацькі системи віртуальної реальності дозволяють проводити віртуальні збори, конференції та семінари, що є особливо актуальним у зв'язку з глобальними тенденціями до дистанційної роботи та навчання. Однією з ключових вимог для таких систем є реалістичне та інтуїтивне представлення користувачів у вигляді тривимірних моделей, що значно покращує взаємодію та сприйняття віртуального середовища. Тому розробка програмної тривимірної моделі голови людини, яка б точно відтворювала риси керуючого нею користувача, є надзвичайно актуальною задачею.

Об'єктом дослідження є процес створення тривимірної моделі голови людини, яка використовується в багатокористувацьких системах віртуальної реальності

Предметом дослідження є технології та методи створення тривимірних моделей для систем віртуальної реальності.

Метою роботи є розробка програмної тривимірної моделі голови людини для систем віртуальної реальності, яка забезпечить реалістичне та точне представлення користувачів у віртуальному середовищі.

Завдання дослідження базується на проведенні аналізу існуючих методів та інструментів для створення тривимірних моделей голови людини, розробки алгоритмів для генерації тривимірної моделі голови, що включають етапи сканування, обробки даних та текстурування, здійсненні інтеграції розробленої моделі в систему віртуальної реальності та забезпечити її взаємодію з іншими елементами системи та проведенні тестування і оцінки реалістичності та продуктивності розробленої тривимірної моделі голови.

					КР.КІ.07128/20.00.00.000 ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Результати досліджень були представлені у вигляді тез доповіді на конференції «Інтелектуальні комп'ютерні системи та мережі». Копії цих тез наведено у додатку А.

Випускна кваліфікаційна робота складається із трьох розділів [2-6].

Перший розділ описує аналіз методів створення геометричної моделі голови людини і розглядає вибір найбільш підходящої невільної локальної моделі для обличчя.

У другому розділі представлені алгоритми для створення моделі голови людини з метою застосування у віртуальній реальності.

Третій розділ присвячений реалізації тривимірної моделі голови людини для використання в системах віртуальної реальності.

					КР.КІ.07128/20.00.00.000 ПЗ	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ПОБУДОВИ ГЕОМЕТРИЧНОЇ МОДЕЛІ ГОЛОВИ ЛЮДИНИ

1.1 Класифікація основних методів побудови тривимірної моделі голови людини

Тривимірна модель голови людини може бути представлена різними способами. Найпопулярнішими з яких є: карта глибини, хмари точок, полігональна модель, параметрична модель, що описує антропометричні характеристики голови людини [7]. Побудова тривимірної моделі голови людини може здійснюватися за допомогою активних (освітлювальних) або пасивних систем (додаток Б).

Однак у перших підходах (що використовують структуроване освітлення [8-10] або оцінюють час польоту сигналу [11]) потрібне спеціалізоване обладнання, причому висока якість досягається лише за допомогою дороговартісних систем, через що широке застосування подібних рішень неможливе.

Основними пасивними методами побудови тривимірної моделі голови людини є фотометричні (що надають оцінку нормалей до поверхні при спостереженні об'єкта в різних умовах освітлення) [12], стереоскопічні (які будують карту глибини за допомогою оцінки диспаратності між точками одного зображення стереопари та точками другого зображення) [13], фотограмметричні (оцінюють тривимірні координати вершин об'єкта за характерними точками набору зображень) [14], методи підгонки параметричної моделі безпосередньо до зображення [15], а також методи оцінки параметрів тривимірної моделі голови людини з урахуванням виявлених на вхідних зображеннях антропометричних точок обличчя [16]. Однак перші два підходи дозволяють моделювати лише обличчя, тоді як у системах віртуальної реальності потрібна побудова всієї моделі голови. Крім того, побудова моделі високої точності, як за допомогою стереопари, так і з використанням фотометричних методів, потребує каліброваного обладнання, що сильно обмежує практичну застосовність подібних підходів.

					КР.КІ.07128/20.00.00.000 ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Фотограметрія, стереоспостереження та фотометрія є загальними методами побудови тривимірних моделей за зображеннями, які не враховують особливості моделі голови людини. Методи підгонки параметричної моделі безпосередньо до зображення також мають ряд недоліків: вони потребують ручного встановлення параметрів освітлення та камери, не дозволяють коригувати роботу алгоритму на проміжних етапах, суб'єктивне тестування результатів роботи демонструє оцінку якості нижче задовільного у більш ніж 20% випадків [17], крім того такі методи потребують складної параметричної моделі, що містить не лише компоненту форми, а й текстурну компоненту, що робить неможливим використання такого підходу для більш простих параметричних моделей, використовуваних у сучасних системах віртуальної реальності.

Отже, для побудови моделі голови людини для систем віртуальної реальності з мінімальними вимогами до вхідних даних та мінімальним обсягом взаємодії з користувачем при безпосередній побудові тривимірної моделі за набором зображень оптимальним є підхід виявлення антропометричних точок.

Виявлення антропометричних точок обличчя людини має велике значення в різних сферах застосування – від розпізнавання облич, оцінки статі та віку, аналізу виразу обличчя людини до відстеження його у відеопотоці, розпізнавання рухів губ, карикатурної малювання, анімації та побудови тривимірних моделей. Задача полягає у виявленні координат певної кількості антропометричних точок обличчя на основі двох фотографій обличчя людини, а саме: анфас і профіль. Важливо забезпечити узгодженість положення одних і тих самих точок обличчя на обох фотографіях.

Антропометрична точка – це характерна особливість, притаманна більшості розглянутих вхідних зображень, така як кут лівого ока, правий кут рота, кінчик носа тощо. Виявлення антропометричних точок обличчя еквівалентне виявленню характерних рис обличчя, оскільки антропометричні точки окреслюють характерні риси.

					КР.КІ.07128/20.00.00.000 ПЗ	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Існують різні категорії алгоритмів виявлення антропометричних точок, такі як деформовані локальні моделі, активні моделі зовнішнього вигляду, регресійні алгоритми, алгоритми на основі графічних моделей, алгоритми спільного виявлення, незалежні детектори, алгоритми глибокого навчання.

Виявлення антропометричних точок обличчя на двох фотографіях анфас і профіль, у певному сенсі, також відноситься до алгоритмів спільного виявлення. Проте в сучасній літературі під алгоритмами спільного виявлення точок обличчя розуміють алгоритми, які працюють з набором фотографій анфас, у той час як у даній роботі розглядається робота з двома фотографіями: анфас і профіль.

В рамках даної бакалаврської роботи вибрано підхід на основі невірних локальних моделей, оскільки це добре обґрунтований клас алгоритмів, що дозволяє адаптувати його під нові завдання, включаючи задачу виявлення точок на двох фотографіях: анфас і профіль.

Невірні локальні моделі поєднують переваги активних моделей форми і зовнішнього вигляду, і надають більш точні результати порівняно з ними.

1.2 Обґрунтування вибору невірної локальної моделі голови людини

У рамках поставленої задачі особливий інтерес представляють алгоритми, які використовують невірні локальні моделі, найбільш загальний опис таких моделей подано у роботі Дж. Сарагиха [18]. Для кращого сприйняття деякі антропометричні точки з'єднані лініями, проте лінії не входять до моделі і використовуються лише для наочності.

Модель форми визначає набір допустимих форм обличчя людини (рисунок 1.1 (в)). Допустимість визначається за допомогою моделі точкового розподілу.

					КР.КІ.07128/20.00.00.000 ПЗ	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

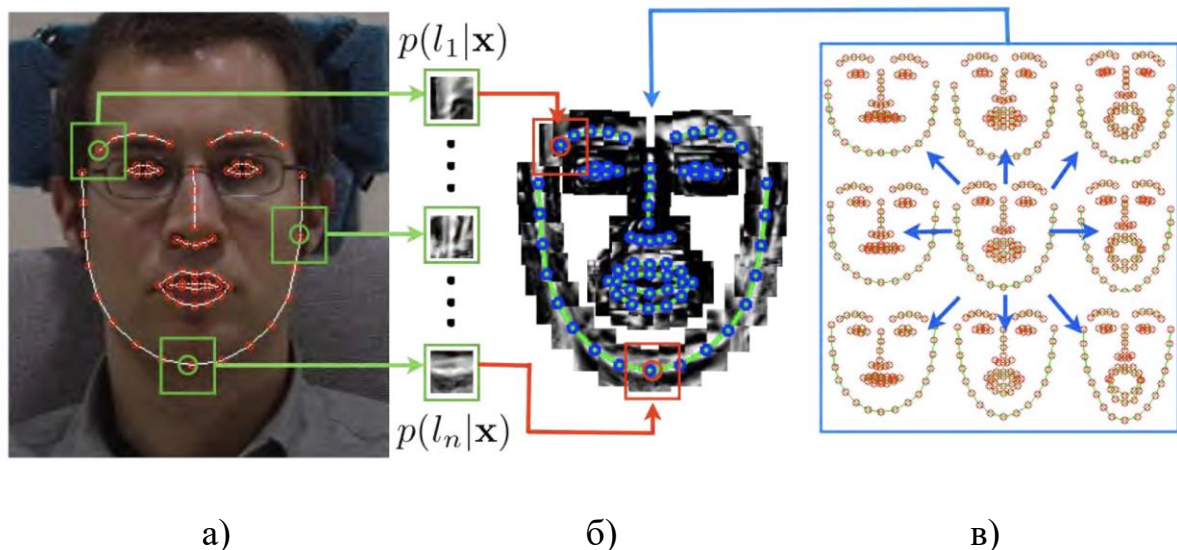


Рисунок 1.1 – Невільна локальна модель точкового розподілу обличчя людини: а) області пошуку і антропометричні точки; б) карти відгуку; в) модель форми обличчя людини

Профільна модель для кожної антропометричної точки описує оточення навколо цієї характерної точки обличчя людини [19]. Модель визначає, як повинна виглядати область навколо конкретної антропометричної точки. Карта відгуку демонструє непараметризоване розподіл положень антропометричних точок.

Невільна локальна модель [20] описує обличчя людини за допомогою двох складових – моделі форми обличчя (внутрішня енергія) та профільних моделей для кожної точки обличчя, що входить до моделі форми (зовнішня енергія). Обидві енергії мінімізуються одночасно. Виявлення антропометричних точок обличчя за допомогою невірних локальних моделей виконується ітеративно наступним алгоритмом.

Крок 1. Вхідні дані: зображення обличчя людини.

Крок 2. Виявлення обличчя на зображенні та генерація початкової форми.

Крок 3. Побудова карти відгуку в околиці кожної точки.

Крок 4. Оцінка параметрів форми з урахуванням карт відгуку доти, поки не досягнута збіжність.

Крок 5. Перевірка умов збіжності.

Крок 6. Вихідні дані: координати антропометричних точок обличчя людини.

Алгоритм збігається, якщо виконується одна з умов:

- 1) сума зміщень точок на кожній ітерації менша за заданий поріг;
- 2) досягнуто максимальне число ітерацій.

Варто зазначити, що існуючі методи виявлення антропометричних точок з використанням невірних локальних моделей мають певні недоліки (рисунок 1.2).

Тому для вирішення цих проблем пропонується наступне.

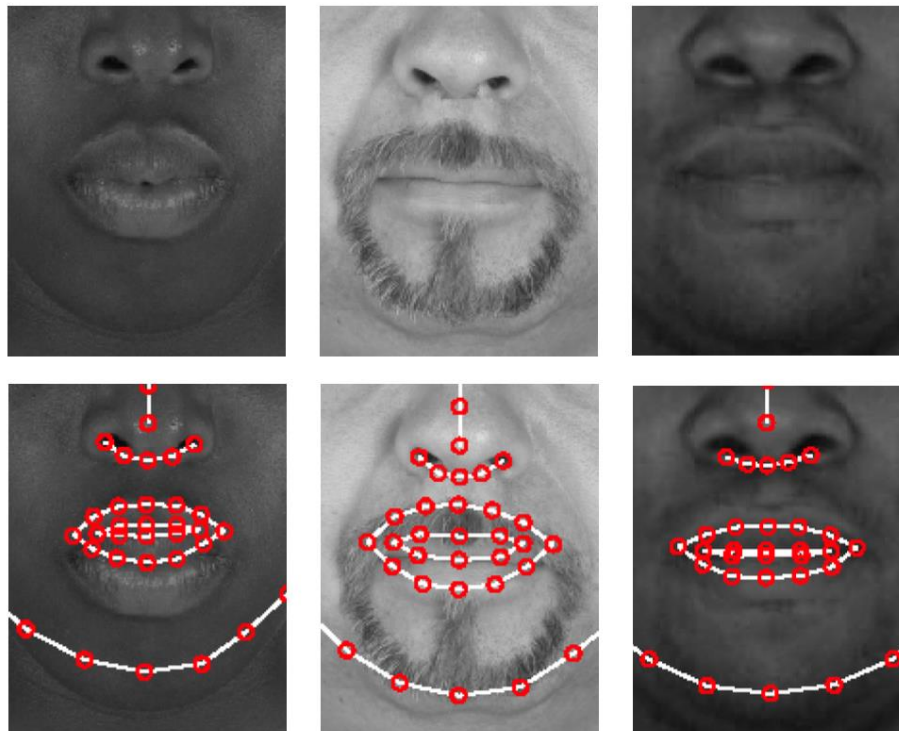


Рисунок 1.2 – Приклади некоректно виявлених точок обличчя алгоритмом Сарагіха [21] на фотографіях з великими губами, вусами та широким носом

Вимоги алгоритму до вхідних фотографій маю бути такі: дві кольорові фотографії анфас та профілю, ширина обличчя на фотографії має бути не менше 512 пікселів (ця вимога зумовлена якістю генерованої текстури), обличчя людини повинно бути з нейтральними емоціями та відсутні будь-які об'єкти, що перекривають обличчя, включаючи окуляри. Проте, незважаючи на довгий перелік

					КР.КІ.07128/20.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

вимог, потрібні фотографії можуть бути легко отримані не досвідченим фотографом за допомогою звичайної камери або смартфона.

Для отримання точних результатів у автоматичному режимі роботи алгоритму, фотографії повинні строго відповідати формату анфас та профілю.

Враховуючи те, що комплекс алгоритмів, запропонований у даній роботі, розбитий на окремі кроки, що дозволяє користувачеві легко вносити проміжні корективи, можливі значні відхилення обличчя на фотографіях від позицій анфас та профілю. У такому разі користувачу необхідно вручну коригувати положення невірно визначених антропометричних точок за допомогою інструментального засобу вагово-групових перетворень.

На вхід алгоритму можуть подаватися не лише дві фотографії, але й три (анфас, в профіль ліворуч, в профіль праворуч), або одна. Робота з трьома фотографіями аналогічна роботі з двома. Проте при роботі з однією фотографією – анфас – в якості профільних параметрів моделі голови використовуються середньо-статистичні параметри. Однак, оскільки додаткові фотографії дозволяють отримати більш точну модель, у подальшій роботі розглядатимуться лише вхідні дані у вигляді двох фотографій: анфас та будь-яка фотографія в профіль (рисунок 1.3).

Крок 1. Визначення положення та розміру обличчя людини.

Крок 2. Навчання та тестування локальних моделей.

Крок 3. Оцінка параметрів невірних локальних моделей.

Крок 4. Пошук параметрів моделі.

Крок 5. Оцінка якості розмітки.

На першому кроці відбувається визначення положення та розміру обличчя людини із використанням глобального детектора облич, зокрема детектора Віоли-Джонса [22] для анфас та каскаду гістограм локальних бінарних шаблонів для профілю (рисунок 1.4).

					КР.КІ.07128/20.00.00.000 ПЗ	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 1.3 – Приклади вхідних фотографій:

- а), б) – допустимі вхідні фотографії анфас і в профіль;
 в) – недопустимі фотографії

На першому кроці відбувається визначення положення та розміру обличчя людини із використанням глобального детектора облич, зокрема детектора Віоли-Джонса [22] для анфас та каскаду гістограм локальних бінарних шаблонів для профілю (рисунок 1.4).



Рисунок 1.4 – Виявлення антропометричних точок обличчя на фотографіях анфас та у профіль

На другому кроці алгоритму відбувається тестування локальних моделей із використанням баз облич MUCT та BioID для навчання та будується ручна розмітка бази профільних фотографій облич.

На третьому кроці відбувається оцінка параметрів невірних локальних моделей, тобто проводиться мінімізація енергії за допомогою пошуку параметрів моделі та вибір параметрів, які мінімізують енергію. Параметри алгоритму налаштовані так, щоб при нехтуванні оптимізацією алгоритму за часом роботи максимізувати точність виявлення положення та розміру обличчя та антропометричних точок.

На четвертому кроці запропонованого алгоритму відбувається пошук параметрів, що мінімізують внутрішню та зовнішню енергії, а також проводиться вихід з циклу за визначеними умовами (кількість ітерацій, відсоток точок з малим зсувом). Пошук параметрів моделі відбувається у циклі, вихід з якого здійснюється при досягненні будь-якого з наступних умов:

- 1) кількість ітерацій при поточному значенні дисперсії шуму досягає максимального значення;
- 2) відсоток точок, зсунутих менше, ніж на 50% розміру вікна пошуку, дорівнює або більше допустимого значення.

На п'ятому кроці проводиться оцінка оптимальних значень розмірів локальних класифікаторів і вікон пошуку, а також дисперсії шуму для облич анфас і в профіль. Оптимальними розмірами локальних класифікаторів для облич анфас є 15×15 , а оптимальними розмірами вікон пошуку є 19×19 . Для облич в профіль – класифікатори 11×11 та вікна пошуку 15×15 . Значення дисперсії шуму в невірній локальній моделі зменшується на кожному рівні.

Після завершення роботи алгоритму проводиться оцінка якості розмітки за метрикою: якщо сума махаланобісових відстаней між профілем в навченій моделі та найкращим профілем у околиці поточної точки більше заданого порога, або якщо на останньому рівні дисперсії шуму алгоритм завершив роботу через досягнення максимально допустимої кількості ітерацій – алгоритм пошуку

					КР.КІ.07128/20.00.00.000 ПЗ	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

антропометричних точок переініціалізується з дворазовою дисперсією шуму (рисунок 1.5).

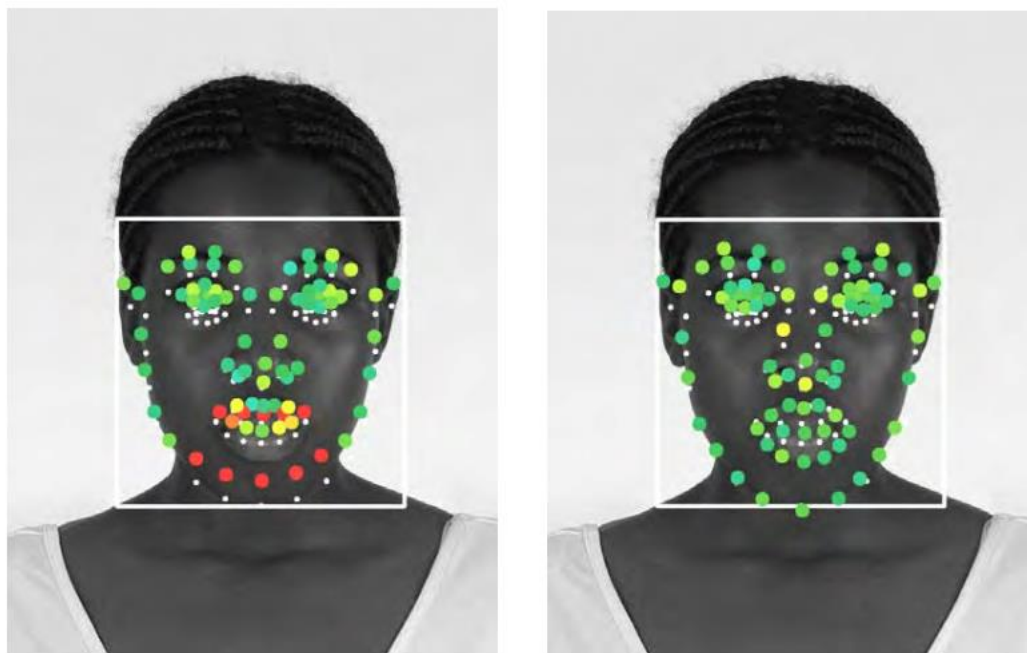


Рисунок 1.5 – Візуалізація знайдених точок

Переініціалізація відбувається з початкового наближення моделі, отриманого в результаті роботи детектора облич. З отриманих розміток вибирається та, що має найбільше значення метрики якості.

На рисунку 1.6 кольором показано значення відхилення між профілем у навченій моделі та найкращим профілем у околиці поточної точки. Зліва знайдені точки при початковій дисперсії шуму $\nu_0=18$, справа – знайдені точки при початковій дисперсії шуму $\nu_0=36$.

Результати роботи запропонованого алгоритму наведено на рисунку 1.6.

Запропонований алгоритм виявлення точок одночасно на двох зображеннях враховує внутрішні енергії, які нехтують складні деформації моделі, зовнішні енергії, які характеризують відхилення шуканих точок з картами відгуку на фотографіях, і взаємне відхилення моделей анфас та в профіль.



Рисунок 1.6. Антропометричні точки на парах фотографій анфас і в профіль, знайдені запропонованим алгоритмом

Такий алгоритм надає як більшу точність положення знайдених точок у порівнянні із існуючими алгоритмами, так і узгодженість положення одних і тих самих точок обличчя, які присутні як на фотографіях анфас, так і на фотографіях в профіль.

1.3 Оцінка параметрів геометричної моделі голови людини

Для створення тривимірної моделі голови людини існує кілька алгоритмів, включаючи як активні (засновані на випромінюванні) системи, так і пасивні. Тривимірне моделювання голови людини є складним процесом, що включає декілька важливих етапів, таких як створення геометричної моделі, формування полігональної сітки (рисунок 1.7) та нанесення текстури (рисунок 1.8).

					КР.КІ.07128/20.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

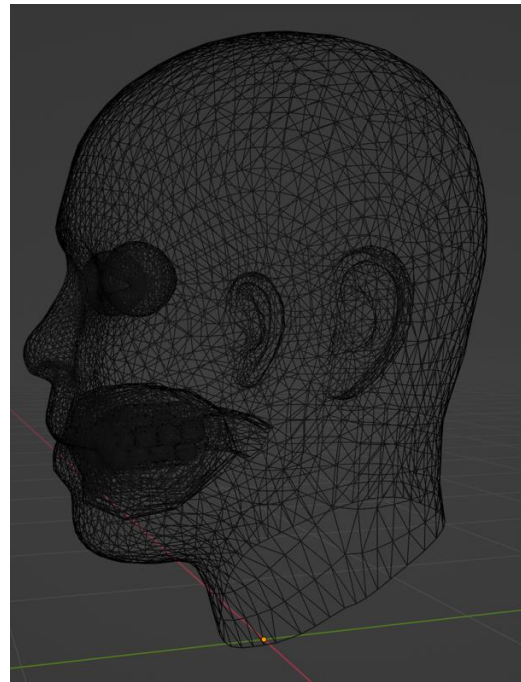
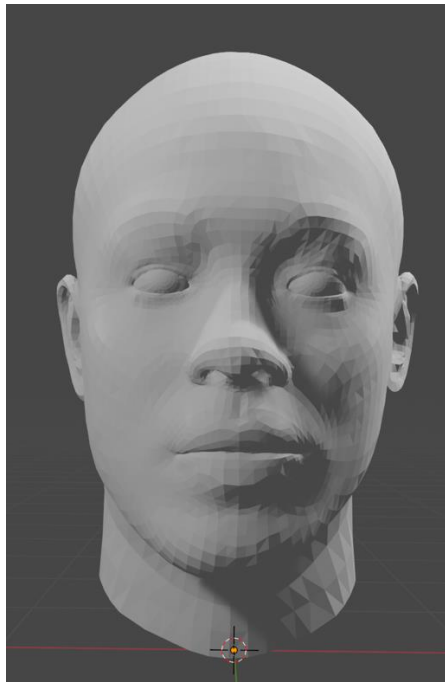


Рисунок 1.7 – Приклад тривимірного представлення обличчя людини:
а) карта глибини; б) хмара точок

Один з важливих компонентів цього процесу – це карта глибини. Карта глибини є двовимірним зображенням, де кожному пікселю відповідає значення глибини (відстані від камери до поверхні об'єкта). Це дозволяє отримати тривимірну інформацію про форму обличчя.

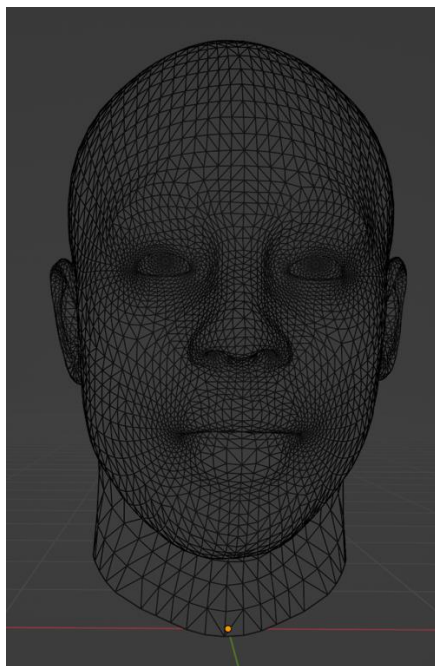


Рисунок 1.8 – Текстура, що накладається на полігональну модель

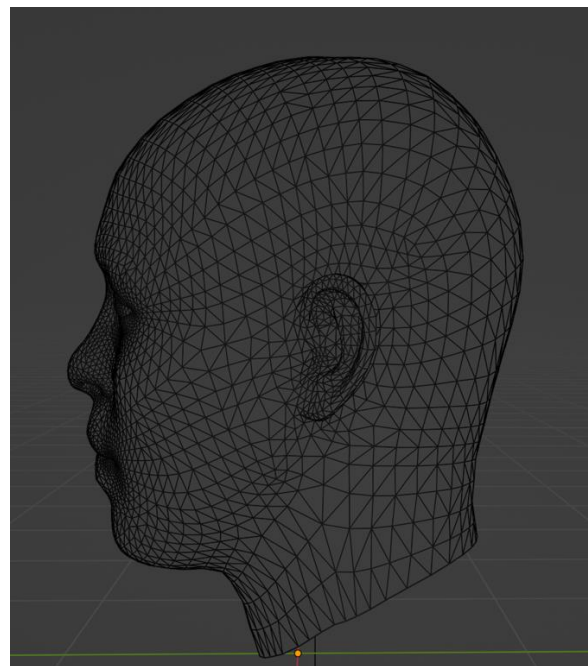
Карта глибини використовується для відновлення тривимірної структури обличчя з двовимірних зображень і забезпечує дані для створення тривимірної моделі на основі відстаней.

Іншим важливим компонентом є хмара точок, яка складається з великої кількості точок у тривимірному просторі, кожна з яких має координати (x, y, z). Хмара точок може бути отримана за допомогою лазерного сканування або фотограмметрії. Вона служить основою для побудови тривимірної моделі обличчя і використовується для точного вимірювання та відтворення геометрії об'єкта.

На рисунку 1.9 наведена полігональна модель, яка включає в себе візуалізацію ребер, складається з множини полігонів (зазвичай трикутників), які утворюють сітку, що відтворює форму обличчя. Візуалізація ребер (wireframe) показує структуру цієї сітки. Полігональна модель дозволяє аналізувати та редагувати форму моделі, а також використовується для візуалізації та анімації тривимірного обличчя.



а)



б)

Рисунок 1.9 – Полігональна модель з візуалізацією ребер:

а)анфас; б) профіль

					КР.КІ.07128/20.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

Текстура, що накладається на полігональну модель, є двовимірним зображенням, яке "обгортається" навколо тривимірної моделі, додаючи їй реалістичний вигляд. Процес нанесення текстури називається текстуруванням. Текстура додає деталізацію та реалістичність моделі, відтворюючи колір, деталі шкіри, риси обличчя тощо. Вона використовується у фільмах, відеоіграх та віртуальній реальності для створення реалістичних персонажів.

Калібрування геометрії моделі голови людини здійснюється за допомогою радіально-базисних функцій. Для створення анатомічно вірної моделі, де ключові вершини відповідають антропометричним точкам на вхідних фотографіях, спочатку проводиться багатоступенева оцінка глобальних пропорцій голови за допомогою зважених радіальних функцій. Потім виконується локальна підгонка з урахуванням топологічної структури базової моделі. Розділення на етапи здійснюється для уникнення артефактів у віддалених від контрольних точок областях: на першому етапі використовуються основні точки, такі як вершина голови та низ підборідка, а на наступних етапах робота ведеться з більш дрібними деталями. Як функцію радіального виду використовується функція Гаусса, амплітудний коефіцієнт якої визначається емпірично для кожного етапу.

Початкові фотографії використовуються для побудови тривимірних моделей. Один з відомих прикладів параметричної моделі - морфірувана модель, запропонована В. Бланцем та Т. Веттером. Вона створюється на основі тривимірних сканограм обличчя за допомогою аналізу головних компонент. Ця модель містить інформацію про середнє обличчя та припустимі анатомічно вірні варіації, отримані в результаті навчання на реальних обличчях. Морфірувана модель дозволяє аналізувати нові зображення обличчя та синтезувати нові обличчя, зберігаючи антропометричні особливості. Вона включає як геометричну, так і кольорову інформацію, що дозволяє підганяти модель голови безпосередньо до нового зображення обличчя.

Варто зазначити, що кожен параметр у моделі змінює обличчя в цілому, впливаючи як на геометрію, так і на текстуру, що робить ручне редагування

					КР.КІ.07128/20.00.00.000 ПЗ	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

неможливим. Через невизначеність семантики та відсутність достатнього контролю в сучасних системах віртуальної реальності використовується сегментована модель. У цій моделі кожен параметр містить індекс вершини, вектор, що визначає напрямок і силу зміщення вершини, мінімальне, максимальне та значення за замовчуванням, а також вектори зміщень текстурних координат і нормалей.

1.4 Постановка завдання кваліфікаційної роботи

Загальна проблема цієї бакалаврської роботи є необхідність побудови не лише полігональної моделі, але й визначення антропометричних параметрів голови людини за допомогою фотографій. Задача полягає в оцінці антропометричних параметрів моделі голови людини, побудові полігональної моделі, яка відповідає оціненим параметрам, та подальшій генерації її текстури.

Метою цієї бакалаврської роботи є розробка методології побудови тривимірної полігональної моделі голови людини за фотографіями з урахуванням антропометричних параметрів, а також генерація відповідної текстури для створення реалістичної та точної моделі. Для досягнення цієї мети необхідно виконати декілька завдань.

По-перше, потрібно дослідити існуючі методи і алгоритми тривимірного моделювання голови людини. Це включає огляд сучасних методів моделювання, вивчення алгоритмів визначення антропометричних параметрів за фотографіями, а також аналіз підходів до текстурування тривимірних моделей.

Далі необхідно розробити методику побудови полігональної моделі. Для цього потрібно визначити ключові антропометричні точки на фотографіях, побудувати тривимірну полігональну модель з використанням знайдених

					КР.КІ.07128/20.00.00.000 ПЗ	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

антропометричних точок і застосувати радіально-базисні функції для калібрування геометрії моделі.

Наступним кроком є генерація текстури. Це включає розробку методики нанесення текстури на тривимірну модель і використання фотограмметричних даних для створення текстури.

Після цього потрібно виконати підгонку та оптимізацію моделі. Для цього слід використовувати ітеративні алгоритми для грубої та точної підгонки моделі до антропометричних точок і оптимізувати модель для зменшення кількості полігонів без втрати якості.

Також необхідно реалізувати та протестувати розроблену методику. Для цього потрібно розробити програмне забезпечення для автоматизації процесу побудови моделі та нанесення текстури, протестувати створену модель на реальних даних і оцінити точність та реалістичність отриманих моделей.

На завершення потрібно проаналізувати результати та зробити висновки. Це включає порівняння отриманих результатів з існуючими методами, аналіз переваг та недоліків розробленої методики і визначення напрямків для подальшого покращення.

Ці завдання дозволять створити високоточну та реалістичну тривимірну модель голови людини, яка може бути використана в різних галузях, таких як анімація, віртуальна реальність, медицина та розваги.

					КР.КІ.07128/20.00.00.000 ПЗ	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2 АЛГОРИТМИ ПОБУДОВИ МОДЕЛІ ГОЛОВИ ЛЮДИНИ ДЛЯ ВИКОРИСТАННЯ В СИСТЕМАХ ВІРТУАЛЬНОЇ РЕАЛЬНОСТІ

2.1 Основні етапи побудови тривимірних моделей голови людини

Існує декілька підходів до побудови тривимірних моделей голови людини, кожен з яких має свої переваги та недоліки [23]. Традиційні методи включають використання полігональних моделей, параметричних моделей, а також методів на основі сканування та фотограмметрії.

Полігональні моделі створюються вручну або за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення для тривимірного моделювання. Вони можуть бути дуже точними, але створення таких моделей потребує значного часу і зусиль. Ці моделі добре підходять для анімації та візуалізації, але менш гнучкі у випадках, коли необхідно адаптувати модель до конкретних антропометричних даних.

Параметричні моделі використовують набір параметрів для визначення форми голови та обличчя. Вони більш гнучкі, оскільки дозволяють змінювати форму моделі шляхом модифікації параметрів. Однак якість таких моделей залежить від точності параметрів, які можуть бути складними для визначення.

Методи на основі сканування та фотограмметрії дозволяють створювати дуже точні моделі на основі тривимірного сканування або аналізу фотографій. Вони забезпечують високу точність і деталізацію, але можуть бути дорогими та вимагати спеціального обладнання.

Початкова полігональна модель має попередню розмітку, яка проектується на вхідні фотографії та підганяється до знайдених антропометричних точок. Алгоритм включає два основних етапи: підгонка розмітки до антропометричних точок та підгонка форми базової моделі голови до розмітки.

У даній бакалаврській роботі пропонується алгоритм, що має загальну схему, яка виглядає наступним чином. Початкова полігональна модель має розмітку, яка складається з набору векторів. Вектори визначають ламану, яка проходить через

					КР.КІ.07128/20.00.00.000 ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

вершини базової полігональної моделі, описуючи характерні риси обличчя (наприклад, контур очей, носа або всього обличчя). На першому етапі проєкція розмітки на вхідні фотографії здійснюється з підгонкою до знайдених антропометричних точок. Використовуються три типи перетворень: ідентичне, із зміщенням відносно знайдених точок та афінне відносно вже розставлених точок.

На другому етапі форма базової моделі голови підганяється до розмітки.

Початкова полігональна модель має попередню розмітку (деталі розмітки наведені нижче у цьому параграфі). На першому етапі розмітка проєціюється на вхідні фотографії та підганяється до знайдених антропометричних точок,

На третьому етапі відбувається підлаштування нодів до антропометричних точок. Ноди спроеційованих ламаних, які відповідають знайденим антропометричним точкам, переміщуються до відповідних координат. Ноди, які знаходяться між цими точками, проєктуються зі зміщенням.

Четвертий етап характеризується обчисленням матриці афінного перетворення. Для розставлених нодів спроеційованих ламаних обчислюється матриця афінного перетворення, за допомогою якої переміщуються всі інші ноди кожної ламаної.

Підлаштування базової моделі до ламаних відбувається на п'ятому етапі побудови голови людини. На рисунку 2.1 зображено підлаштування проєкцій ламаних до ламаних, отриманих на попередньому етапі, шляхом пошуку значень параметрів, які мінімізують помилку. Внутрішня енергія визначається як відстань Махаланобіса між шуканими параметрами та параметрами середньостатистичної моделі голови.

					КР.КІ.07128/20.00.00.000 ПЗ	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

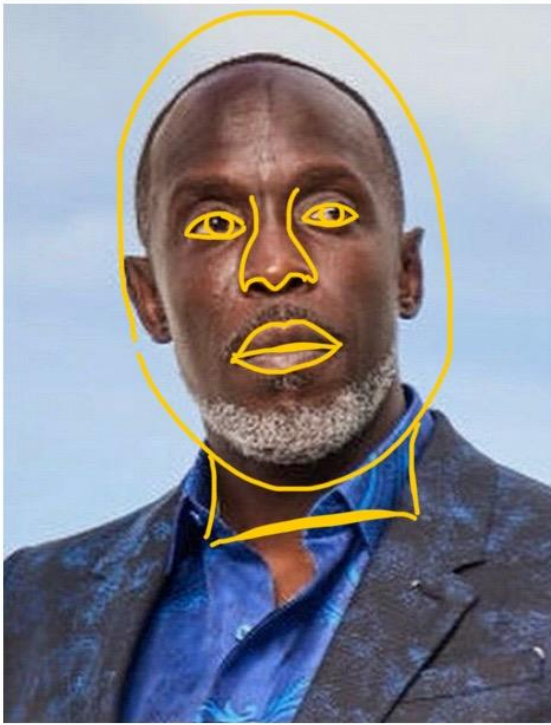


Рисунок 2.1 – Підлаштування базової моделі до точок проєкції ламаних

На останньому шостому етапі здійснюється «грубе» підлаштування генетичним алгоритмом, що оптимізує великий набір параметрів. Точне підлаштування окремих рис обличчя здійснюється за допомогою методу Нелдера—Міда [24].

Цей підхід дозволяє працювати з великим класом деформованих моделей і дозволяє непідготовленому користувачеві вносити корективи на будь-якому етапі в разі некоректної роботи алгоритму на одному з етапів. Це забезпечує високу якість отриманих моделей з точки зору сприйняття людиною.

Згідно з постановкою задачі, немає потреби в оптимізації часу роботи або обсягу використаної пам'яті, але потрібно забезпечити високу якість отриманих моделей. Розбиття алгоритму на незалежні етапи дозволяє в разі необхідності ручно коригувати проміжні результати, забезпечуючи таким чином коректну роботу на наступних етапах.

2.2 Алгоритм генерації базової текстури при побудові голови людини

Створення реалістичної текстури з вихідних зображень є важливим етапом побудови моделі голови людини. Текстурний компонент вносить суттєвий внесок у розпізнаваність людини, нарівні з геометричним компонентом [25]. Серед ключових робіт з текстурювання моделі голови можна виділити [26-29]. Однак усі ці роботи описують лише базові етапи текстурювання моделі голови, у той час як у цій дисертаційній роботі запропоновано повний комплекс алгоритмів, що дозволяє отримувати фотореалістичну текстуру всієї голови за допомогою лише двох фотографій, включаючи фотореалістичне текстурювання невидимих або недостатньо покритих на вихідних зображеннях областей, таких як область за вухом, очі, порожнина рота, потилиця та верхівка голови. Запропонований алгоритм містить всі етапи, необхідні для отримання фотореалістичної моделі голови: гладка інтерполяція вершин, генерація текстури або текстурних координат, усунення зшивів на текстурі, змішування текстур з різних фотографій, фільтрація текстур низького розширення, а також синтез текстури в невидимих областях. У додатку В наведено схему накладання графічної текстури.

Таким чином, маємо набір параметрів θ , що мінімізує відхилення контурів характерних рис обличчя моделі \mathcal{M} від контурів на вхідних фотографіях. Однак у загальному випадку — залежно від заданої матриці зсувів S — значення функціоналів нев'язки можуть бути досить великими, і отримана модель \mathcal{M} може бути недостатньо точною для генерації на її основі текстури. Спроекуємо на площину фотографії всі вершини полігональної моделі: $\mathbf{v}_i = \mathcal{P}\mathbf{v}_i$. Нагадаємо, що проекція вершин ламаних $\mathbf{u}_{ji} = \mathbf{v}d_{ji}$ позначена як $\boldsymbol{\mu}_{ji} = \mathcal{P}\mathbf{u}_{ji} = \mathbf{v}d_{ji}$. Таким чином, для генерації текстури потрібна інтерполяція всіх спроекцій вершин $\mathbf{v}d_{ji}$, які не входять в ламані $\boldsymbol{\mu}$. Для цього в запропонованому алгоритмі використовується апарат тонкопластинних сплайнів, що забезпечує гладку деформацію фотографій при отриманні текстури, а також дозволяє інтерполювати точки, що виходять за

					КР.КІ.07128/20.00.00.000 ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

конвексну оболонку вершин ламаних μ . Точки, які є вершинами ламаних μ : $\mu_{ji} = \nu d_{ji}$, будемо називати контрольними точками. Їх, як було описано вище, ми переміщуємо в нові координати $\nu d_{ji}'$, що відповідають визначеним антропометричним точкам. Для зручності позначення в даному розділі точки νd_{kj} будемо позначати просто як (x_i, y_i) , $i = 1, \dots, p$, $p = \sum m_j n_j$, а точки $\nu d_{kj}'$ відповідно як (x_i', y_i') . Для інтерполяції інших точок (x, y) потрібно знайти неперервну векторнозначну функцію $\mathbf{f}(x, y)$ такого вигляду, що $\mathbf{f}(x, y) = (x_i', y_i')$, а енергія згину сплайна була мінімальною. Енергія згину сплайна задається формулою (2.1):

$$E[f(x, y)] = \iint_{\mathbb{R}^2} (\partial^2 f / \partial x^2)^2 + 2(\partial^2 f / \partial x \partial y)^2 + (\partial^2 f / \partial y^2)^2 dx dy. \quad (2.1)$$

Введемо у позначення функцію радіального вигляду $\phi(r) = (r/\sigma)^2 \ln(r/\sigma)$, де σ — масштабний коефіцієнт, що характеризує жорсткість сплайна.

Тоді маємо двовимірний тонкопластинний сплайн у вигляді рівняння (2.2):

$$\mathbf{f}(x, y) = \mathbf{a}_0 + \mathbf{a}_x x + \mathbf{a}_y y + \sum \mathbf{w}_i \phi(\|(x_i, y_i) - (x, y)\|). \quad (2.2)$$

Враховуючи умови ортогональності $\sum \mathbf{w}_i = 0$ і $\sum \mathbf{w}_i x_i = \sum \mathbf{w}_i y_i = 0$, маємо систему з $p + 3$ лінійних рівнянь з $p + 3$ невідомими. Розв'язання цієї системи дає нам шукані ваги тонкопластинного сплайна \mathbf{w}_i .

Для генерації текстури створюється полігональна модель \mathcal{D} . У випадку фотографії анфас значення елементів \mathcal{D} задаються наступним чином:

$$v_{ix} \mathcal{D} = 0, v_{iy} \mathcal{D} = t_{ix} \mathcal{B}, v_{iz} \mathcal{D} = t_{iy} \mathcal{B}, t_{ix} \mathcal{D} = v_{ii}, t_{iy} \mathcal{D} = v_{ii}, \quad (2.3)$$

де $v_i \mathcal{D} \in \mathbb{R}^3$ — компоненти вектора просторових координат (вершин) моделі \mathcal{D} ;

$t_i \mathcal{B} \in \mathbb{R}_v$, $t_i \mathcal{D} \in \mathbb{R}_v$ — компоненти вектора текстурних координат моделей \mathcal{B} і \mathcal{D} , відповідно;

					КР.КІ.07128/20.00.00.000 ПЗ	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

\mathcal{P} – оператор ортогональної проєкції. Отриману плоску полігональну модель візуалізуємо в текстуру (у даному випадку, фронтальну) за допомогою растеризації полігонів на графічному процесорі. Аналогічно генерується текстура за фотографією у профіль.

Для усунення зшивів (швів) між частинами текстури використовується операція математичної морфології — розширення ($A \oplus B$, нарощування зображення A структурним елементом $3 \times 3 B$), модифікована для роботи на повноцінному зображенні з урахуванням каналу прозорості.

Для використання на етапі змішування текстур, отриманих за фотографіями анфас і у профіль, генерується карта нормалей C моделі. Для забезпечення плавного переходу при змішуванні текстур, а також збереження високої деталізації і уникнення дублювання елементів, видимих як на фотографії анфас, так і на фотографії в профіль, здійснюється змішування з використанням піраміди Гаусса—Лапласа [30].

У випадку обмеження розміру текстури (наприклад, у популярних додатках віртуальної реальності, таких як OpenSim та Second Life, максимальний розмір текстури для голови складає лише 512×512 пікселів), для обробки текстури можна використовувати білатеральний фільтр. Цей фільтр дозволяє згладити грубі ділянки текстури на шкірі, одночасно зберігаючи дрібні деталі на областях з високою локальною контрастністю.

Варто зазначити, що в існуючих роботах, як правило, результати обмежуються моделями, які близькі до позиції анфас. Проте таке представлення результатів є неповним і некоректним. Наприклад, часто текстура на ділянках за вухом, очах, у порожнині рота, на потилиці та тімені має низьку якість через відсутність відповідної інформації на початкових парах фотографій анфас і в профіль.

Синтез якісної текстури на цих ділянках є дуже актуальною задачею, оскільки сучасні системи віртуальної реальності передбачають анімацію, таку як моргання очей та відкривання рота. Переважно користувач спостерігає за

					КР.КІ.07128/20.00.00.000 ПЗ	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

потилицею та тім'яною ділянкою, а не обличчям власного аватара протягом більшої частини часу перебування у системі віртуальної реальності. Також аватари інших користувачів не завжди повернені обличчям до спостерігача, тому синтез якісної текстури на зазначених ділянках є важливою задачею.

Синтез деяких областей відбувається досить просто, тоді як синтез інших є складнішим. Наприклад, фотореалістичну текстуру порожнини рота можна створити шляхом простого накладання стандартно підготовленої текстури..

2.3 Алгоритми синтезу текстури позаду вуха

Алгоритми синтезу невидимих областей текстури голови при створенні 3D-моделей голови включають в себе різноманітні підходи для вирішення проблеми зображення текстури на моделі з різних ракурсів. Ці алгоритми можуть використовувати методи, такі як проекція текстури на поверхню моделі, використання технік згортки текстури для коректного відображення при руху камери, або застосування алгоритмів управління освітленням для підсилення візуального реалізму. Ключовими аспектами таких алгоритмів є точність відображення текстур при зміні ракурсу та здатність до оптимального використання ресурсів обчислювальної техніки.

Суть постановки задачі полягає у наступному. Є зображення S , всередині якого є замкнута область Ω , яку потрібно відновити на основі наявних даних - як межі $\partial \Omega$ області Ω , так і іншої інформації, що міститься на зображенні S . Існуючі алгоритми розв'язання поставленої задачі можна поділити на дві основні категорії: дифузійні алгоритми та алгоритми синтезу за зразком.

Алгоритми синтезу текстури за зразком використовують зразок A для створення нової текстури B . Головною метою є забезпечення того, щоб отримана текстура B виглядала природно та реалістично, не будучи простою копією зразка

					КР.КІ.07128/20.00.00.000 ПЗ	Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

А з повторенням. Для досягнення цієї мети важливо, щоб текстура В не мала видимих швів або неестетичних переходів. Дифузійні алгоритми генерації текстури базуються на обчисленні значень кожного пікселя заповненої області з використанням навколишніх пікселів через диференціальні рівняння. Ці алгоритми зберігають низькочастотну інформацію, але не враховують високочастотну деталізацію. Деякі підходи поєднують обидва методи, розбиваючи зображення на низькочастотні та високочастотні складові для більш точного відтворення текстури. Однак такий підхід може призводити до неестетичного вигляду, наприклад, волосся може виглядати нереалістично на деяких частинах обличчя.

У працях Х. Ямаучі розроблено алгоритм, що поєднує два різні підходи до відтворення текстури. Спочатку вони розбивають вихідне зображення на дві частини: низькочастотну та високочастотну компоненти. Потім вони використовують дифузійний алгоритм, щоб відновити низькочастотну складову заповненої області, та алгоритм синтезу за зразком, щоб відновити високочастотну складову. Однак цей підхід може призводити до неестетичного вигляду, наприклад, волосся може виглядати неприродно в певних областях, наприклад, за вухом.

П. Перез [31] та його команда запропонували інший метод, який вони називають «редагуванням Пуассона зображень». Цей метод дозволяє виконувати безшовне вставлення зображень. Шляхом розв'язання рівняння Пуассона з крайовими умовами Діріхле вони досягають безшовного злиття двох зображень. Однак, навіть цей метод має свої обмеження: наприклад, може зберігатися сильний контраст між різними областями зображення, що може виглядати неестетично.

Для вирішення цієї проблеми потрібно використати метод перенесення кольору для адаптації текстури. Зображення переводиться в спеціальний колірний простір, де кореляція між колірними каналами мінімізована. Потім характеристики розподілу даних одного зображення переносяться на інше. Це дозволяє адаптувати колірні характеристики попередньо підготовленої текстури до поточного зображення, щоб досягти більш гармонійного злиття. Результати роботи запропонованого алгоритму наведено на рисунку 2.2.

					КР.КІ.07128/20.00.00.000 ПЗ	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 2.2 – Приклад роботи запропонованого алгоритму синтезу текстури позаду вуха на моделі

2.4 Алгоритми синтезу текстури потилиці, тім'я та очей

Проблему створення текстури для областей потилиці та темені можна вирішити за допомогою алгоритмів синтезу за взірцем, які були описані у попередньому підрозділі. Ці алгоритми включають методи, які пропонують У. Хуанг [32] та Б. Сміт [33], а також більш складні підходи, запропоновані Ю Сан, К Ванг та К Танг [34].

Г. Едвардс та його співавтори [35] розробили прості методи, які виявилися досить ефективними для широкого спектра текстур. Їх алгоритм базується на генерації текстури піксель за пікселем, де кожен піксель області заповнення шукає найбільш схожу частину вихідного зразка. Подальший розвиток цієї ідеї був запропонований Н. Хорешем у співпраці [36], де вони використовували поняття "плям", тобто областей, замість окремих пікселів. Цей підхід, окрім високої швидкості, дозволяє генерувати більш цілісні та природно виглядаючі текстури.

					КР.КІ.07128/20.00.00.000 ПЗ	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Більш складні алгоритми, беруть до уваги не лише сам зразок для синтезу, але й розмітку цього зразка, а також розмітку потрібної текстури. Вони мінімізують функцію, яка враховує відхилення для областей текстури та їх розміток.

Ще один підхід [33], використовує багатомасштабну ієрархічну структуру зразків, що дозволяє отримувати фотореалістичні та природно виглядаючі результати на будь-яких масштабах отриманої текстури.

У бакалаврській роботі, пропонується альтернативний підхід до синтезу текстури за взірцем, який дозволяє заповнювати відсутні частини текстур, використовуючи зразки з самої текстури. Для цього використовується карта нормалей, що дозволяє генерувати маску для областей, які потрібно заповнити (рисунок 2.3). Потім з вхідного фото в профіль вибираються зразки для синтезу текстури, а також генерується карта напряму за допомогою вейвлетів Габора [27]. Процес синтезу відбувається послідовно, область за областю, з накладанням кожної нової області на вже створену текстуру з перекриттям. Пошук оптимальних зразків здійснюється з частини фото в профіль з використанням міри схожості, яка враховує відхилення карт кольору та напрямку.

Створення реалістичних текстур очей є складною задачею у комп'ютерній графіці та обробці зображень. Очі мають складну структуру і унікальні характеристики, які важко відтворити бездоганно.

Одна з основних проблем полягає в тому, що очі мають велику різноманітність у формі, кольорі, текстурі та взаєморозташуванні з іншими елементами обличчя. Це робить їх моделювання та синтез текстур вельми витратними за ресурсами завданнями.

					КР.КІ.07128/20.00.00.000 ПЗ	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

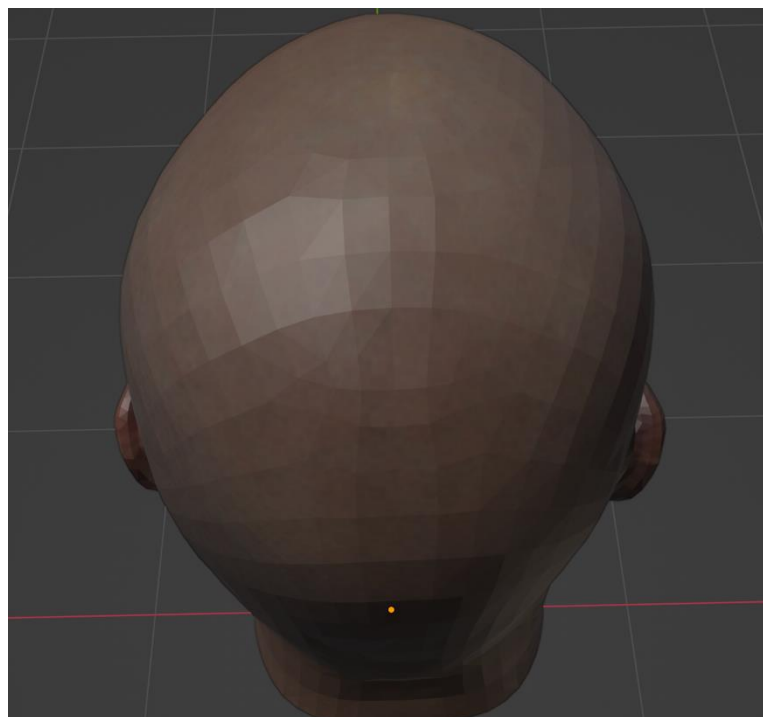


Рисунок 2.3 – Приклад синтезованої текстури тім'я

Крім того, створення реалістичних текстур очей потребує детального аналізу геометричних та кольорових характеристик, таких як форма зіниці та райдуги, тон білка та відтінки райдуги. Необхідно враховувати світлові відбитки, тіні, блиск та інші деталі, щоб досягти максимальної реалістичності.

Крім того, існує проблема відображення емоцій та виразності очей на зображеннях. Вірно передати вирази обличчя та вираження очей, такі як радість, смуток, здивування, також є складною завданням через їх велику варіативність та складність.

У зв'язку з цим, розробка ефективних алгоритмів синтезу текстур очей, які б забезпечували високу якість та реалізм, залишається актуальною проблемою у галузі комп'ютерної графіки та обробки зображень.

У даній роботі запропоновано алгоритм створення багатошарової текстури очей таким чином, що спершу на фотографії аналізується область очей для визначення геометричних та кольорових характеристик, таких як центри та радіуси зіниці та райдуги, відтінок білка, переважаючі відтінки зовнішньої та внутрішньої

частин райдуги, а далі відбувається синтез багатошарової текстури та на основі оцінених характеристик області очей виконуються наступні кроки.

Крок 1. Зміна відтінку текстурного шару білка.

Крок 2. Побудова двох радіальних градієнтів на основі визначених кольорів зовнішньої та внутрішньої частин райдуги.

Крок 3. Сума градієнтів за маскою, отриманою за допомогою шуму Перліна.

Крок 4. Додавання шару зіниці.

Крок 5. Додавання шарів блисків за допомогою проекції шарів.

Крок 6. Додавання внутрішніх тіней та відбитків за допомогою перекриття шарів.

Для оцінки якості результатів порівнюється запропонований алгоритм з іншими за допомогою суб'єктивного тестування на базах фотографій облич. Кожній текстурі присвоюється оцінка від 1 до 10, і середні оцінки порівнюються для визначення ефективності алгоритму.

Розроблений новий набір алгоритмів дозволяє створювати реалістичні текстури для всієї голови лише за допомогою двох фотографій, включаючи області, які можуть бути недостатньо покриті або не видимі на початкових знімках, наприклад, область за вухом, очі, порожнина рота, потилиця та тім'я.

В роботі було виявлено, що існуючі алгоритми моделювання текстур голови зазвичай описують лише базові етапи, тоді як запропонований комплекс алгоритмів включає всі необхідні кроки для отримання фотореалістичної моделі голови. Ці алгоритми включають різні етапи, такі як гладку інтерполяцію вершин, генерацію текстурних координат, виправлення швів, змішування текстур з різних фотографій та інші.

Також були розроблені нові алгоритми, які комбінують переваги дифузійних алгоритмів та алгоритмів синтезу за образцом. Наприклад, для створення текстури за вухом був розроблений алгоритм, який переносить кольорові характеристики з наявної текстури на типову текстуру за вухом та безшовно вставляє її у кінцеву текстуру.

					КР.КІ.07128/20.00.00.000 ПЗ	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таким чином, результати показали, що запропонований комплекс алгоритмів суттєво перевершує існуючі алгоритми моделювання текстур, що підтверджує його ефективність та потенціал у реалістичному синтезі текстур для голови.

					КР.КІ.07128/20.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

3 РЕАЛІЗАЦІЯ ТРИВИМІРНОЇ МОДЕЛІ ГОЛОВИ ЛЮДИНИ ДЛЯ СИСТЕМ ВІРТУАЛЬНОЇ РЕАЛЬНОСТІ

3.1 Налаштування та моделювання геометрії голови людини для систем віртуальної реальності

Для створення тривимірної моделі голови людини для систем віртуальної реальності впроваджені усі алгоритми, описані у другому розділі. Для реалізації моделі голови людини використовувались два зображення Майкла Уільямса та програмні засоби, такі як Blender. Ця програма є дуже потужним інструментом для моделювання, анімації та рендерингу тривимірних об'єктів.

Створення геометрії голови в Blender – це складний процес, який включає декілька етапів. Розглянемо детальніше кожний з них

Перш ніж розпочати налаштування та моделювання геометрії голови людини потрібно провести детальний аналіз антропометричних параметрів голови людини, а саме Майкла Уільямса, що передбачає ретельне вивчення та вимірювання різних аспектів його обличчя та голови. Для цього ми використовуємо як фотографії, так і документацію, що містить анатомічні розміри. Аналіз включає вимірювання розмірів різних частин обличчя та голови, таких як ширина та довжина обличчя, розміри очей, носа, рота, вух та інших важливих особливостей. Важливо враховувати пропорції та форму кожного елемента, оскільки вони впливають на реалістичність та подібність створеної моделі до реальної особи.

Після детального аналізу антропометричних параметрів ми переходимо до побудови тривимірної полігональної моделі голови Майкла Уільямса. Для цього ми використовуємо дві фотографії – одну з анфасу (фронтальний ракурс) і одну з профілю (бічний ракурс). Використання обох ракурсів дозволяє отримати більш повний та точний опис форми обличчя та голови. Фотографія з анфасу надає інформацію про форму обличчя, розміри очей, носа, рота та інших деталей з переднього ракурсу, тоді як фотографія з профілю доповнює цей опис,

					КР.КІ.07128/20.00.00.000 ПЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

представляючи інформацію про форму та розміри з бокового ракурсу. Комбінація цих двох ракурсів допомагає уникнути спотворень та забезпечує відповідність моделі реальним антропометричним параметрам Майкла Уільямса.

Точний аналіз антропометричних параметрів дозволяє побудувати базову форму голови з врахуванням індивідуальних особливостей Майкла Уільямса, що стане основою для подальшого моделювання деталей та текстурування.

Після побудови базової форми голови Майкла Уільямса, ми переходимо до моделювання деталей обличчя – очей, носа, рота та вуха. Для цього ми враховуємо анатомічні пропорції та розміри цих елементів, а також особливості саме Майкла Уільямса.

При моделюванні очей слід врахувати їхню форму та розміри, а також розташування відносно інших частин обличчя. У випадку Майкла Уільямса можуть бути важливі такі деталі, як форма та розміри очних ямок, відстань між очима та їхнє розташування від інших елементів обличчя.

При побудові носа обов'язково варто врахувати його форму, довжину, ширину та висоту. Особливості носа Майкла Уільямса, такі як форма горбика або розміри ноздрей, можуть бути ключовими для створення реалістичної моделі.

При моделюванні рота ми враховуємо його форму, ширину, висоту та розташування від інших частин обличчя. Деталі, такі як форма губ, розмір уст, а також поза уст (закритий або відкритий рот), можуть бути важливими для відтворення подібності Майкла Уільямса.

Моделюючи вуха, враховуємо їхню форму, розміри та розташування на голові. Особливості вух Майкла Уільямса, такі як форма мочки чи розмір вушної раковини, можуть бути важливими для реалістичного відображення.

Під час моделювання цих деталей ми враховуємо не лише їхні анатомічні параметри, але й взаємодію між ними та іншими частинами обличчя, щоб забезпечити гармонійний та реалістичний вигляд. Ретельне врахування індивідуальних особливостей Майкла Уільямса допомагає створити точну та виразну модель його обличчя.

					КР.КІ.07128/20.00.00.000 ПЗ	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

На наступному етапі моделювання, після побудови базової форми та додавання деталей обличчя Майкла Уільямса, ми рухаємося далі, додаючи анатомічні деталі, які відображають індивідуальні особливості його обличчя. Цей етап передбачає створення більш деталізованих структур, таких як контури обличчя, виступаючі кістки, форма губ, брови та інші особливості, які роблять обличчя Майкла Уільямса унікальним.

Моделюючи контур обличчя, ми враховуємо його форму та риси, такі як лінія щелепи, підборіддя та лінія щік. Особливості контуру обличчя Майкла Уільямса можуть включати гладкі або витягнуті лінії щок та щелепи, що впливає на загальний вигляд обличчя.

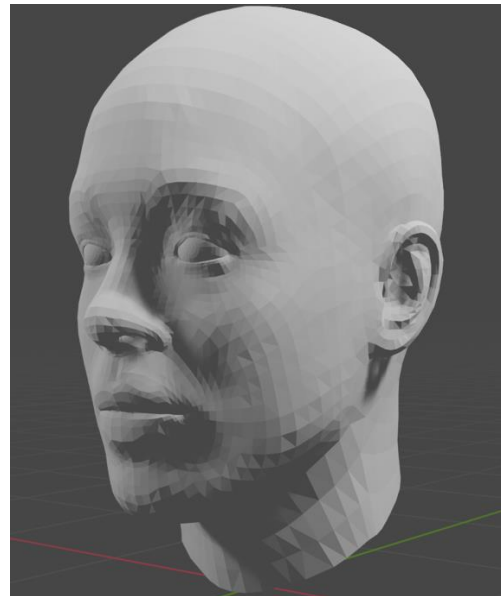
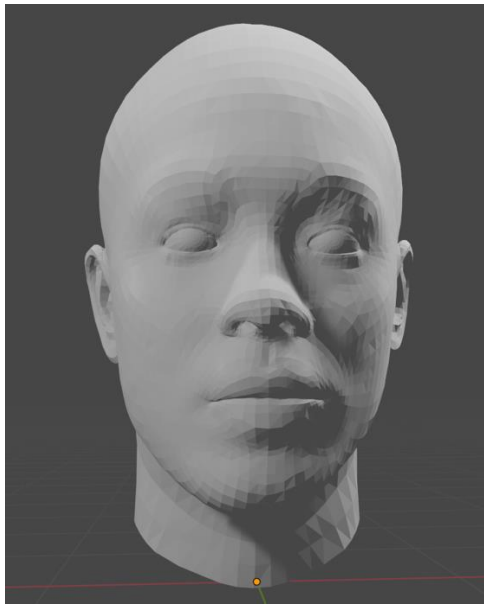
Деякі анатомічні особливості, такі як виступаючі кістки на скулових кістках або лобі, додають глибину та виразність обличчю. Під час моделювання цих деталей важливо врахувати їхню форму та розміри, а також їх взаємодію з іншими частинами обличчя.

Ми моделюємо губи, враховуючи їх форму, об'єм та розміри. Особливості губ Майкла Уільямса, такі як товщина губ, форма верхньої та нижньої губи, можуть бути важливими для створення реалістичної моделі.

Ми також додаємо деталі бровей, враховуючи їхню форму, ширину та розташування на обличчі. Особливості бровей Майкла Уільямса, такі як їх форма та густота, можуть впливати на вираз обличчя та загальний вигляд.

Під час додавання цих анатомічних деталей ми намагаємося вірно передати індивідуальні особливості Майкла Уільямса, щоб створити максимально реалістичну та точну модель його обличчя. Порівняння проміжного результату моделювання голови Майкла Уільямса з реальним зображенням перед важливим етапом текстурування наведено на рисунку 3.1.

					КР.КІ.07128/20.00.00.000 ПЗ	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



а)



б)

Рисунок 3.1 - Порівняння тривимірної моделі голови людини (а) з реальним зображенням (б)

Як бачимо, тривимірна модель голови людини побудована із врахуванням аналізу антропометричних параметрів, який передбачає вивчення розмірів та пропорцій різних частин обличчя та голови, перед створенням базової форми голови за допомогою примітивів, які враховують ці параметри, додавання деталей

					КР.КІ.07128/20.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

обличчя, таких як очі, ніс, рот та вуха, з врахуванням їхніх анатомічних пропорцій, та додавання анатомічних деталей, що відповідають індивідуальним особливостям, наприклад, контур обличчя, виступаючі кістки, губи та брови.

3.2 Створення текстур для реалістичного візуального вигляду моделі

Після завершення моделювання деталей обличчя Майкла Уільямса ми переходимо до етапу текстурування, який передбачає створення текстур для шкіри, очей, волосся та інших деталей його голови. Цей етап дозволяє надати моделі реалістичний вигляд та додати деталізацію до поверхні. Для цього ми використовуємо фотографії як джерело текстурної інформації, що допомагає нам відтворити природні текстурні шари та деталі.

Використовуючи фотографії шкіри Майкла Уільямса, які містять детальність, текстуру та колір шкіри, відтворюємо різноманітність шкірних властивостей. Після того, як фотографії імпортовані в Blender, ми використовуємо їх як текстурні координати для нашої моделі.

Для створення текстур для очей Майкла Уільямса ми використовуємо фотографії його очей з високою роздільною здатністю. Ці фотографії дозволяють нам передати деталі очей, такі як колір райдуги, текстуру райдуги та зіниці. Ми також можемо врахувати особливості освітлення та відбиття світла у текстурі очей.

При створенні текстур для волосся Майкла Уільямса ми використовуємо фотографії його волосся з різних ракурсів та освітлення. Ці фотографії надають нам інформацію про текстуру, колір та структуру волосся. Ми можемо використовувати техніки, такі як текстурне мапування і прозорість, щоб реалістично відтворити волосся на моделі.

Для додавання текстур до інших деталей голови, таких як губи, брови, вуха та інші, ми використовуємо фотографії, які передають деталі цих областей. Це

					КР.КІ.07128/20.00.00.000 ПЗ	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

може включати текстури для гладкої шкіри губ, вушних раковин або волосся брів. Ми також можемо врахувати колір та освітлення для кожної з цих областей.

Під час текстурування максимально точно відтворити природні текстурні властивості та деталі обличчя Майкла Уільямса, щоб створити реалістичну та живу модель.

Після завершення моделювання, текстурування та додавання деталей, ми переходимо до налаштування освітлення та параметрів рендерингу для створення фінального зображення голови Майкла Уільямса з врахуванням реалістичності та точності моделі.

Вибір правильного типу та розміщення джерел освітлення вирішально важливий для створення реалістичного зображення. Ми можемо використовувати різні джерела освітлення, такі як точкові джерела, прожектори або HDR-зображення, щоб досягти потрібного ефекту. Освітлення також може бути регульоване за допомогою параметрів, таких як яскравість, колір та напрямок, щоб підкреслити деякі деталі та створити потрібний настрій.

Під час налаштування параметрів рендерингу ми також можемо працювати з матеріалами та текстурами для покращення реалізму зображення. Налаштування параметрів матеріалів, таких як рефлексія, прозорість та шорсткість, дозволяє нам досягти більш природного вигляду шкіри, очей та інших деталей.

Важливо налаштувати параметри рендерингу, такі як роздільна здатність, рівень деталізації та вплив освітлення на модель, для досягнення найкращого результату. Ми можемо використовувати різні рендерингові движки та їх параметри, щоб забезпечити якісну візуалізацію нашої моделі.

Після налаштування освітлення та параметрів рендерингу ми проводимо тестування, перевіряємо результати та коригуємо параметри, якщо потрібно, для досягнення оптимального зображення. Цей процес може включати зміни в освітленні, матеріалах та текстурах, а також в налаштуванні параметрів рендерингу.

					КР.КІ.07128/20.00.00.000 ПЗ	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Після завершення цих етапів ми можемо створити фінальне зображення голови Майкла Уільямса, яке буде відповідати нашим вимогам до реалістичності та точності моделі.

Перевірка та корекція моделі є важливим кроком для забезпечення відповідності антропометричним параметрам та реалістичності текстур. Цей процес включає кілька етапів:

Перш ніж переходити до детальної перевірки моделі, важливо переконатися, що вона відповідає антропометричним параметрам Майкла Уільямса, які були визначені на попередніх етапах. Це означає вимірювання розмірів різних частин обличчя та голови, таких як ширина та довжина обличчя, розміри очей, носа, рота та інших деталей, і порівняння їх з відомими антропометричними даними Майкла Уільямса.

Після перевірки антропометричних параметрів ми переходимо до оцінки реалістичності текстур на моделі. Це включає аналіз текстур шкіри, очей, волосся та інших деталей на предмет їхньої відповідності реальним зразкам. Ми перевіряємо розмір, колір, деталізацію та інші аспекти текстур, щоб переконатися, що вони виглядають природно та реалістично.

Під час перевірки моделі можуть виявитися різні неточності або недоліки, такі як неправильна форма обличчя, незбалансовані розміри деталей або нереалістичні текстури. Для виправлення цих проблем може знадобитися внесення змін у геометрію моделі, адаптація текстур або регулювання освітлення та параметрів рендерингу.

Після внесення корекцій ми проводимо повторну перевірку та тестування моделі, щоб переконатися, що всі проблеми були вирішені і що вона відповідає вимогам щодо антропометричних параметрів та реалістичності. Цей процес може зайняти кілька ітерацій, поки не буде досягнуто задовільного результату.

Після завершення всіх корекцій та тестувань ми проводимо фінальну оцінку моделі, переконуючись, що вона відповідає всім вимогам щодо антропометричних параметрів та має реалістичний вигляд. Якщо результат задовільний, ми

					КР.КІ.07128/20.00.00.000 ПЗ	Арк.
						46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

переходимо до наступного етапу – підготовки фінального зображення голови Майкла Уільямса (рисунок 3.2).

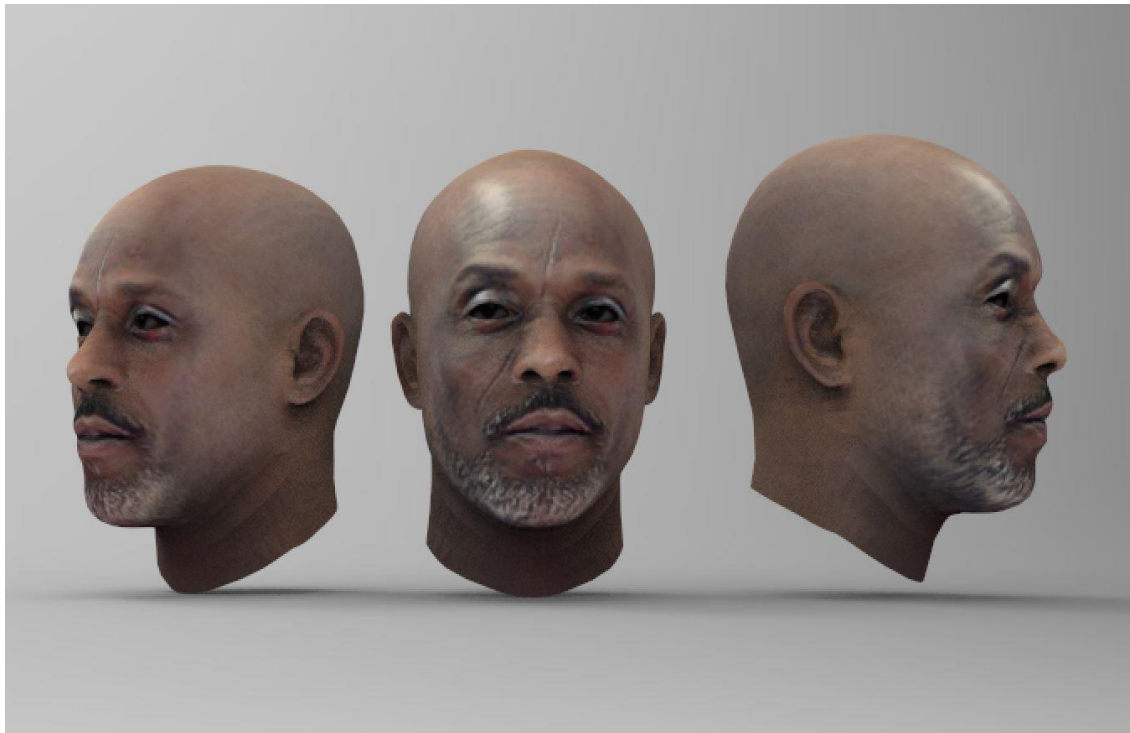


Рисунок 3.2 – Програмна тривимірна модель голови людини

Створення текстур для реалістичного візуального вигляду моделі є ключовим етапом у процесі розробки тривимірних об'єктів, зокрема голови людини, для використання у віртуальних середовищах. Цей етап дозволяє надати моделі деталізований та реалістичний вигляд, що підвищує іммерсивність та природність візуального сприйняття.

Створення текстур включає в себе використання фотографій або інших джерел текстурної інформації для накладання на поверхні моделі. Важливо враховувати анатомічні особливості та індивідуальні риси обличчя людини, щоб забезпечити максимальну відповідність реальності. Крім того, використання текстур дозволяє створити відтінки шкіри, волосся, очей та інших деталей, що підвищує реалізм моделі.

					КР.КІ.07128/20.00.00.000 ПЗ	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Після створення текстур необхідно налаштувати освітлення та параметри рендерингу для досягнення максимально реалістичного вигляду. Це включає в себе встановлення відповідних джерел світла, тіней та кольорів, щоб підкреслити деталі моделі та надати їй глибину та об'єм.

Отже, створення текстур для реалістичного візуального вигляду моделі є важливим етапом, який дозволяє забезпечити високий ступінь реалізму та іммерсії у віртуальних середовищах. Використання текстур дозволяє створити деталізовані та реалістичні об'єкти, що підвищує якість віртуального досвіду для користувачів.

3.3 Інтеграція та оптимізація моделі голови для використання у системах віртуальної реальності

Інтеграція та оптимізація моделі голови для використання у системах віртуальної реальності є ключовими етапами для забезпечення ефективності та реалістичності віртуального досвіду. Цей процес включає в себе кілька важливих кроків:

Оптимізація полігонів – це процес зменшення кількості полігонів у тривимірній моделі для поліпшення її продуктивності та ефективності використання. Під час оптимізації використовуються різні методи, такі як видалення непотрібних деталей, застосування оптимальних топологій полігонів, ретопологія, збереження деталей за допомогою бамп-мапів та нормалей, рівні деталізації та використання рівнів деталізації (LOD).

Одним із методів є видалення непотрібних деталей, що не впливають на зовнішній вигляд моделі. Ретопологія дозволяє перебудувати геометрію моделі з метою створення більш оптимізованої топології. Збереження деталей за допомогою бамп-мапів та нормалей дозволяє зменшити кількість полігонів, використовуючи текстурну інформацію для створення рельєфних ефектів. Також можна

					КР.КІ.07128/20.00.00.000 ПЗ	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

використовувати рівні деталізації для різних частин моделі в залежності від їхнього значення та віддаленості.

Використання LOD дозволяє динамічно змінювати рівень деталізації моделі в залежності від відстані до об'єкта, що допомагає забезпечити оптимальну продуктивність та якість відтворення. Всі ці методи спрямовані на оптимізацію тривимірних моделей для забезпечення їхньої ефективності та реалістичності віртуального середовища.

Управління текстурами є важливою частиною процесу розробки тривимірних моделей, оскільки текстури додають деталізацію, реалістичність та виразність до об'єктів. Цей процес включає в себе керування кольорами, відтінками, розмірами, шаблонами і текстурними ефектами, які накладаються на поверхні моделі.

Першим кроком управління текстурами є вибір або створення самої текстури. Це може бути фотографія, зображення або генеративна текстура, створена у графічному редакторі. Потім текстура пов'язується з конкретними частинами моделі, такими як обличчя, одяг або поверхня землі.

Після того як текстура призначена, її можна налаштувати за допомогою різних параметрів, таких як насиченість, контрастність, яскравість, розмір малюнка та інші. Це дозволяє досягти бажаного візуального ефекту та адаптувати текстуру під потреби конкретного проекту.

Після налаштування параметрів текстури її можна розмістити на моделі за допомогою UV-розгортання, що дозволяє відобразити текстурні координати моделі на двовимірне просторове зображення. Це забезпечує точне покриття моделі текстурою та коректне відображення у візуалізаційному програмному забезпеченні.

Управління текстурами також включає в себе роботу з блендами та шейдерами для досягнення спеціальних ефектів, таких як змішування текстур, створення відблисків, тіней та інших деталей, що роблять модель більш реалістичною та привабливою.

					КР.КІ.07128/20.00.00.000 ПЗ	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Збереження деталей за допомогою бамп-мапів та нормалей є важливою стратегією для підвищення деталізації тривимірних моделей, не збільшуючи кількість полігонів. Бамп-мапи та нормалі дозволяють створити ілюзію додаткових деталей, таких як нерівності, текстури, зморшки або деталі на поверхні об'єктів, за допомогою текстурних зображень.

Бамп-мапи - це двовимірні зображення, де кожен піксель представляє відхилення поверхні об'єкта від його головної форми. Під час рендерингу програмне забезпечення використовує інформацію з бамп-мапи, щоб створити візуальний ефект "випуклості" або "вглибленості" на поверхні.

Нормалі, як і бамп-мапи, використовуються для збереження додаткових деталей на поверхні моделі. Однак вони працюють трохи інакше: кожен піксель нормалі зберігає інформацію про напрямок вектора нормалі для кожної точки поверхні. Ці вектори використовуються для обчислення освітлення та тіней під час рендерингу, що дозволяє створювати враження деталізованої поверхні.

Обидва методи дозволяють зберігати додаткові деталі без значного збільшення кількості полігонів моделі. Це дозволяє оптимізувати роботу з тривимірними об'єктами, зменшуючи обсяги даних та полегшуючи їхнє відтворення під час рендерингу.

Використання рівнів деталізації - це стратегія оптимізації тривимірних моделей, яка полягає у створенні декількох версій однієї моделі з різним рівнем деталізації. Ця стратегія дозволяє зберігати велику кількість деталей у високоякісних версіях моделі, але використовувати меншу кількість деталей у менш деталізованих версіях для зменшення обсягу даних та підвищення продуктивності рендерингу.

У моделях з рівнями деталізації можуть бути різні версії одного об'єкта з різним рівнем деталізації, наприклад, об'єкти з високим, середнім та низьким рівнем деталізації. Під час відтворення сцени програмне забезпечення використовує потрібний рівень деталізації для кожного об'єкта в залежності від потреби та потужності пристрою.

					КР.КІ.07128/20.00.00.000 ПЗ	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Ця стратегія особливо корисна у відкритих віртуальних середовищах, де обсяги даних можуть бути обмеженими, але вимоги до деталізації можуть відрізнятись в залежності від віддаленості об'єктів від глядача. Завдяки використанню рівнів деталізації можна забезпечити оптимальний баланс між реалізмом та продуктивністю у віртуальних середовищах.

Використання LOD (рівнів деталізації) - це метод оптимізації тривимірних моделей, який полягає у створенні кількох версій однієї моделі з різним рівнем деталізації. Кожна версія моделі має різну кількість полігонів або текстурної деталізації, що дозволяє використовувати меншу кількість ресурсів для відтворення об'єктів на екрані.

Під час відтворення сцени програмне забезпечення автоматично вибирає найбільш відповідний рівень деталізації для кожного об'єкта в залежності від відстані до об'єкта та його розміру на екрані. Наприклад, коли об'єкт знаходиться далеко від глядача або має невеликі розміри на екрані, можна використовувати менш деталізовану версію моделі, щоб зменшити навантаження на систему. У той же час, коли об'єкт наближується до глядача або займає більшу частину екрана, можна використовувати більш деталізовану версію моделі для забезпечення кращого реалізму.

Використання LOD дозволяє покращити продуктивність програми та забезпечити кращу якість відтворення сцени у віртуальних середовищах. Цей метод особливо корисний у великих ігрових світах або в інтерактивних додатках віртуальної реальності, де може бути багато об'єктів з різною віддаленістю та розмірами на екрані.

Таким чином, інтеграція та оптимізація тривимірної моделі голови людини для використання у системах віртуальної реальності є важливим етапом в розробці віртуальних додатків та ігор. Завдяки цим процесам можна забезпечити ефективну роботу програми, оптимальне використання ресурсів та високу якість візуалізації.

Інтеграція полягає у включенні створеної моделі голови в систему віртуальної реальності та належному її налаштуванні для відтворення відповідно

					КР.КІ.07128/20.00.00.000 ПЗ	Арк.
						51
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

до потреб користувача. Оптимізація моделі включає в себе застосування різних технік для зменшення навантаження на систему, таких як використання LOD, оптимізація полігонів, управління текстурами та інші.

В результаті цих процесів можна досягти плавної та ефективної роботи віртуальних додатків, забезпечивши при цьому високу реалістичність та точність моделі голови. Оптимізована модель дозволить користувачам насолоджуватися віртуальними середовищами без затримок та проблем з продуктивністю, що робить їх досвід більш комфортним і захопливим.

					КР.КІ.07128/20.00.00.000 ПЗ	Арк.
						52
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

У цій роботі розглянуто та розроблено програмну тривимірну модель голови людини для використання в системах віртуальної реальності. Враховуючи актуальність теми, було здійснено детальний аналіз методів побудови геометричних моделей, розроблено алгоритми та реалізовано інтеграцію моделі в систему віртуальної реальності. Робота спрямована на створення реалістичних і точних тривимірних моделей, що значно підвищують якість взаємодії користувачів у віртуальному середовищі.

У результаті дослідження було виконано завдання.

1. Проведено класифікацію основних методів побудови тривимірних моделей та обґрунтовано вибір невідільної локальної моделі обличчя людини.

2. Оцінено параметри геометричної моделі голови людини та визначено основні етапи її побудови.

3. Розроблено алгоритм генерації базової текстури при побудові голови людини, а також алгоритми синтезу текстури позаду вуха, потилиці, тім'я та очей.

4. Реалізовано тривимірну моделі голови людини для систем віртуальної реальності, в результаті чого створено текстури для реалістичного візуального вигляду моделі, а також проведено інтеграцію та оптимізацію моделі голови для використання у системах віртуальної реальності.

5. Обґрунтовано техніко-економічну доцільність програмної розробки тривимірної моделі голови людини для систем віртуальної реальності (додаток Г), що підтвердило економічну ефективність проекту з терміном окупності у 1,4 роки.

Таким чином, у роботі було виконано всі заплановані етапи дослідження та розробки, що дозволяє зробити висновок про успішність досягнення поставлених цілей і завдань. Отримані результати підтверджують ефективність запропонованих методів і алгоритмів для створення реалістичних тривимірних моделей голови людини, що можуть бути використані у сучасних системах віртуальної реальності.

					КР.КІ.07128/20.00.00.000 ПЗ	Арк.
						53
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Пасько В.В., Стеренчак І.В. Основні етапи 3D-моделювання для створення реалістичних зображень // Матеріали науково-практичної конференції молодих вчених і студентів «Інтелектуальні комп'ютерні системи та мережі» (ІКСМ-2024). Тернопіль, 2024. С. __.

2. Методичні вказівки до оформлення курсових проектів, звітів про проходження практики, випускних кваліфікаційних робіт для студентів спеціальності «Комп'ютерна інженерія» / І.В. Гураль, Л.О. Дубчак / Під ред. О.М. Березького. Тернопіль: ТНЕУ, 2019. 33 с.

3. Методичні вказівки до виконання практичних робіт з дисципліни «Техніко-економічне обґрунтування розробки комп'ютерних систем»/ Н.Я. Савка, І.Р. Паздрій / Під ред. О.М. Березького. Тернопіль: ТНЕУ, 2019. 40 с.

4. Положення про організацію освітнього процесу Західноукраїнському національному університеті. Тернопіль, 2020.

5. Загальні методичні рекомендації з підготовки, оформлення, захисту та оцінювання кваліфікаційних робіт здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) і другого (магістерського) рівнів. Тернопіль: ЗУНУ, 2024. 83 с.

6. Методичні вказівки до випускних кваліфікаційних робіт освітнього рівня “Бакалавр” спеціальності “Комп'ютерна інженерія”/ О.М. Березький, Г.М. Мельник, Л.О. Дубчак, Ю.М. Батько / Під ред. О.М. Березького. Тернопіль: ЗУНУ, 2023. 52 с.

7. Bishop G., Bricken W., Brooks F., Brown M., Burbeck C., Durlach N., Ellis S., Fuchs H., Green M., Lackner J., et al. Research Directions in Virtual Environments // Computer Graphics, Vol. 26, No. 3, 1992. P.153–183.

8. Cerf M., Harel J., Einhäuser W., Koch C. Predicting human gaze using low-level saliency combined with face detection // Advances in neural information processing systems. 2008. P. 241–248.

					КР.КІ.07128/20.00.00.000 ПЗ	Арк.
						54
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

9. Palermo R., Rhodes G. Are you always on my mind? A review of how face perception and attention interact // *Neuropsychologia*, Vol. 45, No. 1, 2007. P. 75–92.
10. Chien S.H.L. No more top-heavy bias: Infants and adults prefer upright faces but not top-heavy geometric or face-like patterns // *Journal of Vision*, Vol. 11, No. 6, 2011. P. 1–14.
11. Tullis T., Siegel M., Sun E. Are people drawn to faces on webpages? // *CHI'09 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*. 2009. P. 4207–4212.
12. Parke F.I. Computer generated animation of faces // *Proceedings of the ACM annual conference – Volume 1*. 1972. P. 451– 457.131
13. Parke F.I. A model for human faces that allows speech synchronized animation // *Computers & Graphics*, Vol. 1, No. 1, 1974. P. 3– 4.
14. Leo M.J., Manimegalai D. 3D modeling of human faces – A survey // *3rd International Conference on Trends in Information Sciences and Computing (TISC)*. 2011.
15. 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.
16. Breuer P., Kim K.I., Kienzle W., Schölkopf B., Blanz V. Automatic 3D face reconstruction from single images or video // *8th IEEE International Conference on Automatic Face and Gesture Recognition*. 2008. P. 1–8.
17. Bakshi U., Singhal R. A survey on face detection methods and feature extraction techniques of face recognition // *International Journal of Emerging Trends & Technology in Computer Science*, Vol. 3, No. 3, 2014. P. 233–237.
18. Saragih J.M., Lucey S., Cohn J.F. Face alignment through subspace constrained mean-shifts // *International Conference on Computer Vision*. 2009. P. 1034–1041.
19. Wang N., Gao X., Tao D., Li X. Facial Feature Point Detection: A Comprehensive Survey // *International Journal of Computer Vision*, 2015.

					КР.КІ.07128/20.00.00.000 ПЗ	Арк.
						55
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

20. Rathod D., Vinay A., Shylaja S.S., Natarajan S. Facial Landmark Localization – A Literature Survey // International Journal of Current Engineering and Technology, Vol. 4, No. 3, 2014. P. 1901–1907.

21. Saragih J.M., Lucey S., Cohn J.F. Deformable Model Fitting by Regularized Landmark Mean-Shift // International Journal of Computer Vision, Vol. 91, No. 2, 2011. P. 200-215.

22. Cristinacce D., Cootes T. Automatic feature localisation with constrained local models // Pattern Recognition, Vol. 41, No. 10, 2008. P. 3054—3067.

23. Rath S.K., Rautaray S.S. A Survey on Face Detection and Recognition // I.J. Modern Education and Computer Science, No. 8, 2014. P. 34—44.

24. Nelder J.A., Mead R. A simplex method for function minimization // The computer journal, Vol. 7, No. 4, 1965. P. 308–313.

25. Sinsinwar T., Dwivedi P.K. A survey on feature extraction method and dimension reduction techniques in face recognition // Int. Journal of Applied Sciences and Engineering Research, Vol. 3, No. 3, 2014. P. 734—740.

26. Cootes T.F., Taylor C.J. Statistical models of appearance for computer vision, 2004.

27. Gao X., Su Y., Li X., Tao D. A review of active appearance models // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, Vol. 40, No. 2, 2010. P. 145-158.

28. Xiong X., De la Torre F. Supervised descent method and its applications to face alignment // IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2013. P. 532—539.

29. Valstar M., Martinez B., Binefa X., Pantic M. Facial point detection using boosted regression and graph models // IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2010. P. 2729-2736.

30. Zhu X., Ramanan D. Face detection, pose estimation, and landmark localization in the wild // IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2012. P. 2879-2886.138

					КР.КІ.07128/20.00.00.000 ПЗ	Арк.
						56
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

31. Zhao X., Chai X., Shan S. Joint face alignment: Rescue bad alignments with good ones by regularized re-fitting // Proceedings of European Conference on Computer Vision (ECCV). 2012. P. 616-630.

32. Huang Y., Liu Q., Metaxas D. A component based deformable model for generalized face alignment // IEEE 11th International Conference on Computer Vision (ICCV). 2007. P. 1-8.

33. Smith B.M., Zhang L. Joint face alignment with non-parametric shape models // Proceedings of European Conference on Computer Vision (ECCV). 2012. P. 43-56.

33. Luo P., Wang X., Tang X. Hierarchical face parsing via deep learning // IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2012. P. 2480—2487.

34. Sun Y., Wang X., Tang X. Deep convolutional network cascade for facial point detection // IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2013. P. 3476-3483.

35. Cootes T.F., Edwards G.J., Taylor C.J. Comparing Active Shape Models with Active Appearance Models // BMVC. 1999. Vol. 99. P.173-182.

36. Horesh N.P. Face and facial feature tracking: ASM, AAM, CLM, Haifa, 2013.

					КР.КІ.07128/20.00.00.000 ПЗ	Арк.
						57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		