

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

РОМАНЮК СЕРГІЙ ОЛЕКСАНДРОВИЧ

УДК 615.47: 616–072.7

**МЕТОДИ, МОДЕЛІ ТА СИСТЕМА ФОРМУВАННЯ ТРИВИМІРНИХ
ЗОБРАЖЕНЬ ОБЛИЧ ЛЮДЕЙ ДЛЯ РЕКОНСТРУКТИВНОЇ
ТА ПЛАСТИЧНОЇ МЕДИЦИНИ**

05.11.17 – біологічні та медичні прилади і системи

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Вінниця – 2019

Дисертацією є кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Робота виконана у Вінницькому національному технічному університеті,
Міністерство освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор,
Павлов Сергій Володимирович,
Вінницький національний технічний університет,
проректор з наукової роботи

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор,
Русин Богдан Павлович,
Фізико-механічний інституту ім. Г. В. Карпенка,
Національна академія наук України,
завідувач відділу методів та
систем дистанційного зондування

доктор технічних наук, професор,
Ткачук Роман Андрійович,
Тернопільський національний університет імені
І. Пулюя, професор кафедри біотехнічних систем

Захист відбудеться «25» жовтня 2019 р. о 10⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 05.052.06 у Вінницькому національному технічному університеті за адресою: 21021, Україна, м. Вінниця, вул. Хмельницьке шосе, 95, ГНК, ауд. 210.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Вінницького національного технічного університету за адресою: 21021, Україна, м. Вінниця, вул. Хмельницьке шосе, 95, ГНК.

Автореферат розісланий «23» вересня 2019 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

С. В. Тимчик

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Обґрунтування вибору теми дослідження. Обличчя людини визначає її привабливість та є основним засобом ідентифікації і невербальної комунікації.

Травми обличчя відносять до найпоширеніших пошкоджень з постійною тенденцією до зростання. Число пошкоджень за останнє десятиліття зросло в 2,4 рази. Це обумовлює зростання ролі пластичної та реконструктивної медицини. За статистикою, щорічно в світі проводиться біля 18 млн пластичних операцій.

Враховуючи збереження динаміки травматизму, актуальними є питання покращення діагностування, підвищення ефективності проведення пластичних і реконструктивних операцій. Підвищення рівня проведення та планування таких операцій пов'язують з використанням тривимірного моделювання.

Тривимірні моделі обличчя людини є найреалістичнішими, відображають анатомічну структуру, точно передають рельєфні та кольорові особливості об'єкта, підлягають модифікації для зміни зовнішності. 3D-модель обличчя є багатофакторним джерелом інформації про пацієнта, дозволяє істотно знизити необхідний обсяг взаємодії з користувачем порівняно з існуючими методами.

Натурне тривимірне моделювання для задач пластичної та реконструктивної медицини є неприйнятним, оскільки отримана модель є суб'єктивною. В цьому випадку доцільна розробка засобів і системи, що дозволять розробити реалістичні об'єкти, які є адекватними реальним.

У багатьох випадках пластичні хірурги при плануванні хірургічних втручань покладаються на аналіз фотографій обличчя пацієнта. Такий підхід має суттєві обмеження, зумовлені просторовими спотвореннями, неможливістю відтворити зовнішній вигляд пацієнта після хірургічного втручання. Невідповідність очікуваного розміру або форми може призвести до повторного хірургічного втручання. За світовою статистикою в 20–40% випадків пацієнти не задоволені результатами пластичної операції. Цей ризик можна суттєво зменшити за рахунок попередньої розробки 3D-моделі обличчя, яку може оцінити пацієнт до і після операції і висловити свої побажання

Моделювання кінцевого результату пластичної операції до її проведення дасть можливість пацієнту уточнити вимоги щодо зміни своєї зовнішності, а пластичному хірургу – краще зрозуміти побажання пацієнта. У свою чергу, використання тривимірних зображень обличчя дозволяє хірургу не тільки краще підготуватися до хірургічного втручання, але і зробити його менш інвазивним і небезпечним для пацієнта, а також знизити ймовірність ускладнень.

У медичній практиці тривимірна модель зображення обличчя має характерну відмінність від інших застосувань, оскільки вона є об'єктом дослідження для діагностики, а тому має бути точною та давати можливість для отримання різних метрик. У цьому випадку поєднання антропометричних даних з іншими методами досліджень дозволяє значною мірою уточнити діагноз. Сьогодні на основі аналізу співвідношень різних ділянок обличчя можна діагностувати багато захворювань.

Важливою задачею є розробка на основі тривимірних моделей обличчя діагностичних ознак для проведення пластичних і реконструктивних операцій. Для цього необхідна розробка засобів для достовірних вимірів криволінійних профілів, необхідних кутів анатомічних елементів, аналізу виділених ділянок обличчя.

При формуванні кольорів для різних ділянок обличчя важливо реалістично

відобразити дифузну, спекулярну складові інтенсивності кольору. При цьому необхідно враховувати залежності коефіцієнтів відбиття від вікових змін людини, офсетну структуру поверхні обличчя. Важливою для планування та проведення пластичних і реконструктивних операцій є розробка фізично-коректних моделей відбивної здатності поверхні, які підвищують достовірність діагностування.

Важливою вимогою до методів формування тривимірних зображень обличчя людини є висока продуктивність, яка має бути достатньою для підтримки динамічного та інтерактивного режимів.

Тому розробка високопродуктивних методів, моделей та засобів для формування тривимірних зображень обличчя людей для планування та проведення пластичних і реконструктивних операцій є актуальною задачею.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Результати досліджень були використані для розробки систем візуального відтворення біомедичних даних при реалізації держбюджетних науково-дослідних робіт: № 30-Д-313 «Створення інформаційних діагностичних технологій для оцінювання стану і визначення індексу здоров'я людини» (номер державної реєстрації 0108U000656); № 26-Д-381 «Система автоматизованої багатофункціональної лазерної поляриметрії плівок плазми крові людини для діагностики паталогічних змін молочних залоз» (номер державної реєстрації 0116U004709), № 30-Д-392 «Аналіз теоретичних засад побудови інтелектуалізованої системи зображувальної поляриметрії біологічних тканин та її базових блоків» (номер державної реєстрації 0118U000207).

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є підвищення ефективності проведення пластичних і реконструктивних операцій за рахунок високореалістичного, високопродуктивного відтворення обличчя людини новими моделями, методами та засобами.

Основними задачами дослідження є:

- провести аналіз існуючих методів і засобів формування тривимірних зображень для задач пластичної та реконструктивної хірургії;
- розробити нові:
 - моделі відбивної здатності поверхонь обличчя, які забезпечують високу реалістичність і продуктивність відтворення кольорів;
 - фізично-коректні дистрибутивні функції відбивної здатності поверхні, особливість яких полягає у дотриманні закону збереження енергії при формуванні зображень:
 - методи підвищення продуктивності зафарбовування зображень обличчя;
 - метод реконструкції людського обличчя;
 - визначити аналітичні залежності коефіцієнта спекулярності шкіри обличчя людини для різних вікових груп;
 - діагностичні ознаки морфологічного аналізу зображень обличчя людини для проведення пластичних і реконструктивних операцій;
 - метод морфінгу 3D-зображень обличчя людини для задач діагностики;
 - основні вимоги до побудови програмних аналогів біомедичних приладів з використанням 3-D моделей;
 - програмні та апаратні засоби для формування зображень обличчя для задач пластичної та реконструктивної медицини, а також систему на їх основі;
 - провести експериментальні дослідження розроблених моделей і методів.

Об'єкт дослідження – процес формування тривимірних зображень обличчя людини у медичних системах.

Предмет дослідження – методи та засоби візуалізації тривимірних зображень обличчя людей.

Методи дослідження. У процесі дослідження застосовувалися: теорія чисел та чисельних методів; теорія алгоритмів; теорія інтерполювання функцій; методи аналітичної геометрії, лінійної алгебри, диференціального й інтегрального числення для розробки моделей та методів візуалізації обличчя; комп'ютерне моделювання для аналізу та перевірки достовірності отриманих теоретичних положень.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Вперше запропоновано метод зафарбовування обличчя людини, особливість якого полягає у адаптивному використанні поліномів другого та третього степенів для визначення інтенсивностей кольору на різних ділянках зображення обличчя, що дозволило підвищити реалістичність формування тривимірного зображення та зменшити кількість складових трикутників полігональної моделі.

2. Вперше розроблено фізично-коректні моделі відбивної здатності поверхні на основі косинусної моделі, особливість яких полягає у дотриманні закону збереження енергії при формуванні зображень обличчя, що дозволило підвищити достовірність визначення інтенсивностей кольорів при формуванні зображень обличчя.

3. Розроблено нові модифікації моделі відбивної здатності поверхні Шліка для формування зображень обличчя людини, які відрізняються від відомої адаптивною зміною степеня функції залежно від коефіцієнта спекулярності та введенням нормувальних коефіцієнтів, що дозволило підвищити точність відтворення спекулярної складової кольору.

4. Подальшого розвитку отримала косинусна модель відбивної здатності поверхні обличчя людини, у якій, на відміну від класичної, використано піднесення дистрибутивної функції до меншого степеня, що дозволило підвищити продуктивність формування зображення обличчя при високій точності відтворення як епіцентра, так і блюмінгу відблиску.

5. Подальшого розвитку отримав метод реконструкції людського обличчя за даними стереопари, у якому, на відміну від існуючого, використано аналітичні функції збурення, а для пошуку функцій, що описують об'єкт, використовується зворотний рекурсивний поділ об'єктного простору, що дозволило зменшити обсяг необхідної пам'яті для зберігання геометричної моделі, спростити її масштабування та використати для візуалізації метод трасування променів.

6. Подальшого розвитку моделі Кука-Торенса і Варда, які відрізняються від відомих використанням при розрахунках тільки однієї функції і менших степенів поліномів, що дає можливість підвищити продуктивність формування зображень обличчя людини з урахуванням офсетних властивостей шкіри.

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що на основі проведених теоретичних досліджень і отриманих наукових результатів розроблено комплекс програмних і апаратних засобів для формування тривимірних зображень обличчя людини, зокрема: програмний модуль для тестування розроблених моделей та методів на основі професійного графічного конвеєра `idx3d`; комп'ютерну програму для реконструкції 3D-моделей (посіла 2-е місце на Міжнародному конкурсі «Золотий байт» у 2016 році в номінації програмних проєктів

STARTUP CHALLENGE); програму для визначення коефіцієнтів спекулярності обличчя людини; програмний модуль для морфологічного аналізу зображення обличчя та проведення експрес-діагностики; програмний модуль для аналізу тривимірних моделей голови людини; структурні схеми пристроїв для формування кольорів на обличчі людини; структурну схему системи для формування тривимірних зображень облич (голови) людини.

Впровадження результатів досліджень підтверджується відповідними актами. Результати досліджень використовуються на таких підприємствах і організаціях: науково-дослідний інститут реабілітації осіб з інвалідністю (акт від 25.09.2018), Українська військово-медична академія (акт від 14.11.2018), ПМВП «Фотоніка Плюс» (акт від 30.01.2019), ТОВ «ЗД Дженерайшн Юей» (акт від 11.05.2018); кафедра біомедичної інженерії Вінницького національного технічного університету для використання у навчальному процесі (акт від 15.11.2018).

Особистий внесок здобувача. Усі наукові результати, викладені у дисертаційній роботі, отримані автором особисто.

У друкованих працях, опублікованих у співавторстві, автору належать такі результати: [1], [17] – моделі відбивної здатності поверхонь; [2], [3] – методи антиаліазингу; [4] – аналіз наявності аномальних зон; [5] – формули для накладання текстур; [6] – формули для розрахунку інтенсивності світла за методом Фонга; [7] – алгоритм визначення координат на поверхні моделі очного яблука; [8], [10] – методи реконструкції; [9] – аналіз критеріїв якості медичних зображень; [11] – дистрибутивна функція відбивної здатності поверхні; [12] – оптимізація методів візуалізації; [13] – метод збурення дистрибутивної функції; [14] – метод рейкастингу; [15] – вирази для визначення інтенсивностей кольору; [16] – формули для визначення скалярного добутку векторів; [18] – метод рендерингу з обходом вісімкового дерева; [19] – фізично-коректні моделі; [20] – використання карти висот для анізотропного текстурування; [21] – алгоритм ідентифікації; [22] – співвідношення для незалежного обчислення векторів нормалей у рядку растеризації; [23] – формули для опису геометричних об'єктів; [24] – аналіз методів з використанням субпікселізації; [30] – аналіз методів отримання 3D-моделей; [31] – метод об'ємної візуалізації; [32] – аналіз напрямків використання тривимірного моделювання в медицині; [33] – аналіз технологій 3D-друку для медичних застосувань; [34] – аналіз методів обходу модельного простору; [35] – модифікована модель Шліка; [36] – метод розпізнавання; [37], [38] – структурні схеми пристроїв; [39]–[41], [43] – алгоритми та програми визначення інтенсивностей кольору; [42] – програма для рендерингу зображення; [44] – алгоритм зафарбовування поверхні.

Апробація матеріалів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на таких конференціях:

II Mezinárodní vědecko-praktická konference «Perspektivní novinky vědy a techniky» (Praha, 2005); науково-практична конференція «Сучасні проблеми та шляхи їх вирішення в науці, транспорті, виробництві та освіті» (Одеса, 2005); III Міжнародна науково-практична конференція «Наука і освіта 2005» (м. Дніпропетровськ, 2005); Міжнародна науково-практична конференція «Прогресивні інформаційні технології в науці, освіті та економіці» (м. Вінниця, 2009); Міжнародна наукова конференція «Наукове літо - 2010» (м. Київ, 2010); I Всеукраїнська науково-технічна конференція студентів, аспірантів та молодих вчених,

(м. Донецьк, 2011); Міжнародна науково-практичної Інтернет-конференція «Молодь в технічних науках: дослідження, проблеми, перспективи» (м. Донецьк, 2013); Міжнародна науково-практична Інтернет-конференція «Електронні інформаційні ресурси в освіті і науці: створення, використання, доступ» (м. Вінниця, 2013, 2018); Міжнародна конференція «Моделювання та комп'ютерна графіка» (м. Красноармійськ, 2013, 2015); International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON-2015(Omsk, 2015); Міжнародна науково-практична Інтернет-конференція «Молодь в технічних науках: дослідження, проблеми, перспективи» (м. Вінниця, 2016); II Międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji «Naukowa przestrzeń Europy-2016» (Przemys, 2016); Міжнародна науково-технічна конференція «Інформатика, математика» (м. Суми, 2016); VIII, IX Міжнародна конференція з математичного моделювання (м. Херсон, 2017, 2018); Міжнародна науково-технічна конференція «Комп'ютерна графіка та розпізнавання зображень», м. Вінниця, 2018; XI Міжнародна науково-практична конференції «Інформаційні технології і автоматизація» (м. Одеса, 2018).

Публікації. Основні результати досліджень опубліковано в 44 наукових працях, у тому числі в закордонній монографії, 6 статтях, що входять до міжнародної наукометричної бази Scopus, 12 статтях у фахових виданнях України, 2 статтях в періодичних закордонних журналах, 4 статтях в науково-технічних журналах, 12 – у матеріалах конференцій, 2 патентах України, 6 авторських свідоцтвах про реєстрацію авторського права на комп'ютерну програму.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел, що містить 138 найменувань, і додатків. Основний зміст дисертації викладено на 142 сторінках і містить 7 таблиць і 81 рисунок. Додатки містять акти впровадження результатів роботи, лістинги програм.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі проаналізовано сучасний стан задачі, обґрунтовано актуальність теми, окреслено її джерельну базу, сформульовано мету, основні задачі досліджень, визначено наукову новизну та практичне значення основних результатів, наведено відомості про їхню апробацію та реалізацію.

У першому розділі проаналізовано моделі, методи та системи рендерингу тривимірних зображень обличч людей для планування та проведення пластичних і реконструктивних операцій.

Розглянуто особливості тривимірного моделювання для планування та проведення пластичних операцій на обличчі людини. Обґрунтовано необхідність розробки методів, моделей і засобів формування 3D-зображень для медичних застосувань, оскільки їх використання забезпечує підвищення точності та вірогідності діагностування, ефективності проведення пластичних і реконструктивних операцій.

Проаналізовано основні етапи формування 3D-зображення обличчя людини. Проведено аналіз основних методів реконструкцій та моделей освітлення для задач візуалізації людських обличч. Проаналізовано існуючі системи планування пластичних і реконструктивних операцій на обличчі людини. Наведено основні вимоги до таких систем.

Другий розділ присвячено розробці моделей відбивної здатності поверхонь для формування тривимірних зображень облич людей з метою підвищення точності та вірогідності діагностування.

При формуванні тривимірних графічних зображень найчастіше використовують моделі відбивної здатності поверхонь на основі дистрибутивних функцій (ДФВЗ) невисокого степеня, скільки вони забезпечують високу швидкодію формування графічних сцен. До найпоширеніших ДФВЗ відносять функцію Шліка, згідно з якою спекулярну складову кольору визначають за формулою

$$SH(\gamma) = \frac{\cos \gamma}{n - n \cos \gamma + \cos \gamma}, \text{ де } \gamma - \text{кут між вектором нормалі } \vec{N} \text{ до поверхні}$$

об'єкта та вектором $\vec{H} = (\vec{L} + \vec{V}) / |\vec{L} + \vec{V}|$, \vec{L} і \vec{V} – відповідно, вектори до спостерігача та джерела світла, n – коефіцієнт спекулярності поверхні ($1 \leq n \leq 1000$). Функція Шліка дає можливість з високою точністю відтворити епіцентр відблиску, але повільне спадання функції, порівняно з класичною ДФВЗ Бліна та Фонга, ($SB(\gamma) = \cos^n(\gamma)$) призводить до збільшення розміру спекулярної плями на поверхні обличчя та, як наслідок, до збільшення часу формування графічної сцени.

Запропоновано апроксимувати функцію Шліка функцією $\frac{\cos \gamma}{a \cdot n - b \cdot n \cos \gamma + \cos \gamma}$. Для знаходження невідомих a і b прирівняємо функції Шліка та Бліна в точці $\gamma = 0$ і в точці з ординатою, що дорівнює 0,25. У цьому випадку $a = b \approx 2$. Отримано нову ДФВЗ $\frac{\cos \gamma}{2 \cdot n \cdot (1 - \cos \gamma) + \cos \gamma}$, яка дозволяє зменшити абсолютну похибку апроксимації зони блюмінгу.

Запропоновано таку модифікацію функції Шліка: $f(\gamma) = \frac{\cos^{2^{\lfloor \log_2 n - 2 \rfloor}}(\gamma)}{n - n \cdot \cos(\gamma) + \cos(\gamma)}$. Використання піднесення до степеня числа дозволяє прискорити темп спадання функції, і, як наслідок, покращити формування блюмінгу на обличчі.

Показано, що для формування зображень облич у чисельнику запропонованої функції достатньо використовувати $\cos^8(\gamma)$. Для оригінальної функції Шліка при формуванні зображень обличчя середньоквадратична похибка $NMSE > 0,0003$ і спостерігалися суттєві візуальні відмінності за рахунок неприродного формування блюмінгу відблиску. Модифікована ДФВЗ Шліка дозволила зменшити відносну похибку апроксимації відблиску в 7–8 разів порівняно з класичною, що дозволило зменшити $NMSE$ вдвічі та досягти прийнятної реалістичності.

Найбільш поширеними та точними для відтворення спекулярної складової є функції Бліна та Фонга типу $\cos^n(\gamma)$, де $1 \leq n \leq 1000$. У дисертаційній роботі запропоновано використати для їх апроксимації функцію $G_m(n, \gamma) = (\tau \cdot (\cos \gamma - 1) + 1)^m$. Параметри τ і m дають можливість змінювати розмір відблиску.

Доведено, що $\zeta = n/m$, де m вибирається залежно від необхідної точності відтворення спекулярної складової кольору обличчя. Вибір за m степеня двійки до-

зволяє замінити ділення на мікрооперації зсуву. Показано, що зі збільшенням m зростає точність відтворення як епіцентра відблиску, так і його зони затухання. Моделювання показало, що ця закономірність характерна для всіх m .

Для епіцентра відблиску максимальна відносна похибка апроксимації дистрибутивної функції $\cos^n \gamma$ не перевищує: 8% – для функції $G_4(n, \gamma)$; 3,8% – для функції $G_8(n, \gamma)$ і 1% – для функції $G_{16}(n, \gamma)$.

Аналіз показав, що найприйнятнішою для фотореалістичного відтворення обличчя людини є дистрибутивна функція $G_{16}(n, \gamma)$, оскільки забезпечує з високою точністю відтворення як епіцентра відблиску, так і його зони затухання. Функція $G_{16}(n, \gamma)$ має просту апаратну реалізацію.

Запропонована дистрибутивна функція може бути реалізована з використанням інструкції типу MADD (множення/додавання), які реалізовані в потокових процесорах.

Запропоновано енергетичний принцип знаходження m для функції $G(n, \gamma) = (\tau \cdot (\cos \gamma - 1) + 1)^m$. Для функції Бліна і $G(n, \gamma)$ знайдемо, відповідно, такі інтеграли:

$$\int_0^{\pi/2} \cos^n \gamma \cdot \sin \gamma \cdot d\gamma = \frac{\cos^{n+1} \gamma}{n+1} \Big|_0^{\pi/2} = \frac{1}{n+1},$$

$$\int_0^{\arccos(\frac{a-1}{a})} (a \cdot (\cos(\gamma) - 1) + 1)^{2^v} \cdot \sin(\gamma) d\gamma = \frac{1}{(2^v + 1) \cdot a},$$

де $m = 2^v$, $\arccos(\frac{a-1}{a})$ – абсциса, де утворювальна функція досягає нульового

значення. Прирівнявши значення знайдених інтегралів, знаходимо $a = \frac{n+1}{2^v+1}$. Для

$v = 4$ отримуємо таку ДФВЗ: $K_{16}(n, \gamma) = (\frac{n+1}{17} \cdot (\cos(\gamma) - 1) + 1)^{16}$.

Експериментальні дослідження показали, що для $K_{16}(n, \gamma)$ досягається, в середньому, в 1,2 раза менша абсолютна похибка апроксимації епіцентра відблиску порівняно з $G_{16}(n, \gamma)$ за рахунок симетрування абсолютної похибки на інтервалі зміни аргументу.

Розроблено моделі відбивної здатності поверхонь, для яких при формуванні зображень облич дотримано закон збереження енергії, що забезпечить підвищення реалістичності та усунення артефактів при формуванні спекулярної складової кольору, що надзвичайно важливо в медичній практиці для підвищення точності та вірогідності діагностування.

Для того, щоб ДФВЗ забезпечувала закон збереження енергії, величина півсферичної інтегральної відбивальної здатності поверхні має задовольняти умову: $\int_{\Omega} f_r(\omega, \omega_r) \cdot \cos \theta \cdot d\omega = 1$. Для моделі Фонга запишемо таке рівняння

$$coef(n) \cdot \int_{\Omega} (\vec{R} \cdot \vec{V})^n \cdot d\omega = 1.$$

Функція $\left(\frac{n}{16}(\cos\theta - 1) + 1\right)^{16}$ при $n=1..1024$ наближає оригінальну функцію $\cos^n\theta$ на проміжку $\theta \in [0; \theta_{cr}(n)] \subset [0; \pi/2]$, де $\theta_{cr}(n)$ – нуль відповідної функції. Вираз $\theta_{cr_1}(n) = \arccos((n-16)/n)$ апроксимуємо більш простим $\theta_{cr}(n) = 6/\sqrt{n}$. При переході до сферичних координат $d\omega = \sin\theta \cdot d\varphi \cdot d\theta$.

$$\begin{aligned} & coef_1(n) \cdot \int_0^{2\pi} \int_0^{\theta_{cr}(n)} \left(\frac{n}{16}(\cos\theta - 1) + 1\right)^{16} \cdot \sin\theta \cdot d\theta d\varphi = \\ & = coef_1(n) \cdot 2\pi \int_0^{\theta_{cr}(n)} \left(\frac{n}{16}(\cos\theta - 1) + 1\right)^{16} \sin\theta \cdot d\theta = coef_1(n) \cdot 2\pi \cdot Int(n). \end{aligned}$$

Таким чином, рівняння для визначення нормувального коефіцієнта прийме такий вигляд: $coef_1(n) \cdot 2\pi \cdot Int(n) = 1$, де множник $Int(n)$ нелінійно залежить від n . Для визначення $coef_1(n)$, знайдемо значення $Int(n)$ при $n=1..1000$ і визначимо за методом найменших квадратів функцію $coef_1(n)$.

У результаті розрахунків отримано функцію $coef_1(n) = 1.063n/(2\pi)$. Похибка $res_1(n) = |2\pi \cdot coef_1(n) \cdot Int(n) - 1|$, $\max_{n=16..1024} res_1(n) = 4.7 \cdot 10^{-4}$.

Доведено, що для функції $\left(\frac{n+1}{17}(\cos\theta - 1) + 1\right)^{16}$ значення нормувального коефіцієнта дорівнює $(n+1)/2\pi$ за умови використання векторів \vec{R}, \vec{V} і $(n+2)/8\pi$ для векторів \vec{L}, \vec{N} . Аналогічно для функції $\left(\frac{n+1}{17}(\cos\theta - 1) + 1\right)^{16}$ значення коефіцієнтів дорівнюють $\frac{1.068n + 0.96}{8\pi}$, $\frac{n+2}{8\pi}$ відповідно.

Запропоновані моделі дають можливість з високою швидкістю реалістично відтворити колір обличчя людини та мають просту апаратну реалізацію.

Третій розділ присвячено методам формування зображень облич для проведення пластичних і реконструктивних операцій.

Шкіра людини є анізотропною поверхнею, на оптичні властивості якої в першу чергу впливає її мікро- та макрорельєф.

У методах рендерингу облич компанія NVidia використовує коефіцієнт спекулярного відбиття F_o шкіри при нормальному падінні світла зі сталим значенням, що не дозволяє при моделюванні адекватно відтворити оптичні властивості шкіри людей різного віку.

З віком мікрорельєф шкіри розгладжується, шкіра стає більш гладкою та блискучою, тому коефіцієнт яскравості відблиску зі старінням шкіри зростає. При цьому макрорельєф стає більш виразним через втрату еластичності шкіри та поглиблення зморшок, що вимагає побудови більш деталізованої полігональної мо-

делі в проблемних зонах.

Здатність шкіри утримувати вологу у верхніх шарах залежить, в першу чергу, від концентрації гіалуронової кислоти, яка з віком людини зменшується. У роботі отримано аналітичні залежності F_0 від віку age , які зведено в табл. 1

Таблиця 1 – Залежність F_0 від віку age

Діапазон віку в роках, age	Функція залежності коефіцієнта F_0 від віку
[0; 20]	$F_0(age) = 0,02$
[20; 45]	$F_0(age) = age \cdot 0,00026 + 0,0148$
[45; 75]	$F_0(age) = age \cdot 0,00068 - 0,0041$
[75; 100]	$F_0 = 0,047$

Виконано диференціацію значень коефіцієнтів спекулярного відбиття та коефіцієнтів яскравості відблиску для людей різних вікових категорій і для різних ділянок обличчя.

Проведені дослідження дають можливість здійснити перерозподіл спекулярної та дифузної складових, а також врахувати вікові зміни обличчя пацієнтів. Це забезпечить більш реалістичне відтворення зображень обличчя людей.

Оскільки шкіра належить до шорстких поверхонь, то для освітлення доцільно використати моделі освітлення, які враховують офсетну структуру поверхні, і як, наслідок, є більш фізично коректними. До таких моделей відносять моделі Кука-Торенса та Варда. Перша краще моделює спектральну складову кольору, а друга – дифузну.

Згідно з моделлю Кука-Торенса, розрахунок відбитого світла здійснюють за формулою $\frac{F \cdot G \cdot D}{(\vec{V} \cdot \vec{N}) \cdot (\vec{L} \cdot \vec{N})}$, де F – коефіцієнт Френеля, G – параметр, що враховує самозатінення ділянок, D – параметр, що визначає середньоквадратичний нахил мікрограней.

Параметр D визначають за формулою

$$D = \frac{1}{4 \cdot m^2 (\vec{H} \cdot \vec{N})^4} e^{\left(\frac{(\vec{H} \cdot \vec{N})^2 - 1}{m^2 \cdot (\vec{H} \cdot \vec{N})^2} \right)},$$

де m – середній нахил мікрограней.

Розрахунок D є складним, оскільки передбачає використання двох функцій – експоненти та косинуса. В дисертаційній роботі отримано таку формулу:

$$D = \frac{\cos^{\frac{2}{m^2}-4}(\gamma)}{4 \cdot m^2}. \text{ З урахуванням отриманої в дисертаційній роботі залежності}$$

$$\cos^n \gamma \approx \left(\frac{n}{g} (\cos \gamma - 1) + 1 \right)^g \text{ отримано формулу } \frac{\cos^{\frac{2}{m^2}-4}(\gamma)}{4 \cdot m^2} = \frac{1}{4 \cdot m^2} \left((\cos \gamma - 1) + 1 \right)^g$$

для розрахунку $D \cdot g$ вибирають залежно від необхідної точності. Для $g = 16$

$$D \approx \frac{1}{4 \cdot m^2} \cdot \left[\left(\frac{1}{8 \cdot m^2} - \frac{1}{4} \right) \cdot (\cos(\gamma) - 1) + 1 \right]^{16}.$$

Показано, що в цьому випадку відносна похибка апроксимації не перевищує 2%.

Згідно з моделлю Варда інтенсивність кольору визначається за формулою

$$I_w = \frac{k_d}{\pi} + k_s \cdot \frac{1}{\sqrt{\vec{V} \cdot \vec{N} + \vec{L} \cdot \vec{H}}} \cdot \frac{e^{-\frac{tg^2(\gamma)}{m^2}}}{4 \cdot \pi \cdot \alpha^2},$$

де α – поправочний коефіцієнт, який залежить від кривизни поверхні.

Розроблену нову модифікацію моделі Варда, згідно з якою

$$I_w = \frac{k_d}{\pi} + k_s \cdot \frac{1}{\sqrt{\vec{V} \cdot \vec{N} + \vec{L} \cdot \vec{H}}} \cdot \frac{\left(\frac{1}{8 \cdot \alpha^2} (\cos \gamma - 1) + 1 \right)^{16}}{4 \cdot \pi \cdot \alpha^2} \cdot \frac{e^{-\frac{tg^2(\gamma)}{m^2}}}{4 \cdot \pi \cdot \alpha^2}.$$

Відносна похибка апроксимації $e^{-\frac{tg^2(\gamma)}{m^2}}$ не перевищує 1,3%.

Запропоновані вирази, порівняно з оригінальними, мають значно меншу обчислювальну складність за рахунок використання однієї функції, а також меншого степеня.

Формування дифузної та спекулярної складових кольору зображень ділянок обличчя є складною обчислювальною задачею, оскільки для кожного пікселя поверхні необхідно обчислити інтенсивність кольору, для чого потрібно визначити одиничні вектори до джерела світла, до спостерігача та нормалі до поверхні. Розрахунок одиничних векторів передбачає нормалізацію вихідних векторів, яка потребує виконання трудомістких операцій множення, ділення та знаходження квадратного кореня. Для визначення спекулярної складової кольору передбачається визначення дистрибутивної функції відбивної здатності поверхні з використання трудомісткої операції піднесення до степеня. Тому актуальними є питання зменшення обчислювальної складності процедур визначення інтенсивності спекулярної та дифузної складових світла. При спрощеннях важливо зберегти високу реалістичність відтворення обличчя людини.

У роботі для підвищення продуктивності зафарбовування поверхні обличчя людини пропонується точно визначати інтенсивності кольору в кінцевих точках інтервалів, на які розбивається рядок растеризації, з подальшим розрахунком інтенсивностей кольору в проміжних точках з використання спрощених розрахунків.

Запропоновано адаптивний метод зафарбовування, особливість якого полягає у використанні для визначення інтенсивностей кольорів поліномів другого та третього степенів залежно від кривизни ділянки обличчя.

Використаємо для знаходження інтенсивності складової кольору на поточному інтервалі рядка растеризації такий поліном третього степеня

$$I_{i,t} = A_i \cdot t^3 + B_i \cdot t^2 + C_i \cdot t + D_i,$$

де t – параметрична змінна, A_i, B_i, C_i, D_i – невідомі, які можна знайти шляхом визначення інтенсивностей кольору в чотирьох точках інтервалу, на які розбито рядок растеризації.

Для визначення невідомих розбиваємо рядок растеризації на підінтервали з подальшим визначенням інтенсивностей кольору їх на межах. Для спрощення обчислень для розбиття інтервалів доцільно використовувати принцип дихотомії.

Розглянуто різні варіанти розбиття рядка растеризації на інтервали та оцінено обчислювальну складність отриманих поліномів. Показано, що найоптимальнішим є визначення інтенсивностей кольору для знаходження невідомих у точках $0; t/2; 3 \cdot t/4; 1$. Для цього випадку $A = 8 \left(\frac{I_2 + 8 \cdot I_4}{3} - (I_1 + 2 \cdot I_3) \right)$,

$B = 2(7 \cdot I_1 - I_2 + 10 \cdot I_3 - 16 \cdot I_4)$, $C = \frac{I_2 + 32 \cdot I_4}{3} - 7 \cdot I_1 - 4 \cdot I_3$, $D = I_1$. У наведених формулах

ділення можна замінити на мікрооперації зсуву та додавання (віднімання) згідно з

формулою $\frac{1}{3} \approx \frac{1}{2} - \frac{1}{8} - \frac{1}{32} - \frac{1}{128}$. У цьому випадку

відносна похибка визначення частки не перевищує 0,79%.

На рис. 1 наведено розбиття зображення обличчя людини на характерні ділянки. Аналіз показав, що для ділянок 2, 4, 7 доцільно використання для визначення дифузної та спекулярної складових апроксимаційного полінома другого степеня, а для інших – третього степеня.

Метод адаптивного зафарбовування дозволив підвищити реалістичність відтворення облич. Експериментальні дослідження показали, що досягнуто $NMSE \leq 0,0001$, тобто сформовані зображення візуально не відрізняються від еталонного. Метод дозволяє також підвищити швидкодію формування зображень облич при використанні високополігональних скелетних моделей за рахунок зменшення кількості складових трикутників.

Для досягнення високої реалістичності при використанні полігональних моделей тривимірних об'єктів збільшують кількість складових полігонів, що призводить до зростання часу візуалізації та обсягу необхідної пам'яті. При масштабуванні зображень проблематично швидко та ефективно змінити кількість полігонів для моделі об'єктів. Таких недоліків можна позбутися, використовуючи аналітичне задання поверхонь і растеризації їх з використанням методу трасування променів.

У роботі подальшого розвитку отримав метод реконструкції людського обличчя за даними стереопари, у якому, на відміну від існуючого, реалізовано аналітичне задання ділянок обличчя.

З каліброваної стереопари обличчя розраховується карта глибини на основі аналізу площ з використанням кореляції рівнів інтенсивності зображення.

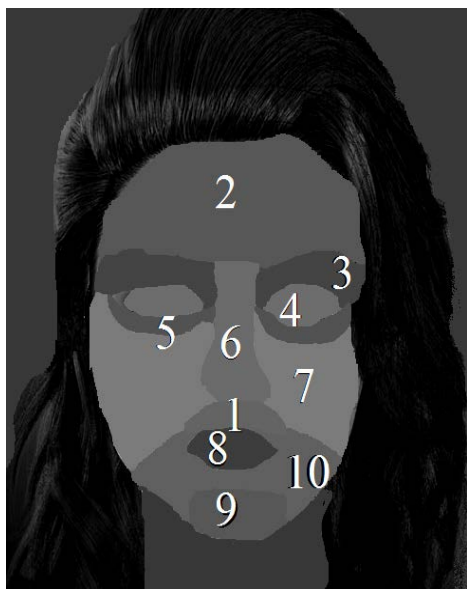


Рисунок 1 – Розбиття обличчя на характерні ділянки

Для опису поверхонь обличчя (голови) людини використано патчі (квадрики) та функції відхилення від базової квадрики, яка має такий вигляд

$$F(x, y, z) = A_{11}x^2 + A_{22}y^2 + A_{33}z^2 + A_{12}xy + A_{13}xz + A_{23}yz + A_{14}x + A_{24}y + A_{34}z + A_{44} \geq 0.$$

Новий патч визначається за формулою

$$F'(x, y, z) = F(x, y, z) + \sum_{i=1}^N R_i(x, y, z),$$

де $R(x, y, z)$ – функція збурення, яка розраховується за формулою

$$R_i(x, y, z) = \begin{cases} Q_i^3(x, y, z), & \text{якщо } Q_i(x, y, z) \geq 0, \\ 0, & \text{якщо } Q_i(x, y, z) < 0, \end{cases}$$

де $Q(x, y, z)$ – збурювальна квадрика.

Для того, щоб квадрику вписати у вихідну модель, необхідно визначити коефіцієнти базової квадрики за дев'ятьма габаритними точками, які обчислюються з карти глибини.

Отримано формули для аналітичного задання тривимірної моделі обличчя. Аналіз показав, що запропонований метод реконструкції дозволив зменшити обсяг пам'яті, необхідний для зберігання геометричної моделі, в понад 60 разів, спростити масштабування 3D-моделі, дозволив використати для візуалізації високореалістичний метод трасування променів, усунути аліайзинг зовнішніх контурів.

Запропоновані в розділі методи та моделі дозволяють підвищити реалістичність відтворення обличчя людини для медичних застосувань.

У четвертому розділі розглянуто питання використання графічних 3D-зображень обличчя для експрес-діагностування та побудови біомедичних засобів.

При плануванні та проведенні пластичних операцій часто використовують методику оцінювання співвідношень ділянок обличчя. Користуючись нею, пластичний хірург зможе визначити патології, домогтися оптимального естетичного результату пластики та задовольнити потреби пацієнта.

У дисертаційній роботі на основі аналізу літератури, консультацій з пластичними хірургами розроблено рекомендації щодо встановлення оптимальних

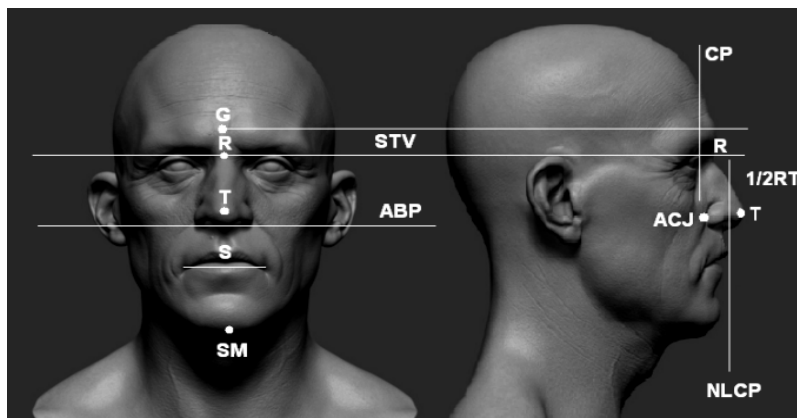


Рисунок 2 – Базові точки обличчя людини для морфологічного аналізу

співвідношень ділянок обличчя та голови людини для експрес-аналізу.

На рис. 2 зображено базові точки обличчя людини. На основі вимірювань на обличчі людини різних відстаней можна визначити різні лицьові індекси, які використовуються при проведенні пластичних і реконструктивних операцій.

Для пластичного хірурга

важливо провести детальний аналіз обличчя людини на предмет відповідності реального обличчя «ідеальному». У роботі наведено оптимальні співвідношення ділянок обличчя людини, які можна використати для планування пластичних операцій, зокрема, для ринопластики.

Результати досліджень можна використати для розробки засобів морфологічного аналізу обличчя та голови людини.

Згідно зі статистикою біля 8% населення мають генетичні порушення, причому у 30–40% це призводить до зміни в обличчі та черепі людини. Поширеність генетичних захворювань обумовлює необхідність розробки методів експрес-діагностики з використанням 3D-моделювання. Це дозволить прискорити діагностичний процес і зменшити залежність від дорогих досліджень ДНК.

Залежно від точності моделі і кількості контрольних точок можна досягти високої достовірності встановлення наявності хвороби.

Так, наприклад, синдром Дауна можна первинно діагностувати за такими вимірами: сплюснуте плоске обличчя; внутрішній кут очей розташовується нижче, ніж зовнішній; перенісся плоске та широке, вушні раковини маленькі, недорозвинені, розташовуються досить низько.

Розроблено програму для метрологічного аналізу голови людини, яка адаптивно налаштовується на діагностику конкретного генетичного захворювання. Програма проводить морфологічний аналіз ділянок обличчя. Так, наприклад, програма для первинного діагностування захворювання Брахицефалію реалізовано за черепним індексом, який при патології має значення, більше 81.

Розроблено рекомендації для експрес-діагностування генетичних захворювань, згідно з якими необхідні: розробка поширеної та доступної системи отримання 3D-зображень обличчя людини; аналіз діагностичних особливостей обличчя (голови) з метою розробки типової 3D-моделі обличчя (голови); формування достатньої кількості контрольних точок для подальшого аналізу; розробка програмних засобів для ідентифікації паталогічних ділянок обличчя; розробка бази даних тривимірних зображень з метою їх зберігання та аналізу перебігу змін в динаміці. Оскільки встановлено спадковість генетичних захворювань від близьких родичів, то доцільно створювати 3D-метричні архіви для поколінь; розробка системи групового зчитування інформації для корельованих зображень, наприклад, за ознакою спадковості; розробка системи пошуку у базі зображень з використанням мультифакторного аналізу; розробка плагінів для пакетів прикладних програм 3D-моделювання з метою достовірних вимірів криволінійних профілів, необхідних кутів анатомічних елементів, вимірів при просторових трансформаціях.

У роботі запропоновано використовувати морфінг тривимірних зображень обличчя для аналізу вікових патологій та проведення пластичних операцій.

Морфінг полягає у формуванні проміжних значень зображень від початкової моделі до кінцевої. Для цього, як правило, виконують модифікацію тріангуляційної моделі об'єкта. Морфінг дає можливість отримати інтерпольовані значення поверхонь зображень, в той час як інтерполювання від початкового до кінцевого операнда – тільки проміжні значення. Ця властивість дає можливість ефективно використовувати морфінг у медицині, зокрема, для аналізу розвитку паталогій, прогнозування вікових змін і т. д.

У роботі розроблено програмний модуль морфологічних перетворень зоб-

ражень для медичних застосувань. Програма (рис. 3) дозволяє на основі початкового та кінцевого 3D-зображення



Рисунок 3 – Інтерфейс програми для морфінгу

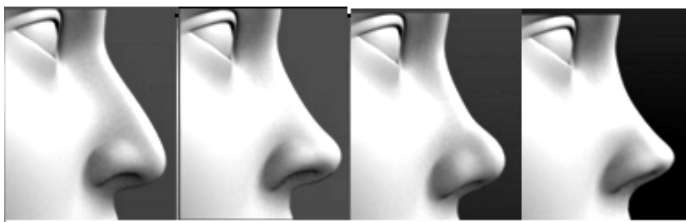


Рисунок 4 – Морфінг зображення носа

обличчя (голови) формувати проміжні зображення, задавати кількість кадрів, модифікувати полігональні моделі.

Запропоновано використовувати морфінг 3D-зображень при проведенні пластичних операцій з метою визначення оптимальної форми деяких ділянок обличчя. На рис. 4 зображено приклад використання морфінгу для задач ринопластики. Початковим зображенням є вихідна тривимірна модель обличчя людини з виділенням ділянки носа. Кінцеве зображення формує хірург з естетичних міркувань.

Кінцеве зображення може модифікуватися за рахунок зміни полігональної моделі. За допомогою програми формуються проміжні зображення, згідно з якими вибирається оптимальний варіант. Зрозуміло, що при цьому необхідно враховувати форму носа на фоні обличчя, що забезпечить прийняття правильного рішення з естетичної точки зору. Запропоновано метод аналізу відповідності вікових змін розвитку дитини встановленим нормам.

Згідно з методом формується тривимірна модель голови дитини з використанням тривимірного сканера чи методів фотометрії. Генерується кінцеве зображення шляхом встановлення форми та розмірів голови дитини відповідно до рекомендованих нормативних значень. На основі медичних даних встановлюється залежність розмірів ділянок обличчя (голови) від часу для подальшого налаштування процедури морфінгу. Проводиться морфінг між початковим та кінцевим зображеннями. При цьому формуються проміжні зображення. Встановлюється відповідність розмірів голови дитини параметрам, отриманих від згенерованих на основі морфінгу зображень, для визначення подальших діагностичних дій. Запропоновано алгоритми збалансованої тріангуляції для морфінгу.

Для дослідження обличчя та голови людини використовують різні прилади. Це, як правило, механічні біомедичні прилади різної складності і принципів дії. Серед найпоширеніших біомедичних приладів для метрологічних досліджень обличчя та голови людини використовують: фотостат Коркгауза, гнатостат Симона, краніометр, діоптограф, краніостереобазіометр, антропостереометр та інші.

Мета використання приладів – визначення розмірів анатомічних ділянок обличчя та голови людини. Якщо перші прилади визначали лінійні розміри, то

останні – просторові координати, Ці дані використовуються для подальшої обробки. На жаль, біометричні прилади у переважній більшості мають контактний ме-тод отримання даних, що створює незручності пацієнту, вимагає великого промі-жку часу досліджень (вимірювань). При цьому точність вимірювань є невисокою. Розробка програмних аналогів біомедичних приладів обумовлена необхідністю комп'ютеризувати процес діагностики та планування пластичних і реконструкти-вних операцій.

Запропоновано використовувати тривимірні моделі обличчя (голови) людини для вимірів вибраних ділянок.

Із аналізу можливостей біомедичних приладів для аналізу обличчя (голови) людини сформульовані такі основні вимоги до реалізації їх програмних аналогів з використанням 3-D моделей: безконтактний спосіб отримання 3D-моделей; можливість вимірювання лінійних і криволінійних відстаней; реалізація площинних перетинів під довільними кутами; виділення ділянок зображень і визначення їх площ; визначення симетричності обличчя людини; зміни деталізації залежно від умов застосування; накладання текстури, отриманої безпосередньо з місця формування тривимірної моделі; вивчення 3D-зображення з різних точок спостереження з метою проведення довільних метрологічних вимірювань; можливість розрахунку індексів обличчя та голови.

На основі перерахованих вимог розроблено цілу низку комп'ютеризованих засобів для вимірювань на основі сформованих 3-D моделей.

У **п'ятому розділі** розглянуто практичну реалізацію моделей, методів та засобів формування тривимірних зображень обличч людей у біомедичних системах.

Для оцінювання продуктивності формування тривимірних зображень з використанням нових ДФВЗ використовувалась кількість тактів процесора для виконання складових інструкцій. Візуальну відмінність між двома зображеннями оцінювалась за нормованою середньоквадратичною похибкою (NMSE).

Розширено функціональні можливості комп'ютерної програми на основі професійного графічного конвеєра `idx3d` для формування зображень 3D-моделей обличч у статичному та динамічному режимах за рахунок інтеграції нових програмних модулів. При тестуванні розроблених методів і засобів використано всі стадії графічного конвеєра.

На основі результатів моделювання проведено порівняльний аналіз розроблених ДФВЗ і сформульовані рекомендації щодо їх застосування.

Показано, що при програмній реалізації ДФВЗ $\frac{\cos \gamma}{2 \cdot n \cdot (1 - \cos \gamma) + \cos \gamma}$, порівняно з моделлю Шліка, обчислювальна складність зросла всього на одну операцію зсуву. Однак при цьому збільшилася точність відтворення відблиску.

Для формування зображень обличчя запропоновано модифіковану ДФВЗ Шліка $\frac{\cos^8(\gamma)}{n - n \cdot \cos(\gamma) + \cos(\gamma)}$. Для оригінальної функції Шліка при формуванні зображень обличчя $NMSE > 0,0003$, а тому спостерігалися суттєві візуальні відмінності за рахунок неприродного формування блюмінгу відблиску. Модифікована ДФВЗ дозволила зменшити відносну похибку апроксимації відблиску в 7–8 разів порівняно з класичною, що дозволило зменшити $NMSE$ вдвічі та досягти

прийнятної реалістичності.

У дисертаційній роботі розроблено дистрибутивну функцію виду $\left(\frac{n}{2^w} \cdot (\cos \gamma - 1) + 1\right)^{2^w}$.

Для шкіри обличчя достатньо високу точність досягають уже при $w = 3$. У цьому випадку відносна похибка апроксимації епіцентра відблиску не перевищує 3,8% порівняно з дистрибутивною функцією Бліна. Порівняно з цією ДФВЗ досягається підвищення продуктивності в понад 1,5 раза за рахунок зменшення кількості операцій множення, додавання та порівнянь.

При використанні дистрибутивної функції $\left(\frac{n}{16} \cdot (\cos \gamma - 1) + 1\right)^{16}$ максимальна відносна похибка апроксимації функції $\cos^n \gamma$ не перевищує 1%. При цьому досягається висока реалістичність відтворення зони затухання (блюмінгу). Максимальна відносна похибка апроксимації в цьому випадку не перевищує 7,6% порівняно з 98,2% для методу Шліка, що є прийнятним для відтворення зони блюмінгу.

Підвищення продуктивності для відтворення спекулярної складової складає в середньому 1,4 раза.

У розділі 3 запропоновано модифікацію моделі Кука-Торенса за рахунок використання нової формули для визначення параметра D , який використовується для розрахунку середньоквадратичного нахилу мікрограней. Аналіз показав, що використання параметра $D = \frac{1}{4 \cdot m^2} \cdot \left[\left(\frac{1}{8 \cdot m^2} - \frac{1}{4} \right) \cdot (\cos(\gamma) - 1) + 1 \right]^{16}$ замість

$D = \frac{e^{\frac{\operatorname{tg}^2(\gamma)}{m^2}}}{4 \cdot m^2 (\vec{H} \cdot \vec{N})^4}$ дозволило підвищити продуктивність його розрахунку в 4,34 рази.

Для моделі Варда час визначення інтенсивності кольору зменшено в 1,7 раза.

У роботі розроблено енергетично-коректну модель відбивної здатності поверхні, яка має такий вигляд $\frac{1.063n}{2\pi} \cdot \left(\frac{n}{16} (\cos \theta - 1) + 1\right)^{16}$.

Порівняно з вихідною ДФВЗ обчислювальна складеність зросла всього на одну мікрооперацію множення, однак при відтворенні кольорів обличчя дотримано закон збереження енергії, і, як наслідок, підвищено реалістичність.

Розроблено комп'ютерну програму для реконструкції 3D-моделей обличчя людини.

Програма посіла 2 місце на Міжнародному конкурсі «Золотий байт» у 2016 році в номінації програмних проєктів STARTUP CHALLENGE. На рис. 5 зображено етапи формування зображення обличчя людини.



Рисунок 5 – Етапи формування 3D-моделі голови людини

Для визначення коефіцієнта спекулярності n було розроблено відповідну програму. Доцільність розробки такої програми було обумовлено необхідністю оптимізації дистрибутивних функцій саме для відображення поверхонь обличчя людини.

Для визначення коефіцієнта спекулярності було виконано фотографування з використанням штучного освітлення і без нього. Для синхронізації роботи фотоапарата та фотоспалаха було використано інфрачервоний трансмітер.

Для визначення коефіцієнта n у систему завантажувалася об'єкт з текстурою, отриманою без штучного освітлення. Оскільки апріорно відомо положення джерела світла та його потужність, то виконувалось програмне імітування джерела світла з поступовим збільшенням коефіцієнта спекулярності. При цьому за $NMSE$ порівнювався об'єкт зі штучним освітленням з об'єктом, який освітлювався програмно. При досягненні $NMSE$ порогового значення візуальної наближеності процес порівняння завершувався.



Рисунок 6 – Площинні перетини голови

Розроблено на основі 3D-моделей програмні засоби для заміни механічних біомедичних приладів більш досконалими та точними. Зокрема, розроблено програми для площинних перетинів голови (рис. 6), вимірювання відстаней, порівняння виділених ділянок обличчя та визначення їх площ, оцінки симетричності

та інші.

Відповідно до теоретичних напрацювань було розроблено комп'ютерну систему формування зображень обличчя людини для планування операцій. Система (рис. 7) містить: блок фотометрії ФМ, адресний блок БА, блок формування векторів БФВ, блок розрахунку скалярних добутків БРСД, блок формування офсетних поверхонь БФОП, блок обробки текстур БОТ, блок формування інтенсивностей кольору БФІК. Для всіх складових блоків розроблено програмно-апаратні засоби, зокрема, на рис. 8 наведено структурну схему пристрою для визначення інтенсивностей спекулярної складової кольору. Цей блок входить до складу БФІК.

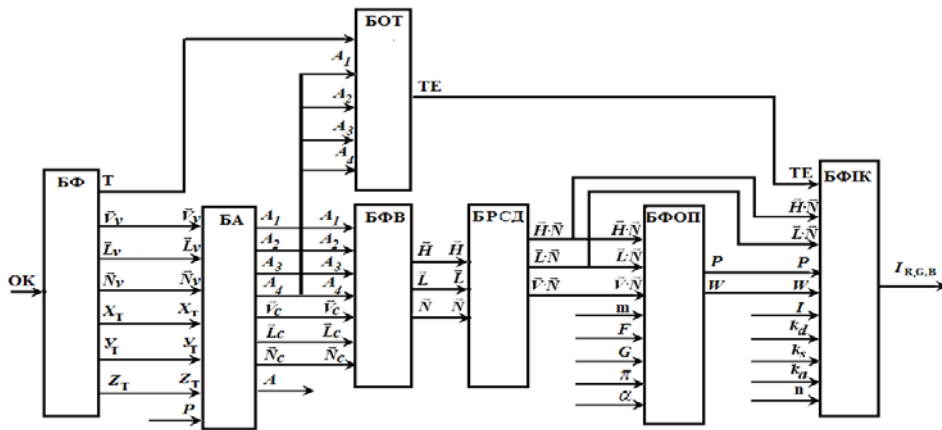


Рисунок 7 – Структурна схема формування 3D-зображень обличчя

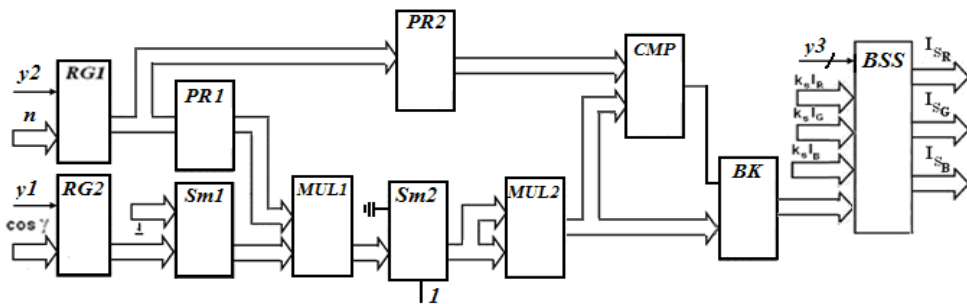


Рисунок 8 – Структурна схема пристрою для визначення інтенсивності спекулярної складової кольору

Пристрій містить: регістри $RG1 - RG5$, блоки постійної пам'яті $PR1, PR2$, суматори $Sm1, Sm2$, блоки множення $MUL1 - MUL5$, блок ключів BK , схему порівняння CMP . Особливість пристрою полягає у використанні для розрахунку простих, з апаратної точки зору, операцій.

За участі автора розроблено панорамний тривимірний сканер (рис. 9), який включає спеціальні камери та інтегровані проектори для отримання точної 3D-моделі обличчя людини. Розроблене програмне забезпечення 3D реконструює 3D-модель обличчя, використовуючи отримані складові з урахуванням кольорів і текстур.

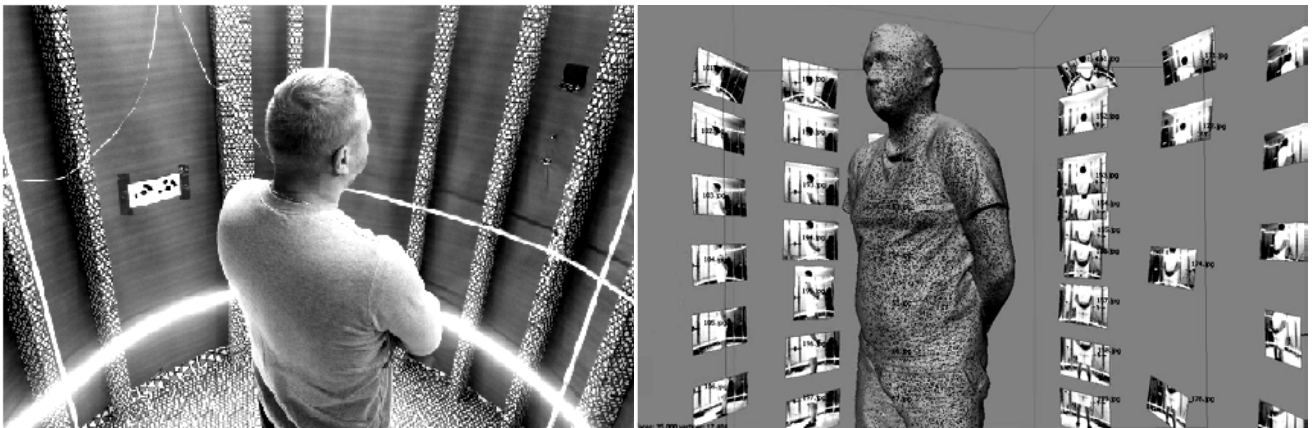


Рисунок 9 – Панорамний тривимірний сканер

Розроблені в роботі моделі, методи та засоби дозволяють підвищити ефективність проведення пластичних і реконструктивних операцій за рахунок високо-реалістичного, високопродуктивного відтворення обличчя людини.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено актуальну науково-прикладну задачу, що полягає в розробці моделей, методів і системи формування тривимірних зображень обличчя людини для пластичної і реконструктивної медицини та експрес-діагностування захворювань. У ході досліджень було отримано такі результати.

1. На основі проведеного аналітичного аналізу та оцінювання сучасного стану задачі обґрунтовано необхідність розробки методів, моделей і засобів формування тривимірних зображень обличчя людей для пластичної і реконструктивної медицини, а також діагностування захворювань.

2. Розроблено фізично-коректні дистрибутивні функції відбивної здатності поверхні, особливість яких полягає у дотриманні закону збереження енергії при формуванні зображень обличчя. Це дозволило підвищити достовірність визначення інтенсивностей кольорів при формуванні зображень обличчя.

3. Розроблено нові модифікації моделі Шліка відбивної здатності поверхні для формування зображення обличчя людини, які дозволили підвищити реалістичність за рахунок більш точного визначення спекулярної складової кольору.

4. Подальшого розвитку отримала косинусна модель відбивної здатності поверхні обличчя людини, у якій, на відміну від класичної, використано піднесення до меншого степеня, що дозволило підвищити продуктивність формування зображення обличчя при високій точності відтворення як епіцентра, так і блюмінгу відблиску. Порівняно з ДФВЗ Бліна досягається підвищення продуктивності в понад 1,5 рази.

5. Розроблено адаптивний метод зафарбовування обличчя людини, особливість якого полягає у адаптивному використанні поліномів другого та третього степенів для визначення інтенсивностей кольору на різних ділянках поверхні зображення обличчя. Експериментальні дослідження показали, що досягнуто $NMSE \leq 0,0001$ відносно еталона, тобто, сформовані зображення візуально не відрізняються.

6. Подальшого розвитку отримав метод реконструкції людського обличчя за даними стереопари, у якому, на відмінну від існуючого, використано аналітичні функції збурення, а для пошуку функцій, що описують об'єкт, використовується зворотний рекурсивний поділ об'єктного простору. Новий метод дозволив зменшити обсяг необхідної пам'яті для зберігання геометричної моделі, спростити її масштабування та використати для візуалізації метод трасування променів.

7. Отримано аналітичні залежності коефіцієнта спекулярності шкіри обличчя людини для різних вікових груп, що дозволило підвищити реалістичність відтворення кольорів.

8. Для відтворення офсетних властивостей шкіри запропоновані нові модифікації моделей Кука-Торенса і Варда. Порівняно з аналогами для розрахунку використовується тільки одна функція і менші степені поліномів. Це дало можливість підвищити продуктивність формування зображень обличчя людини.

9. Запропоновано використовувати морфінг тривимірних зображень обличчя для

аналізу вікових патологій та проведення пластичних операцій з метою визначення оптимальної форми ділянок обличчя. Розроблено метод аналізу відповідності вікових змін розвитку дитини встановленим нормам.

10. Розроблено програмні модулі основних процедур для побудови біомедичних приладів для аналізу обличчя (голови) на основі тривимірних моделей. Сформульовані вимоги до побудови на основі 3D-моделей програмних аналогів біомедичних приладів для аналізу обличчя та голови.

11. Створено діючі засоби та система на їх основі для формування тривимірних зображень облич людей для пластичної та реконструктивної медицини.

12. Розроблені програми для формування зображень облич захищено 6-ма свідоцтвами на реєстрацію авторських прав на комп'ютерні програми в Державному департаменті інтелектуальної власності України, а структури апаратних засобів – 2-ма патентами України.

Розроблено програмні засоби для моделювання та тестування методів формування 3D-зображень облич людей, які дозволяють отримати порівнянні оцінки за точністю та продуктивністю.

13. Впровадження результатів досліджень підтверджуються відповідними актами, вони використовуються в науково-дослідному інституті реабілітації осіб з інвалідністю для підвищення ефективності проведення реконструктивних операцій, оптимального підбору імплантатів, проведення експрес-діагностики за морфологічними ознаками обличчя; Українській військово-медичній академії для підвищення ефективності проведення пластичних і реконструктивних операцій; ПМВП «Фотоніка Плюс» для підвищення реалістичності та продуктивності формування тривимірних зображень обличчя людини; у ТОВ «ЗД Дженерейшн Юей» для підвищення реалістичності формування тривимірних зображень облич; на кафедрі біомедичної інженерії Вінницького національного технічного університету для використання у навчальному процесі.

14. Отримані характеристики та параметри розроблених засобів підтверджують коректність наукових положень й адекватність запропонованих моделей та методів.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ,

- [1] S. O. Romanyuk, “Approximation of bidirectional reflectance distribution function for highly efficient shading”, in Monography *Information Technology in Medical Diagnostics*, W. Wójcik and A. Smolarz, London: England: CRC Press, 2017, chapter 2, pp. 27-49. doi:10.1201/9781315098050.
- [2] S. O. Romanyuk, O. N. Romanyuk, S. V. Pavlov, O. V. Melnyk, A. Smolarz, and, M Bazarova, “Method of anti-aliasing with the use of the new pixel model”, *Proc. SPIE 9816, Optical Fibers and Their Applications*, 2015. doi: 10.1117/12.2229013.
- [3] S. O. Romanyuk., S. V. Pavlov, and O. V. Melnyk, “New method to control color intensity for antialiasing”, in *International Siberian Conference on Control and Communications SIBCON*, 2015. doi: 10.1109/sibcon.2015.7147194.
- [4] S. O. Romanyuk, O. G. Avrunin, M. Y. Tymkovich, S .P. Moskovko, A. Kotyra, and S, Smailova, “Using a priori data for segmentation anatomical structures of the brain”, *Przegląd Elektrotechniczny*, Vol. 93, Issue 5, pp. 102-105, 2017.

doi: 10.15199/48.2017.05.20.

- [5] S. O. Romanyuk, S. I. Vyatkin, O. N. Romanyuk, and A. Smolarz, “Texturing method of the full pixel dynamic range”, *Proc. SPIE*, Vol. 10808, 2018. doi: 10.1117/12.2500789.
- [6] S. O. Romanyuk, et al., “Using lights in a volume-oriented rendering”, *Proc. SPIE*. Vol. 10445. 2017. doi: 10.1117/12.2280982.
- [7] S. O. Romanyuk, O. G. Avrunin, D.V. Kukharenko, A. Kalizhanova, A. Toygozhinova, and K. Gromaszek, “Computer system for forecasting surgery on the eye muscles”, *Proc. SPIE*. Vol. 9816, 2015. doi: 10.1117/12.2229033.
- Роботи [1]–[7] входять до наукометричної бази Scopus.*
- [8] S. A. Romanyuk, S. I. Vyatkin, and S.V. Pavlov, “3D Face Recognition Using Quadrics”, *Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка*, № 1(22), с. 142–145, 2016.
- [9] С. О. Романюк, С. В. Павлов, Д. В. Вовкотруб, та Л. В. Авраменко, “Аналіз методів попереднього оброблення біомедичних зображень”, *Наукові праці ДонНТУ. Серія «Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка»* № 2 (21), с. 18–23, 2015.
- [10] С. А. Романюк, С. И. Вяткин, и М. П. Поддубецкая, “Трёхмерная реконструкция человеческого лица по данным стереопары с применением аналитических функций возмущения”, *Наукові праці ДонНТУ. Серія «Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка»* № 1 (17), с. 53–56, 2013.
- [11] С. О. Романюк, С. В. Павлов, та Р. Ю. Довгалоук, “Підвищення фізичної коректності дистрибутивної функції відбивної здатності поверхні”, *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*, № 4, с. 201–204, 2014.
- [12] С. А. Романюк, С. И. Вяткин, та С. В. Павлов, “Оптимизация методов визуализации объёмных данных для медицинских приложений”, *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*, №3, с. 150–152, 2015.
- [13] С. О. Романюк, та О. В. Романюк, “Метод імітації нерівностей на основі збурення дистрибутивної функції відбивної здатності поверхні”, *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*, № 2, с.129–134, 2014.
- [14] С. А. Романюк, С. И. Вяткин, и С. В. Павлов. “Рейкастинг объёмных данных и функционально заданных поверхностей для медицинских приложений с применением графических ускорителей”, *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*, т. 29(68), № 4, с. 120–126, 2018.
- [15] С. О. Романюк, С. В. Павлов, та М. Л. Нечипорук, “Адаптивне визначення дифузної та спекулярної складових кольору для рендерингу зображень обличчя при плануванні пластичних операцій”, *Scientific Journal «Science Rise*, № 8 (49), с. 24–28, 2018.
- [16] С. О. Романюк, О. В. Романюк, та Д. Л. Благодир, “Визначення скалярного добутку двох векторів, заданих у полярних координатах, для задач комп’ютерної графіки”, *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*, № 2, с.128–131, 2013.
- [17] С. О. Романюк, С. В. Павлов, О. Н. Романюк, та О. В. Мельник, “Модель для відтворення спекулярної складової кольору в засобах комп’ютерної графі-

- ки”, *Інформаційні технології та комп’ютерна інженерія*, № 3, с. 50–57, 2015.
- [18] С. О. Романюк, С. В. Павлов, и С. И. Вяткин. “Многоуровневая объёмная визуализация для медицинских приложений”, *Наукові праці ДонНТУ. Серія: Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка*, № 1, с. 55–62, 2018.
- [19] С. О. Романюк, С. В. Павлов та І. В. Абрамчук, “Модель для відтворення спекулярної складової кольору при формуванні високореалістичних біомедичних зображень”, *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*, № 3, с. 161–167, 2016.
- [20] С. О. Романюк, О. О. Дудник, Л. А. Савицька, та О. В. Романюк, “Анізотропна фільтрація з використанням вагових функцій”, *Вісник Херсонського національного технічного університету*, № 3, с. 459–462, 2015.
- [21] S. A. Romanyuk, S. I. Vyatkin, and Pavlov S. V. “Face identification algorithms and its using”, *Modern engineering and innovative technologies. Technical sciences. International periodic scientific journal*. Part 1. Issue 5. 2018. pp. 111–115.
- [22] С. О. Романюк, та М. Д. Обідник, “Метод розпаралелення рендерингу та засоби для його реалізації”, *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*, № 3, с. 112–116, 2013.
- [23] С. А. Романюк, С. И. Вяткин, та П. А. Величко, “Метод итерационного приближения полигональных моделей неявными функциями”, *Вісник Хмельницького національного університету*, № 1(209), с. 109–112, 2014.
- [24] С. О. Романюк, О. Н. Романюк, та М. П. Піддубецька, “Аналіз методів анізотропної фільтрації текстур”, *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*, № 2, с. 123–128, 2013.
- [25] С. О. Романюк, “Особенности рендерингу зображення обличчя людини для проведення пластичної операції”, на *XIX Міжнародн. конф. з математичного моделювання*, Херсон, 2018, с. 84–85.
- [26] С. О. Романюк, “Діагностичні ознаки для морфологічного аналізу зображень обличчя людини для проведення пластичних і реконструктивних операцій”, на *Міжнарод. наук.-техн. конф. Комп’ютерна графіка та розпізнавання зображень*, Вінниця, 2018, с. 211–215.
- [27] Романюк С. О. Підвищення реалістичності відтворення зображень людських облич для задач пластичної хірургії, на *Міжнарод. наук.-практ. конференції Електронні інформаційні ресурси: створення, використання, доступ*, м. Вінниця, 2017, с. 210–213.
- [28] С. О. Романюк, “Основні етапи формування зображення обличчя людини для проведення пластичних операцій”, на *XVIII Міжнарод. конф. з математичного моделювання*, Херсон, 2017, с. 84–85.
- [29] С. О. Романюк, “Комп’ютерна програма для реконструкції 3D-моделей облич людей”, на *Міжнарод. наук.-практ. конференції «Електронні інформаційні ресурси: створення, використання, доступ»*, м. Вінниця, 2018, с. 227–233.
- [30] С. О. Романюк, та М. Л. Нечипорук, “Фотограмметричні комп’ютерні засоби отримання 3D-моделей зображень облич людини”, на *XI Міжнарод. наук.-практ. конф. Інформаційні технології і автоматизація*, Одеса, 2018, с. 10–13.
- [31] С. А. Романюк, С. И. Вяткин, та С. В. Павлов, “Метод объёмной визуализации для медицинских приложений”, на *наук.-практ. конф. Информатика, математика, автоматика*, Суми, 2016, с. 210–2016.

- [32] С. О. Романюк, Ю. О. Безсмертний, та Г. В. Безсмертна, “Тривимірне моделювання для планування та проведення пластичних операцій на обличчі людини”, на VII Міжнародн конф. *Моделювання та комп’ютерна графіка*, Покровськ, 2017, с. 193–198.
- [33] С. О. Романюк, О. Н. Романюк, та В. М. Чорний “Використання 3D-принтерів у медичній практиці”, in *XII Międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji Naukowa przestrzen Europy-2016*, Przemysł, 2016, pp. 28–33.
- [34] С. О. Романюк, та С. В. Павлов, “Аналіз основних класів алгоритмів рендерингу”, на *Міжнарод. наук.-прак. конф. Молодь в технічних науках: дослідження, проблеми, перспективи (МТН-2016)*, 2016, с. 75–77.
- [35] С. О. Романюк, та М. П. Піддубецька, “Модифікація ДФВЗ Шліка”, на *Міжнарод. наук.-практ. конференції Електронні інформаційні ресурси: створення, використання, доступ*, Вінниця, 2014, с. 3–7.
- [36] С. А. Романюк и, С. И. Вяткин. “Распознавание человеческого лица с использованием трёхмерных слепков на основе скалярных возмущений”, на *Міжнарод. наук.-техн. конф. Моделювання та комп’ютерна графіка*, Донецьк, 2013, с. 80–82.
- [37] С. О. Романюк, О. Н. Романюк, та Ю. Л. Ляшенко, “Пристрій для визначення інтенсивності спекулярної складової кольору”, *МПК G06T 15/00, № 60551*, 25.06.2011.
- [38] С. О. Романюк, С. В. Павлов, та М. П. Піддубецька, “Пристрій для визначення інтенсивності спекулярної складової кольору”, *МПК G06T 15/00, № 92080*, 25.07.2014
- [39] С. О. Романюк, О. В. Даньковська, та О. Н. Романюк, “Комп’ютерна програма для визначення спекулярної складової кольору”, Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 51700, *К.: Державний департамент інтелектуальної власності України*, 11.10.13.
- [40] С. О. Романюк, та М. П. Піддубецька, Комп’ютерна програма “Відтворення спекулярної складової кольору”, Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 54954, *К.: Державний департамент інтелектуальної власності України*, 23.05.14.
- [41] С. О. Романюк, С. В. Павлов, та П. О. Величко, Комп’ютерна програма “Розрахунок спекулярної складової кольору з використанням нової моделі освітлення”, Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 65282, *К.: Державний департамент інтелектуальної власності України*, 11.05.16.
- [42] С. О. Романюк, С. В. Павлов, та О. В. Поліщук, Комп’ютерна програма “Рендеринг тривимірних медичних зображень”, Свідоцтво на реєстрацію авторського права на твір № 65283, *К.: Державний департамент інтелектуальної власності України*, 11.05.16.
- [43] С. О. Романюк, І. В. Богач, та П. О. Величко, Комп’ютерна програма “Розрахунок спекулярної складової кольору для медичних зображень з використанням фізично-коректної дистрибутивної функції відбивної здатності”, Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 68877, *К.: Державний департамент інтелектуальної власності України*, 05.12.16.
- [44] С. О. Романюк, І. В. Богач, та О. В. Поліщук, Комп’ютерна програма “Зафарбовування поверхонь тривимірних об’єктів у медичних системах візуаліза-

ції”, Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 68878, К.: Державний департамент інтелектуальної власності України, 05.12.16.

АНОТАЦІЯ

Романюк С. О. Методи, моделі та система формування тривимірних зображень облич людей для реконструктивної та пластичної медицини. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.17 «Біологічні та медичні прилади і системи». – Вінницький національний технічний університет. – Вінниця, 2019.

У дисертаційній роботі розвинуто теорію побудови медичних приладів і систем за рахунок розробки методів, моделей та засобів формування тривимірних зображень облич людини для пластичної та реконструктивної медицини.

Розроблено фізично-коректні дистрибутивні функції відбивної здатності поверхні, особливість яких полягає у дотриманні закону збереження енергії при формуванні зображень облич. Це дозволило підвищити достовірність визначення інтенсивностей кольорів при формуванні зображень облич.

Розроблено нові модифікації моделі Шліка відбивної здатності поверхні для формування зображення обличчя людини, які дозволили підвищити реалістичність за рахунок більш точного визначення спекулярної складової кольору.

Подальшого розвитку отримала косинусна модель відбивної здатності поверхні обличчя людини, у якій, на відміну від класичної, використано піднесення дистрибутивної функції до меншого степеня, що дозволило підвищити продуктивність формування зображення обличчя при високій точності відтворення як епіцентра, так і блюмінгу відблиску.

Подальшого розвитку отримав метод реконструкції людського обличчя за даними стереопари, у якому, на відміну від існуючого, використано аналітичні функції збурення, що дозволило зменшити обсяг необхідної пам'яті для зберігання геометричної моделі, спростити її масштабування та використати для візуалізації метод трасування променів.

Розроблено адаптивний метод зафарбовування обличчя людини, особливість якого полягає у адаптивному використанні для визначення інтенсивностей кольору на різних ділянках поверхні зображення обличчя поліномів другого та третього степенів. Це дозволило підвищити реалістичність формування 3D-зображень облич людей у високопродуктивних системах.

Отримано аналітичні залежності коефіцієнта спекулярності шкіри обличчя людини для різних вікових груп, що дозволило підвищити реалістичність відтворення кольорів і змінювати деталізації полігональної мережі моделі в проблемних зонах.

Для відтворення офсетних властивостей шкіри запропоновані нові модифікації моделей Кука-Торенса і Варда. Порівняно з аналогами для розрахунку використовується тільки одна функція і менші степені поліномів. Це дало можливість підвищити продуктивність формування зображень облич людини.

Запропоновано використовувати морфінг 3D-зображень для планування пластичних операцій з метою визначення оптимальної форми вибраних ділянок

обличчя, а також встановлення відповідності вікових змін розвитку людини встановленим нормам.

На основі запропонованих методів і моделей розроблено засоби та систему формування 3D-зображення облич для пластичної та реконструктивної медицини.

Ключові слова: 3D-зображення облич, пластична та реконструктивна медицина, відбивна здатність шкіри, морфінг, експрес-діагностування, морфологічний аналіз обличчя, медичні прилади і системи.

АННОТАЦІЯ

Романюк С. А. Методы, модели и система формирования трёхмерных изображений лиц людей для реконструктивной и пластической медицины. – Квалификационная научная работа на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.17 «Биологические и медицинские приборы и системы». – Винницкий национальный технический университет, Винница, 2019.

В диссертационной работе развита теория построения медицинских приборов и систем за счёт разработки методов, моделей и средств формирования трёхмерных изображений лица человека для пластической и реконструктивной медицины.

Разработаны физически-корректные дистрибутивные функции отражательной способности поверхности, особенность которых заключается в соблюдении закона сохранения энергии при формировании изображений лиц. Это позволило повысить достоверность определения интенсивностей цветов при формировании изображений лиц.

Разработаны новые модификации модели Шлика отражательной способности поверхности для формирования изображения лица человека, которые позволили повысить реалистичность за счёт более точного определения спекулярной составляющей цвета.

Дальнейшее развитие получила косинусная модель отражательной способности поверхности лица человека, в которой, в отличие от классической, использована меньшая степень дистрибутивной функции, что позволило повысить продуктивности формирование изображения лица при высокой точности воспроизведения как эпицентра, так и блюминга отблеска.

Дальнейшее развитие получил метод реконструкции человеческого лица по данным стереопары, в котором, в отличие от существующего, использованы аналитические функции возмущения, что позволило уменьшить объём требуемой памяти для хранения геометрической модели, упростить её масштабирование и использовать для визуализации метод трассировки лучей.

Разработан адаптивный метод закраски лица человека, особенность которого заключается в адаптивном использовании полиномов второго и третьего степеней для определения интенсивностей цвета на различных участках изображения лица. Это позволило повысить реалистичность формирования 3D-изображений лиц людей в высокопроизводительных системах.

Получены аналитические зависимости коэффициента спекулярности кожи лица человека для различных возрастных групп, что позволило повысить реалистичность

тичность воспроизведения цветов и менять детализации полигональной сети модели в проблемных зонах.

Для воспроизведения офсетных свойств кожи предложены новые модификации моделей Кука-Торренса и Варда. По сравнению с аналогами, для расчёта используется только одна функция и меньшие степени полиномов. Это дало возможность повысить производительность формирования изображений лиц человека.

Предложено использовать морфинг 3D-изображений для планирования пластических операций с целью определения оптимальной формы выбранных участков лица, а также анализа соответствия возрастных изменений развития человека установленным нормам.

На основе предложенных методов и моделей разработаны средства и система формирования 3D-изображения лиц для пластической и реконструктивной медицины.

Ключевые слова: 3D-изображения лиц, пластическая и реконструктивная медицина, отражательная способность кожи, морфинг, экспресс-диагностирование, морфологический анализ лица, медицинские приборы и системы.

ABSTRACT

Romanyuk S. O. Methods, models and system of three-dimensional people faces' images formation for reconstructive and plastic medicine.

– Qualification scientific paper as a manuscript.

Thesis for PhD degree in technical sciences on specialty 05.11.17 “Biological and medical devices and systems”. – Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, 2019.

Facial injuries are the most common injuries with a constant tendency to grow. This leads to an increase in the role of plastic and reconstructive medicine.

Given the persistence of the dynamics of traumatism, the issues of improving diagnosis, improving the efficiency of plastic and reconstructive operations are urgent. Increasing the level of implementation and planning such operations is associated with the use of three-dimensional modeling.

Three-dimensional models of human face are the most realistic, reflect the anatomical structure, accurately convey the relief and color features of the object, subject to modification to change the appearance. The 3D face model is a multifactorial source of patient information, allowing you to significantly reduce the amount of user interaction required compared to the existing methods.

In medical practice, a three-dimensional model of the face image is distinctive from other applications because it is the object of study for diagnosis, and therefore must be accurate and allow for different metrics. In this case, the combination of anthropometric data with other methods of research allows to clarify the diagnosis to a great extent. Today, many diseases can be diagnosed on the basis of the analysis of the ratios of different areas of the face.

When shaping colors for different areas of the face, it is important to realistically reflect the diffuse, specular components of the intensity of the color. It is necessary to take into account the dependence of the reflection coefficients on age-related changes in the person, offset structure of the face surface.

An important requirement for 3D rendering techniques is high performance, which should be sufficient to support dynamic and interactive modes.

Therefore, the development of high-performance methods, models and tools for forming three-dimensional images of people's faces for planning and conducting plastic and reconstructive operations is an urgent task.

The thesis develop the theory for the construction of medical devices and systems through the development of methods, models and means of forming three-dimensional images of human faces for plastic and reconstructive medicine.

There had been developed physically correct distributive functions of the surface reflectivity, the peculiarity of which is the observance of the law of conservation of energy in the formation of face images. This allowed to increase an accuracy of determining the intensities of colors in the formation of face images.

New modifications of the Schlick model of surface reflectivity for forming the image of a person's face have been developed, which made it possible to increase realism by more accurate determining the specular component of color.

Further development was envisaged for a cosine model of reflectivity of the surface of a person's face, in which, unlike the classical, elevation was used to a lesser degree, which allowed to increase the productivity of forming the image of the face with high accuracy of reproduction of both the epicenter and bluming of flare.

An adaptive method of coloring a person's face has been developed, the peculiarity of which is an adaptive use for determining the intensities of color in different parts of the surface of the face image of polynomials of the second and third degrees. This made it more realistic to create 3D images of people's faces in high-performance systems.

There had been suggested the method of reconstruction of the human face according to the data of the stereo-pair, in which, unlike the existing ones, analytical perturbation functions were used, which allowed to reduce the amount of memory required to store the geometric model, to simplify its scaling and to use the Ray tracing method for visualization.

Analytical dependences of the speculative coefficient of the skin of a person's face for different age groups were obtained, which allowed to increase the realistic color reproduction and to change the details of the polygonal network of the model in the problem areas.

To reproduce the offset properties of the skin, new modifications of the Cook-Torrence and Ward models had been suggested. Compared to analogues, only one function and smaller polynomials are used for the calculation. This made it possible to improve the imaging performance of human faces.

It is suggested to use the morphing of 3D images for planning the plastic operations in order to determine the optimal shape of the selected areas of the face, as well as to establish the age-related changes in human development to the established standards.

On the basis of the suggested methods and models there had been suggested the means and systems for the formation of 3D-image of faces for plastic and reconstructive medicine.

Keywords: 3D face images, plastic and reconstructive medical grade, skin reflectance, morphing, express diagnostics, morphological analysis of the face, medical devices and systems.

Підписано до друку 18.09.2019 р. Формат 21x29.7 1/4.
Наклад 100 прим. Зам. № 2019-125.
Віддруковано в інформаційному редакційно-видавничому центрі
Вінницького національного технічного університету.
м. Вінниця, вул. Хмельницьке шосе, 95. Тел.: 65-18-06
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК №3516 від 01.07.2009 р.