

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет комп'ютерної інженерії та управління
(повна назва)

Кафедра електронних обчислювальних машин
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Метод нанесення цифрових водяних знаків
на тривимірні об'єкти з використанням
нечіткої логіки
(тема)

Виконав:

студент II курсу, групи СПМ-22-5
Галицька О. О.
(прізвище, ініціали)

Спеціальність 123 «Комп'ютерна інженерія»
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-наукова
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Системне програмування
(повна назва освітньої програми)

Керівник: доц. Мартовицький В.О.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри ЕОМ

Коваленко А.А.
(прізвище, ініціали)

2024 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет _____ комп'ютерної інженерії та управління _____

Кафедра _____ електронних обчислювальних машин _____

Рівень вищої освіти _____ другий (магістерський) _____

Спеціальність _____ 123 «Комп'ютерна інженерія» _____
(код і повна назва)

Тип програми _____ освітньо-наукова _____
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма _____ Системне програмування _____
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
(підпис)

“ _____ ” _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студенту _____ Галицькій Олександрі Олегівні _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Метод нанесення цифрових водяних знаків на тривимірні об'єкти
з використанням нечіткої логіки

затверджена наказом по університету від “ 01 ” квітня 2024 р. № 257 Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії _____ 15 червня 2024 р.

3. Вхідні дані до роботи Набір тривимірних об'єктів

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати у роботі _____

1) Огляд предметної області _____

2) Огляд методів стеганографії для тривимірних моделей _____

3) Розробка запропонованого методу _____

4) Проведення експерименту _____

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів) 19 слайдів

6. Консультанти розділів роботи (заповнюється за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1)

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз сучасних досліджень в предметній області	02.04.24-08.04.24	
2	Огляд підходів до ЦВЗ	09.04.24-16.04.24	
3	Розробка методу	17.04.24-22.04.24	
4	Проведення експериментів	23.04.24-06.05.24	
5	Оформлення матеріалів кваліфікаційної роботи	07.05.24-23.05.24	
6	Подання кваліфікаційної роботи керівникові та її попередній захист	24.05.24-03.06.24	
7	Подання кваліфікаційної роботи на рецензування	04.06.24-07.06.24	

Дата видачі завдання 01 квітня 2024 р.

Студент _____
(підпис)

Керівник роботи _____
(підпис)

доц. Мартовицький В.О.
(посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи: 61 с., 23 рис., 2 табл., 1 дод., 20 джерел.

ТРИВИМІРНІ ОБ'ЄКТИ, ЦИФРОВІ ВОДЯНІ ЗНАКИ, НЕЧІТКА ЛОГІКА, ЗАХИСТ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ.

Метою цієї кваліфікаційної роботи є розробка методу нанесення цифрових водяних знаків на тривимірні об'єкти з використанням нечіткої логіки, що забезпечить високу стійкість водяних знаків до атак і мінімальний вплив на структуру та функціональність об'єктів.

Завдання роботи:

- огляд сучасних методів нанесення цифрових водяних знаків на 3D-об'єкти;
- визначення переваг та недоліків цих методів;
- вивчення основ нечіткої логіки та її застосувань в обробці тривимірних даних;
- аналіз можливостей використання нечіткої логіки для адаптації методів нанесення водяних знаків;
- створення алгоритму нанесення цифрових водяних знаків на 3D-об'єкти з використанням нечіткої логіки;
- забезпечення адаптивності алгоритму до різних типів тривимірних об'єктів;
- реалізація розробленого алгоритму в програмному середовищі;
- проведення тестування алгоритму на різних типах 3D-об'єктів для оцінки його ефективності;
- аналіз впливу нанесених водяних знаків на структуру та функціональність тривимірних об'єктів;

ABSTRACT

Master's thesis: 61 pages, 23 figures, 2 tables, 1 appendices, 20 sources.

THREE-DIMENSIONAL OBJECTS, DIGITAL WATERMARKS, FUZZY LOGIC, INTELLECTUAL PROPERTY PROTECTION.

The major goal of this thesis is to develop a method for applying digital watermarks to three-dimensional objects using fuzzy logic, which will ensure high resistance of watermarks to attacks and minimal impact on the structure and functionality of objects.

Objectives:

- review of modern methods of applying digital watermarks to 3D objects;
- Identify the advantages and disadvantages of these methods;
- studying the basics of fuzzy logic and its applications in three-dimensional data processing;
- analysing the possibilities of using fuzzy logic to adapt watermarking methods;
- creating an algorithm for applying digital watermarks to 3D objects using fuzzy logic;
- ensuring the adaptability of the algorithm to different types of three-dimensional objects;
- implementation of the developed algorithm in the software environment;
- testing the algorithm on different types of 3D objects to evaluate its effectiveness;
- analysing the impact of watermarks on the structure and functionality of 3D objects;

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ	7
ВСТУП	8
1 ОГЛЯД ПІДХОДІВ ДО ЗАХИСТУ ТРИВИМІРНИХ МОДЕЛЕЙ ВІД НЕСАНКЦІОНОВАНОГО РОЗПОВСЮДЖЕННЯ	10
1.1 Загальний принцип нанесення цифрових водяних знаків на 3D- моделі	12
1.2 Перше покоління методів нанесення цифрових водяних знаків.....	17
1.3 Друге покоління методів нанесення цифрових водяних знаків	18
1.4 Третє покоління методів нанесення цифрових водяних знаків	20
2 ЗАГАЛЬНИЙ ПІДХІД ДО НАНЕСЕННЯ ЦИФРОВИХ ВОДЯНИХ ЗНАКІВ НА ТРИВИМІРНУ МОДЕЛЬ.....	23
2.1 Основні підходи	23
2.2 Вставка водяного знаку	25
3 МЕТОД НАНЕСЕННЯ ЦИФРОВИХ ВОДЯНИХ ЗНАКІВ НА ТРИВИМІРНІ ОБ'ЄКТИ З ВИКОРИСТАННЯМ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ.....	34
3.1 Опис алгоритму	34
3.2 Проведення експериментів	41
3.3 Оцінка ефективності	43
ВИСНОВКИ.....	47
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	48
ДОДАТОК А Графічний матеріал кваліфікаційної роботи.....	51

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ
І ТЕРМІНІВ

ЦВЗ – цифровий водяний знак

3D – тривимірний простір або об'єкт

CW – цифровий водяний знак

FL – нечітка логіка (англ., Fuzzy Logic)

PSNR – відношення сигналу до шуму пікселів (англ., Peak Signal-to-Noise Ratio)

SSIM – індекс структурної подібності (англ., Structural Similarity Index)

ВСТУП

У сучасному світі, де технології тривимірного моделювання та друку стрімко розвиваються, питання захисту тривимірних об'єктів набуває особливої важливості. Використання цифрових водяних знаків для захисту авторських прав на 3D-об'єкти є перспективним напрямком, що забезпечує можливість ідентифікації та автентифікації об'єктів. Однією з проблем при нанесенні водяних знаків на тривимірні об'єкти є необхідність збереження їх структури та функціональності, а також забезпечення стійкості водяних знаків до різних видів атак. Використання нечіткої логіки в цьому контексті може надати додаткові можливості для адаптації методів нанесення водяних знаків до складних умов та специфічних вимог.

Метою цієї кваліфікаційної роботи є розробка методу нанесення цифрових водяних знаків на тривимірні об'єкти з використанням нечіткої логіки, що забезпечить високу стійкість водяних знаків до атак і мінімальний вплив на структуру та функціональність об'єктів.

Завдання роботи:

- огляд сучасних методів нанесення цифрових водяних знаків на 3D-об'єкти;
- визначення переваг та недоліків цих методів;
- вивчення основ нечіткої логіки та її застосувань в обробці тривимірних даних;
- аналіз можливостей використання нечіткої логіки для адаптації методів нанесення водяних знаків;
- створення алгоритму нанесення цифрових водяних знаків на 3D-об'єкти з використанням нечіткої логіки;
- забезпечення адаптивності алгоритму до різних типів тривимірних об'єктів;
- реалізація розробленого алгоритму в програмному середовищі;

- проведення тестування алгоритму на різних типах 3D-об'єктів для оцінки його ефективності;
- аналіз впливу нанесених водяних знаків на структуру та функціональність тривимірних об'єктів;
- оцінка стійкості водяних знаків до різних видів атак.

Розроблений метод може бути використаний для захисту авторських прав у різних галузях, включаючи 3D-друк, комп'ютерну графіку, архітектуру та дизайн, що сприятиме розвитку безпечного використання тривимірних технологій.

Таким чином, дана кваліфікаційна робота спрямована на вирішення актуальних проблем захисту тривимірних об'єктів за допомогою новітніх підходів, що забезпечує її значущість як в науковому, так і в практичному аспектах.

1 ОГЛЯД ПІДХОДІВ ДО ЗАХИСТУ ТРИВИМІРНИХ МОДЕЛЕЙ ВІД НЕСАНКЦІОНОВАНОГО РОЗПОВСЮДЖЕННЯ

Тривимірні графічні моделі знаходять широке застосування в кіно, архітектурі, іграх, віртуальній реальності, автоматизованому проектуванні (САПР), симуляції органів у медицині, військовій справі та біоінформатиці - і це лише деякі зі безлічі сфер застосування. З появою 3D-телевізорів та доступних 3D-відеокарт для настільних комп'ютерів, 3D-моделі стають ще більш розповсюдженими. А з перспективою використання 3D-принтерів у побуті, це лише питання часу, коли ринок створення цифрового 3D-контенту перетвориться на багатомільярдну індустрію. Існують веб-сайти [1, 2], які дозволяють художникам завантажувати свої роботи і продавати ці 3D-моделі. Існують пошукову систему [3] для пошуку 3D-моделей. Існує низка інструментів для створення таких 3D-моделей, зокрема [4], [5] та [6]. Однак проектування та створення високоякісних 3D-графічних моделей вимагає значних навичок та використання спеціалізованого програмного забезпечення та/або обладнання, наприклад, лазерних сканерів. Зважаючи на високий попит і популярність 3D-моделей, а також враховуючи вартість, час і зусилля, необхідні для створення таких моделей, виникає загроза широкого розповсюдження незаконного копіювання 3D-моделей. Водяні знаки - це метод, який запобігає нелегальному копіюванню шляхом вставки прихованого повідомлення в 3D-модель.

Методи управління цифровими правами (DRM), засновані на технологіях шифрування, в минулому використовувалися для запобігання копіюванню цифрових мультимедійних матеріалів, які потрібно було розшифрувати і розблокувати протягом декількох місяців, якщо не тижнів або днів. Алгоритми шифрування не залежать від формату мультимедіа, чи то аудіо, відео, пісні з альбомів, фільми, електронні книги або 3D-моделі. Численні копії 3D-моделі Шрека (з фільму "Шрек") можна

знайти в Інтернеті. 3D-модель Голлума з фільму "Володар пернів" також можна знайти в Інтернеті. Голлівуд щорічно втрачає мільйони доларів через піратські фільми, які іноді розповсюджуються ще до того, як вони вийшли в кінотеатрах. Запобігти копіюванню мультимедійних матеріалів не лише важко, але й важко відстежити піратів або походження порушення в ланцюжку дистрибуції. Незважаючи на суворе законодавство навіть в США, яке було прийнято Законом про захист авторських прав у цифрову епоху (DMCA), та судові позови Американської асоціації звукозаписної індустрії (RIAA), незаконне копіювання мультимедійних матеріалів продовжується й досі. Системи DRM намагаються забезпечити антипіратські рамки, які обмежують використання контенту його законним користувачем. Провал DRM, що базується на шифруванні, можна підкреслити тим, що Apple відмовилася від свого FairPlay DRM в iTunes у січні 2009 року [7].

Водяні знаки – це технологія, яка вставляє повідомлення або код у цифровий контент. Ініціатива із захисту цифрової музики (Secure Digital Music Initiative, SDMI), консорціум компаній музичної індустрії, у 2000 році провела змагання, щоб перевірити надійність їхніх технологій нанесення водяних знаків. Едвард Фелтон (Edward Felton) та його команда з Принстонського та Райсського університетів [8] перемогли всі чотири алгоритми водяних знаків, тим самим довівши, що самі по собі водяні знаки є неефективними. Однак, з 2000 року було проведено значну кількість важливих досліджень. У 2008 році Fox Studios почала використовувати систему водяних знаків на вимогу для автоматичного і безперешкодного вбудовування непомітної інформації в кожен кадр відеоконтенту з метою захисту від піратства. Хоча методи шифрування і водяних знаків, коли вони використовуються окремо, виявилися неефективними, коли вони використовуються разом в рамках DRM, вони доповнюють один одного і можуть стати потужним підходом для виявлення незаконного копіювання. Наприклад, фільм "Люди Ікс: Росомаха" у квітні 2009 року незаконно розповсюджувався з видимими водяними знаками "Rising Sun Pictures" у

пiрингових мережах (P2P), i врештi-решт було заарештовано особу, яка завантажила цей фiльм на сайт megaupload.com [9]. Хоча наявнiсть водяного знаку, очевидно, не сприяла арешту, тим не менш, вiн дав змогу локалізувати джерело витокy iнформацiї. Для кiностудiї стало звичайною практикою додавати водянi знаки до своїх попереднiх версiй фiльмiв, щоб вiдстежити первiсного завантажувача.

Стан дослiджень у сферi нанесення водяних знакiв на 3D-моделi все ще перебуває на початковому етапi порiвняно з опублiкованими роботами у сферi нанесення водяних знакiв на зображення та вiдео. Однак уроки, отриманi з кiноiндустрiї, свiдчать про те, що водянi знаки є життєздатною технологiєю, яка залишиться в трендi i може бути поширена на 3D-моделi. Сьогодні для художникiв-аматорiв не є звичайною практикою вставляти водянi знаки пiд час продажу свого оригiнального 3D-контенту продавцю, i вони довiряють продавцю, що той не порушить права власностi художника. Хоча продавцi 3D-моделей виплачують художникам роялтi за право власностi на 3D-моделi, не iснує бiзнес-моделей для пiдтримки перерозподiлу 3D-моделей, якi б захищали iнтелектуальнi права художникiв. Небагато роботи було зроблено щодо нанесення декiлькох водяних знакiв для пiдтримки такої бiзнес-моделi розповсюдження через торгових посередникiв. Таким чином, iснує бiзнес-потреба в надiйних алгоритмах нанесення 3D водяних знакiв.

1.1 Загальний принцип нанесення цифрових водяних знакiв на 3D-моделi

Полiгональна сiтка (англ., Polygon mesh) — це набiр вершин, ребер, та граней, що описують форму багатогранного об'єкта в тривимiрнiй графiцi та твердотiлому моделюваннi. Гранi зазвичай складаються з трикутникiв (сiтка з трикутникiв), чотирикутникiв, чи iнших опуклих багатокутникiв, що спрощує

їх рендеринг, хоча можуть використовуватись і загальніші, неопуклі многокутники, чи багатокутники з дірками.

Список вершин містить координати у тривимірному просторі кожної вершини моделі, а список граней описує, як вершини з'єднані одна з одною. Список ребер може бути отриманий шляхом обходу списку граней і списку вершин. Рисунок 1.1 є прикладом каркасної сітки.

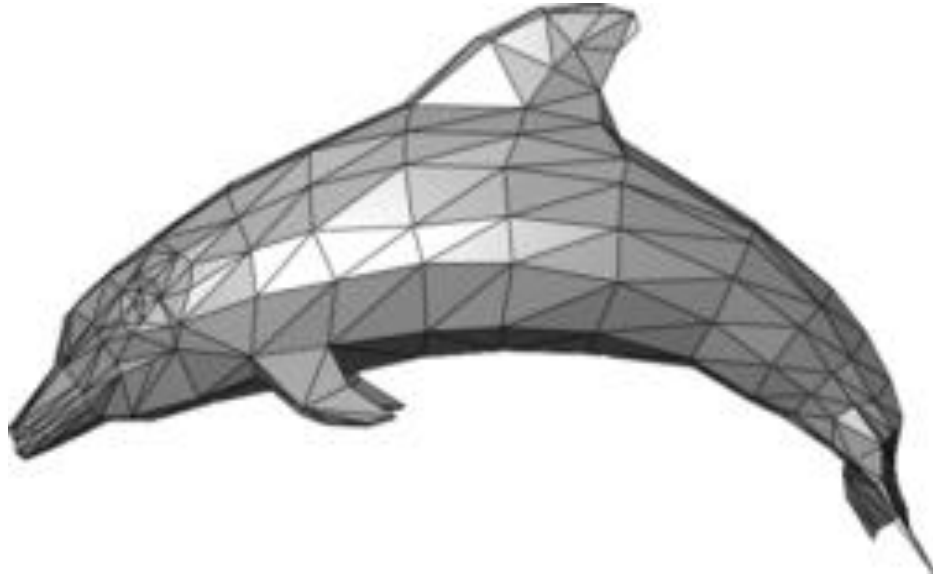


Рисунок 1.1 – Приклад трикутної сітки, яка використовується для зображення дельфіна

Технології водяних знаків вбудовують непомітні дані в мультимедійний контент. Приховані дані називаються цифровими водяними знаками і можуть складатися з унікального ідентифікатора користувача, криптографічних ключів, повідомлень про авторські права, умов доступу до контенту, логотипів, зображень, біометричних даних або інформації, що базується на контенті. Процес вбудовування та пошуку цифрових водяних знаків відбувається за допомогою секретного ключа, в якому міститься інформація про те, де і в якій мірі оригінальний контент був змінений для розміщення водяного знаку. Непомітність є важливою вимогою до кожної схеми нанесення цифрових водяних знаків, оскільки водяний знак не повинен

спотворювати оригінальний зміст або заважати його використанню за призначенням чи виконанню функцій. Надійність необхідна для того, щоб гарантувати, що звичайна обробка сигналів, геометричні операції та зловмисні модифікації не вплинуть на виявлення або відновлення водяного знаку. Мета полягає в тому, щоб полегшити власникам контенту довести своє право власності шляхом вилучення водяного знаку з піратського носія, а потім подати позов проти порушника. На рисунках 1.2 та 1.3 показано два компоненти системи захисту водяними знаками: вбудований пристрій та детектор.

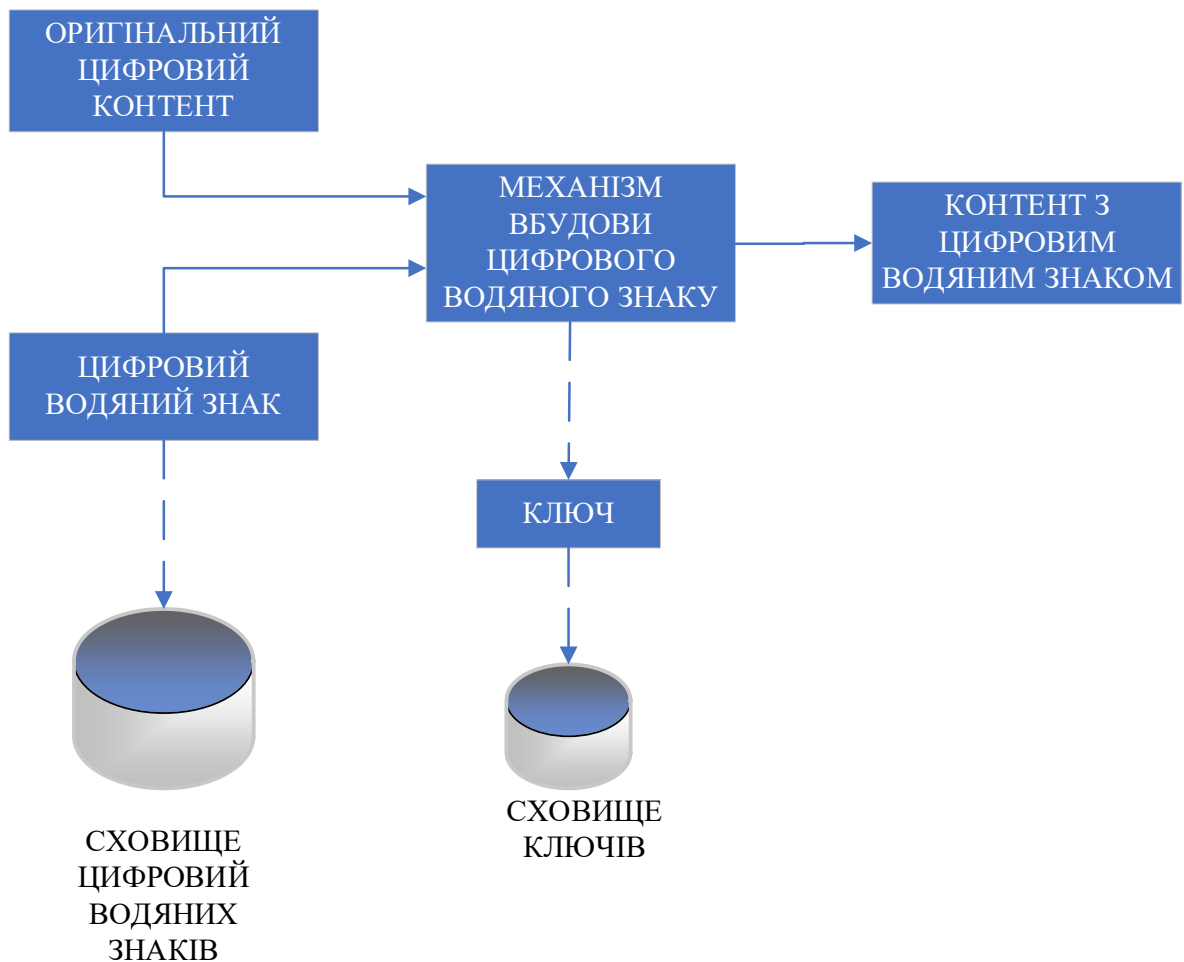


Рисунок 1.2 – Технологія нанесення цифрового водяного знаку

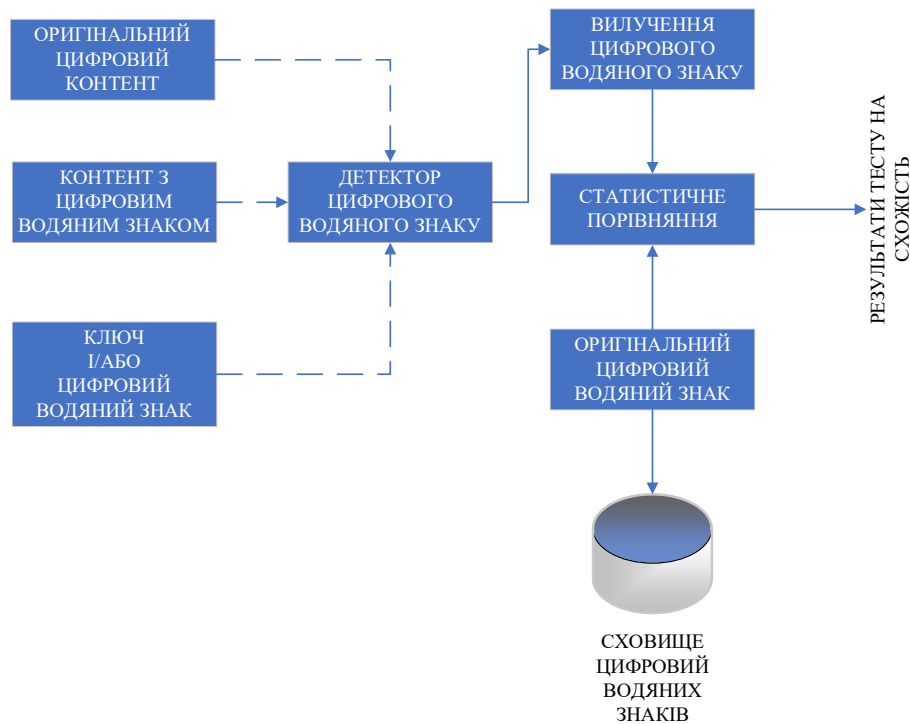


Рисунок 1.3 – Технологія виявлення цифрового водяного знаку

Процес виявлення водяних знаків може бути несліпим (процес пошуку вимагає доступу до повного оригінального вмісту), напівсліпим (детектору потрібен доступ до деякої побічної інформації та/або цифрового водяного знаку, але не до оригінального вмісту) або сліпим (виявлення виконується без доступу до оригінального вмісту). Несліпі методи виявлення є більш надійними, але непрактичними для використання в системах DRM. Оскільки несліпі методи вимагають, щоб оригінальний контент був доступний детектору, це призводить до необхідності доступу до оригінального контенту з боку програмного забезпечення системи DRM, що створює діру в безпеці системи. Напівсліпі методи є найбільш придатними для використання в цьому контексті, оскільки сліпі методи не відповідають вимогам надійності.

Алгоритми водяних знаків також можна умовно поділити на перше, друге та третє покоління водяних знаків. Існуючі алгоритми водяного маркування в цій роботі були класифіковані на два покоління алгоритмів водяного маркування. Покоління класифіковано на основі можливостей

алгоритмів. З кожним наступним поколінням алгоритми водяних знаків мають більші можливості при вбудові, не спричиняючи при цьому помітних спотворень і залишаючись стійкими.

На рисунку 1.4 показано класифікацію алгоритмів за поколіннями на основі домену вставки. Методи третього покоління ґрунтуються на існуючих алгоритмах першого і другого поколінь, а також включають гібридні домени, що дозволяють об'єднувати інформацію з різних domenів. Запропоновані алгоритми третього покоління досліджують використання методів обчислювального інтелекту для вставки водяних знаків високої ємності як у просторову область, так і в область перетворення.

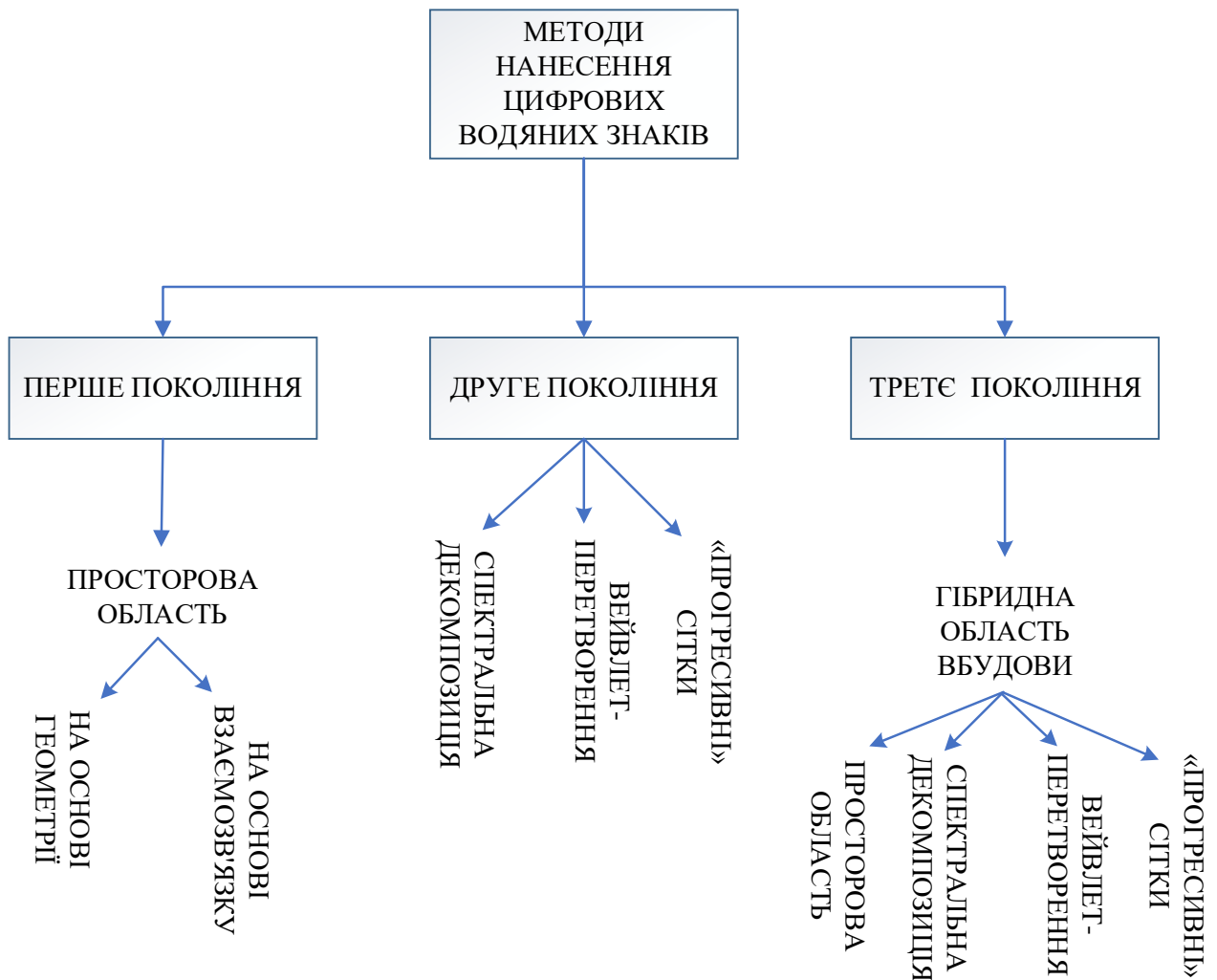


Рисунок 1.4 – Класифікація алгоритмів за поколіннями на основі домену вставки

Більш детальний опис алгоритмів нанесення цифрових водяних знаків були детально висвітлені в огляді методів нанесення 3D водяних знаків [10], тому тут буде представлено лише короткий огляд.

1.2 Перше покоління методів нанесення цифрових водяних знаків

Алгоритми першого покоління вставляють водяний знак у просторову область, змінюючи положення вершин або змінюючи зв'язність вершин. На рисунку 1.5 показано схему алгоритмів нанесення водяних знаків першого покоління. Ознаки витягуються з просторовій області. Схеми 3D-водного маркування, які вбудовують дані в просторову область, можна розділити на дві основні категорії: Схеми водяних знаків, що базуються на зв'язках, і схеми водяних знаків, що базуються на геометрії. Схеми просторових водяних знаків зазвичай менш стійкі до таких атак, як стиснення і додавання шуму. Однак вони витримують атаки обрізання і є менш складними

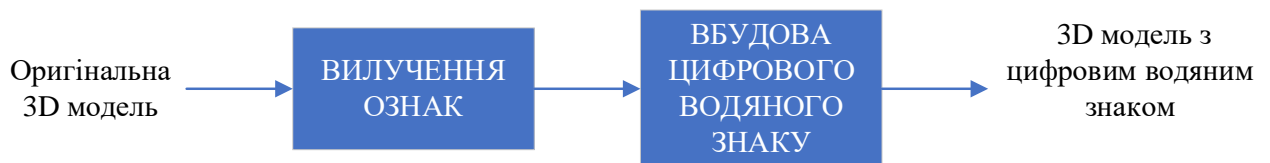


Рисунок 1.5 – Загальна схема алгоритмів нанесення водяних знаків першого покоління

Алгоритми накладання водяних знаків на основі зв'язності – це алгоритми, які явно використовують зв'язність сітки (деякі автори також називають їх топологічними особливостями). Ці схеми, як правило, базуються на обході всіх трикутників сітки. Для кожного трикутника, що задовольняє функції допустимості, в локальні інваріанти вносяться невеликі модифікації шляхом зміни положення сусідніх точок. Як наслідок, вони є чутливими до модифікацій з додаванням шуму. Серед цього класу схем водяних знаків було запропонували чотири різні алгоритми водяних знаків у

першій опублікованій роботі, присвяченій 3D-водяним знакам. Ці схеми відповідно називаються Triangle Similarity Quadruple (TSQ), Tetrahedral Volume Ratio (TVR), Triangle Strip Peeling Sequence (TSPS) та Macro Density Pattern (MDP) [11-12].

В статті [13] автори вставляють випадковий водяний знак на основі коефіцієнта маскування у вершинах. Коефіцієнт маскування базується на оцінці середньої різниці між позицією та з'єднаними вершинами. Розрядність вставленого водяного знаку становить 100 біт, алгоритм було протестовано на двох моделях з кількістю граней від 3 500 до 5 000 граней. Алгоритм несліпого нанесення водяних знаків виявився стійким до адитивного шуму, стиснення MPEG4 та атак спрощення сітки. Однак стійкість алгоритму була зумовлена багаторазовим вставлянням водяного знаку та використанням кодів з надлишковою стійкістю до помилок, а отже, низькою здатністю до вбудовування.

1.3 Друге покоління методів нанесення цифрових водяних знаків

Порівняно з першим поколінням було зроблено кілька удосконалень, які покращили характеристики з точки зору ємності, невидимості та стійкості водяного знаку. На рисунку 1.6 показано блок-схему алгоритмів водяних знаків другого покоління.



Рисунок 1.6 – Загальна схема алгоритмів нанесення водяних знаків другого покоління

Алгоритми другого покоління використовують різні перетворення для вставки водяного знаку в коефіцієнти області перетворення для підвищення

стійкості. У другому поколінні для декомпозиції 3D-моделі до більш низької роздільної здатності використовуються спектральна декомпозиція та методи з декількома роздільними здатностями, такі як вейвлет-перетворення та прогресивні сітки, а водяний знак вставляється в бітовий потік. Таким чином, алгоритми другого покоління дозволяють застосовувати підхід до нанесення водяних знаків до потокових сіток і підвищують надійність алгоритму, вставляючи водяний знак з різною роздільною здатністю.

Вейвлет-перетворення дає багаторівневе представлення 3D-моделі. На кожному рівні вейвлет-перетворення в 3D-модель вставляється водяний знак. Таким чином, водяний знак існує навіть при більш низькій роздільній здатності 3D-моделі. Це дає дві основні переваги над традиційними підходами: По-перше, це допомагає захиститися від атаки методом зниженої вибірки. При атаці з використанням низхідної дискретизації злоумисник знижує роздільну здатність 3D-моделі і, таким чином, зменшує її роздільну здатність, щоб видалити водяний знак. Але оскільки водяний знак вставляється навіть у нижчу роздільну здатність 3D-моделі, він не знищується. Таким чином, підхід з використанням декількох роздільних здатностей робить водяний знак стійким до атак. По-друге, оскільки водяний знак додається навіть при низькій роздільній здатності, кількість доданого водяного знаку є більшою, ніж водяний знак, доданий без аналізу з декількома роздільними здатностями. Це збільшує ємність водяного знаку, що підвищує стійкість до таких атак, як згладжування, обрізання та додавання шуму. Обмеженням вейвлет-методів є те, що сітка повинна мати зв'язність від 1 до 4 підрозділів. Вейвлет-перетворення можна застосовувати лише до сіток з напіврегулярною зв'язністю через процес четвертинного поділу/спрощення. Цей недолік було пізніше вирішено в роботі [14], яка поширила цю схему на нерегулярні сітки.

1.4 Третє покоління методів нанесення цифрових водяних знаків

Методи нанесення водяних знаків третього покоління базуються на методах першого і другого поколінь, додаючи інтелектуальний рівень оптимізації для вставки водяних знаків високої щільності. Таким чином, ці алгоритми можуть бути розширені для використання на потокових сітках. На рисунку 1.7 показано блок-схему алгоритмів накладання водяних знаків третього покоління. Нанесення водяних знаків можна розглядати як оптимізаційну задачу, де метою є максимізація кількості вершин для нанесення водяних знаків, а також максимізація кількості водяних знаків, які можна вставити, не спричиняючи помітних спотворень. Методи третього покоління також поширюються на алгоритми для крихких водяних знаків. Новизна цієї роботи полягає в оцінці методів обчислювального інтелекту для вирішення проблеми вставки водяних знаків високої щільності як оптимізаційної задачі. Еволюційні методи, такі як генетичні алгоритми, були включені в це покоління.



Рисунок 1.7 – Загальна схема алгоритмів нанесення водяних знаків третього покоління

Алгоритми на основі нечіткої логіки та нейронних мереж також входять до цієї нової генерації алгоритмів. Як приклад в роботі [15], в якій автори використовували квадратичне програмування (QP) для обмеженої оптимізації 3D-сіток. Було запропоновано метод на основі гістограми для

нанесення водяних знаків на 3D полігональні сіті за допомогою квадратичного програмування для мінімізації середньоквадратичної похибки між вихідною сіткою та сіткою з водяними знаками. Однак цей метод має труднощі в роботі з великими сітками через обмеження складності існуючих QR-розв'язувачів. Не існує жодної опублікованої роботи, яка б досліджувала використання генетичних алгоритмів, нечіткої логіки або штучних нейронних мереж для нанесення 3D водяних знаків. Однак генетичні алгоритми (ГА), нечітка логіка (НЛ) і штучні нейронні мережі (ШНМ) з частковим успіхом використовувалися для нанесення водяних знаків на зображення і відео.

3D стеганографія є відносно новою та перспективною галуззю досліджень, що об'єднує аспекти комп'ютерної графіки, криптографії та інформаційної безпеки. У ході огляду було виявлено кілька ключових напрямів та тенденцій розвитку цієї сфери:

- використання 3D моделей для приховування інформації забезпечує вищий рівень захисту порівняно з традиційними 2D методами. Це обумовлено складністю та багатовимірністю 3D об'єктів, що ускладнює виявлення і витяг прихованих даних;

- існує багато методів 3D стеганографії, таких як методи на основі геометричних властивостей, спектрального аналізу, топологічних змін та методи з використанням текстур і матеріалів. Кожен з методів має свої переваги та недоліки, що робить їх придатними для різних застосувань;

- 3D стеганографія знаходить застосування в багатьох галузях, включаючи захист інтелектуальної власності, безпечний обмін медичними даними, військові технології та розваги. Це свідчить про широку корисність та потенціал для подальших досліджень;

- попри численні переваги, 3D стеганографія стикається з певними технічними викликами, такими як необхідність високих обчислювальних потужностей, складність у створенні стійких до атак методів, а також питання стандартизації та сумісності;

- подальші дослідження в цій сфері можуть зосередитися на розвитку більш стійких алгоритмів стеганографії, інтеграції з іншими технологіями захисту даних, а також на вирішенні проблем сумісності та стандартизації.

Загалом, 3D стеганографія є перспективною технологією, що має потенціал для значного впливу на галузь інформаційної безпеки. Подальші дослідження та розвиток у цій сфері можуть сприяти створенню більш ефективних та безпечних методів захисту даних, а також розширенню можливостей використання 3D технологій у різних галузях.

2 ЗАГАЛЬНИЙ ПІДХІД ДО НАНЕСЕННЯ ЦИФРОВИХ ВОДЯНИХ ЗНАКІВ НА ТРИВИМІРНУ МОДЕЛЬ

2.1 Основні підходи

Обчислювальний інтелект – це дослідження адаптивних механізмів, які уможливають або полегшують інтелектуальну поведінку в складних, невизначених і мінливих середовищах. Ці адаптивні механізми включають ті парадигми штучного інтелекту (ШІ), які демонструють здатність навчатися або адаптуватися до нових ситуацій, узагальнювати, абстрагувати, відкривати та асоціювати. Ці біологічно обумовлені алгоритми були об'єднані під поняттям "обчислювальний інтелект". В рамках цієї роботи досліджується використання нечіткої логіки. Інтуїтивно зрозумілим є використання алгоритмів, таких як ГА та ШНМ, оскільки глядачем цих 3D-даних є людина, і процес злому також потенційно може здійснюватися людиною для вгадування позицій водяного знаку.

Нанесення ЦВЗ можна розглядати як задачу оптимізації та класифікації. В алгоритмі нанесення водяних знаків вершини вибираються випадковим чином, а інформація додається шляхом зміни позицій вершин, не викликаючи при цьому помітних спотворень. Вершини випадковим чином вибираються з простору пошуку пулу вершин, щоб збільшити складність атаки грубої сили. Однак, якщо простір пошуку досить великий, можна зменшити його до меншого простору пошуку, який складається з хороших кандидатів для вставки водяного знаку, і в той же час зберегти випадковість у зменшеному, але високоякісному пулі пошуку. Таким чином, алгоритм вставки водяних знаків буде випадковим чином вибирати вершини для вставки водяних знаків з пулу вершин, які мають хорошу здатність приховувати дані. Таким чином, нанесення водяних знаків можна розглядати як задачу класифікації, де вершини позначаються як хороші або погані

кандидати для вставки даних. Водяні знаки також можна розглядати як задачу оптимізації, коли хочемо оптимізувати кількість даних, що вставляються.

Після того, як вибрано вершини для нанесення водяних знаків, необхідно визначити розмір водяного знаку, який потрібно вставити у відповідну вершину, щоб не було помітних спотворень. Якщо менший водяний знак додається шляхом модифікації меншої кількості бітів у позиції вершини, водяний знак може бути легко розмитий або знищений за допомогою атаки стиснення або інших атак на водяні знаки. Якщо змінити більшу кількість бітів, то текст з водяним знаком може призвести до помітних спотворень. Таким чином, кількість водяних знаків, що додаються, є проблемою оптимізації, де алгоритм повинен мати можливість визначити максимальну кількість водяних знаків або бітів, які можна модифікувати у вершині, не спричиняючи помітних спотворень. Крім того, алгоритм може вибирати тільки вершини з усього простору пошуку і наносити водяні знаки тільки на ті з них, які мають високу ємність для вбудовування даних. Таким чином, кількість водяних знаків, що додаються, залежить від обраної вершини, яка, в свою чергу, залежить від геометрії оточення вершини, що розглядається. Задачу оптимізації кількості інформації можна оптимізувати за допомогою еволюційних алгоритмів, таких як генетичний алгоритм. Куди вставляти, можна розглядати як проблему класифікації, і її можна вирішити за допомогою нейронних мереж або використовувати ключове спостереження для визначення вершин, на які потрібно наносити водяні знаки. Є роботи де використовували машини опорних векторів (SVM) як класифікатор для класифікації вершин як хороших або поганих вершин для вставки 3D водяних знаків. Мета процесу або алгоритму еволюційної оптимізації водяних знаків полягає в тому, щоб знати, що максимізувати або мінімізувати шляхом вибору фітнес-функції, але не знаючи деталей того, як саме ця мета досягається, оскільки в досягненні цієї мети присутня випадковість. Іншими словами, хочемо знайти оптимальне розташування

вершини з водяними знаками, не акцентуючи увагу на тому, як ця позиція була отримана.

Цей підхід працює як для стійких, так і для крихких водяних знаків. Крихкі водяні знаки використовуються для виявлення будь-якого виду несанкціонованого втручання, тобто несанкціонованої модифікації моделі. Найкращий і найпростіший спосіб зробити це – вставити водяний знак у кожную вершину моделі.

2.2 Вставка водяного знаку

На рисунку 2.1 показано детальну блок-схему алгоритмів водяних знаків третього покоління.

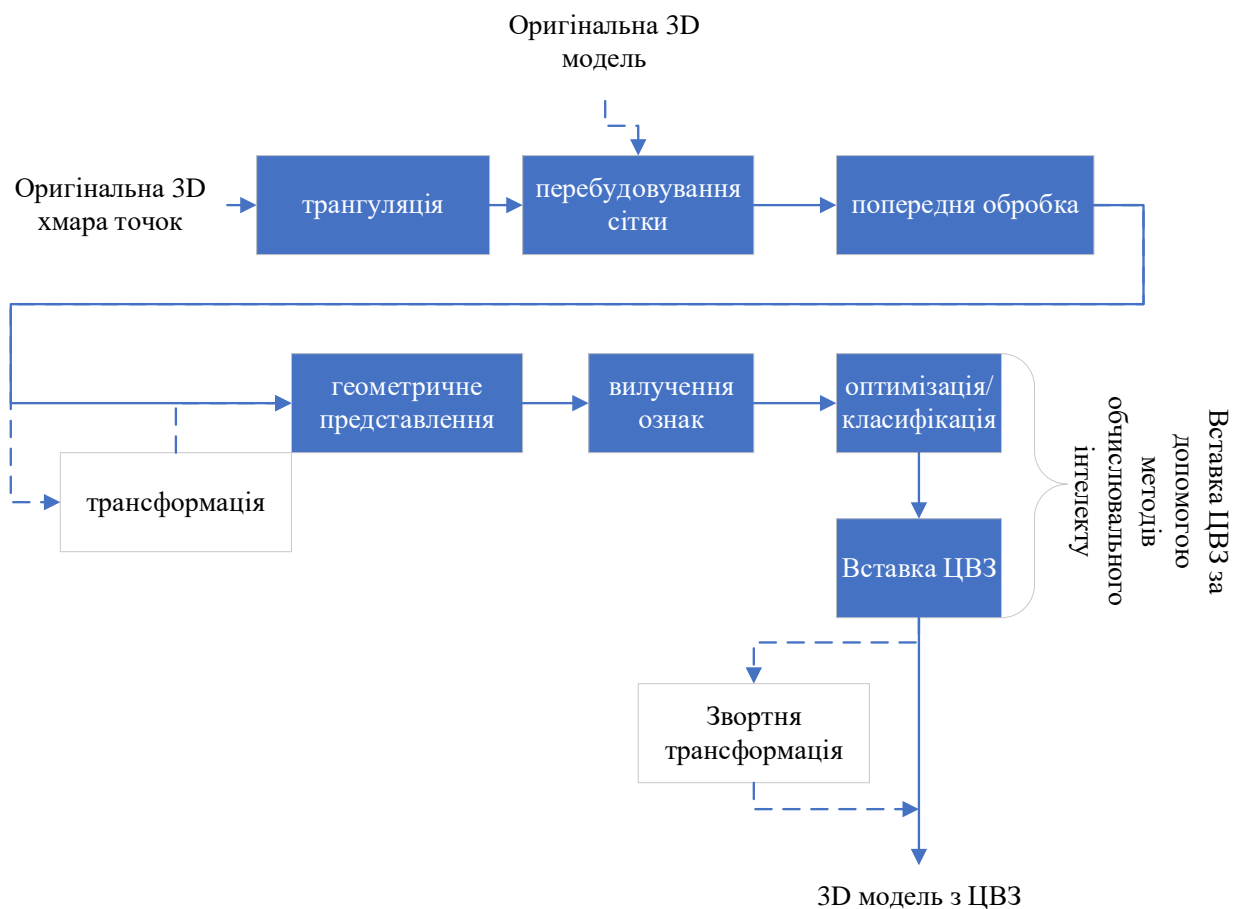


Рисунок 2.1 – Схеми алгоритмів нанесення водяних знаків третього покоління

Тривимірна поверхня може бути представлена кількома способами і має коріння в розділі математики, який називається обчислювальна геометрія. Обчислювальна геометрія – це узагальнення набору розроблених інструментів і методів, які використовують переваги структури, наданої геометрією. Тріангуляція – це процес визначення зв'язків між вершинами для створення трикутних граней каркасної сітки. Існують різні техніки для реконструкції поверхні з хмари точок. Деякі з популярних методів генерації сітки можна знайти в [16]. Діаграми Вороного та трикутники Делоне [17] мають багато цікавих властивостей, які глибоко вивчаються в дискретній обчислювальній геометрії. Лазерні сканери сканують матеріальний об'єкт, створюючи хмару 3D точок. Хмара 3D точок може бути зареєстрована за допомогою різних методів, як показано в [18] та [19]. Алгоритми дискретної обчислювальної геометрії, такі як трикутники Делоне, використовуються для створення сітки, яка потім уточнюється і обробляється. В ідеалі, водняний знак слід вставляти безпосередньо у джерело в 3D хмарі точок. Однак така методика може не підтримувати модель дистриб'ютора з множинною дистрибуцією, і сітка може бути доопрацьована після того, як буде визначено зв'язок між вершинами. Включення тріангуляції в процес нанесення водняних знаків робить техніку нанесення водняних знаків інваріантною до атак перевпорядкування вершин і перезапису. Однак, якщо сітка вже згенерована, ця частина кроку не є обов'язковою.

Оскільки запропонована методика вимагає, щоб сіть була напіврегулярною, необхідно, щоб така сіть була перетворена в напіврегулярну. Праун і Хоппе в [19] детально описують перетворення 3D-сітки в напіврегулярну.

Нормалізація 3D-моделей як етап попередньої обробки перед нанесенням водяного знака робить водняний знак стійким до модифікацій 3D-моделі внаслідок афінних перетворень і перетворень масштабування. Центр маси 3D-моделі зміщується до початку координат, а модель масштабується так, щоб поміститися в одиничному кубі.

Методи водяних знаків другого покоління використовують різні перетворення, такі як спеціальне представлення, вейвлет-перетворення та прогресивні сітки. На цьому кроці виконується застосування такого перетворення, як вейвлет-перетворення.

Важливо, щоб хороший алгоритм нанесення водяних знаків не використовував інформацію про зв'язність, оскільки зміна порядку вершин сітки може легко знищити такий водяний знак. Існує потреба у визначенні вектора ознак для представлення локальної геометрії сітки, в яку вставляється водяний знак. Ці вектори ознак потім будуть визначені на поверхні, яка представляє локальну геометрію. У цій роботі для представлення локальної геометрії 3D-моделі були обрані 1-кільцеві та 2-кільцеві вершини. У подальшій роботі для представлення локальної геометрії можуть бути використані інші локальні геометричні структури, такі як кільця Вороного, 3D кулі фіксованого радіуса та вокселі, а вектори ознак, отримані на основі цих геометричних структур, можуть бути використані за допомогою методів обчислювального інтелекту для класифікації вершин, вибору місця вставки водяного знаку та оптимізації кількості водяних знаків, що вставляються. 1-кільцеве оточення вершини V визначається як поверхні, утворені вершиною V та її сусідами, як показано на рисунку 2.2

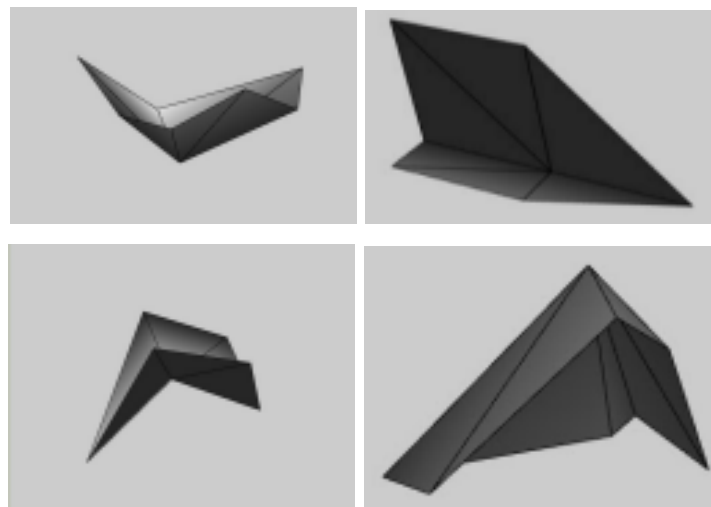


Рисунок 2.2 – Вершини 1-кільця, показані під різними кутами

Тривимірні трикутні сіткові моделі представляються набором вершин і списком трикутних граней, утворених цими вершинами. Вершина v_i є сусідом іншої вершини v_j , якщо існує ребро, яке з'єднує v_i та v_j . Множина всіх сусідів вершини v_i називається 1-кільцем вершини. Множину всіх сусідів 1-кільця вершини v_i разом з множиною їх 1-кільця називаємо 2-кільцем вершини, як показано на рисунку 2.3.

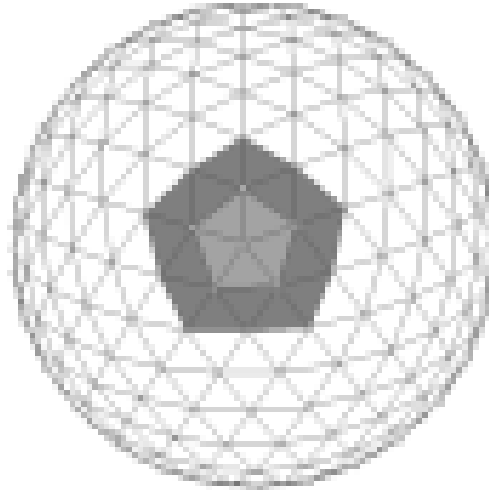


Рисунок 2.3 – Околиці вершини: 1-кільце показано світло-сірою плямою, 2-кільце показано світло- та темно-сірими плямами

Кількість сусідів вершини v_i у 1-кільці називається валентністю або степенем вершини v_i . На рисунку 2.3 показано вершину з валентністю 5 (1-кільце) та вершини з валентностями 5 і 6 (у 2-кільці).

Тут використовується 2-кільцева околиця, оскільки рівень точності зростає при використанні 2-кільцевої околиці, оскільки порівняння виконується з більшою кількістю вершин.

В основі використання сучасних алгоритмів, лежать два ключові спостереження, перелічені нижче.

На сприйняття спотворень, спричинених вставкою водяного знаку, впливає навколишня геометрія вершин. Наприклад, збурення ізольованої вершини у 3D не призведе до того, що око не відчує жодних змін у

розташуванні вершини. Однак, якщо ізольована вершина знаходиться на тлі плоскої поверхні, зміна буде більш помітною. Якщо ж та сама вершина знаходиться на нерівній поверхні, зміна непомітна. Таким чином, абсолютне розташування вершини не є важливим для нанесення водяного знаку, але її розташування відносно локальної геометрії визначає, чи є вершина хорошим або поганим кандидатом для вставки водяного знаку. Якщо інформація вставляється в конкретну вершину, це може бути сприйнято як спотворення, тоді як якщо інформація вставляється в околиці вершин разом з вершиною, що розглядається, спотворення може бути замасковано підтримуючою геометрією. Околиці вершин також слід враховувати в процесі відбору, щоб визначити їхню придатність або "придатність" для відбору.

Якщо вершина розташована на дуже нерівній поверхні, то зміна її положення буде найменш помітною. З метою аналізу цих ключових спостережень і використання їх в якості основи алгоритмів, в першу чергу аналізуються плоскі, гладкі, криволінійні, горбисті та комбінації цих типів ділянок поверхні. Плоска поверхня, вигнута поверхня, гладка поверхня, горбиста поверхня, комбінація вищезгаданих поверхонь, як показано на рисунку 2.2.

Таким чином, на основі наведених вище ключових спостережень визначаються вектори ознак, які кількісно моделюють ці спостереження. На основі типу геометрії локальної поверхні визначаються дві особливості.

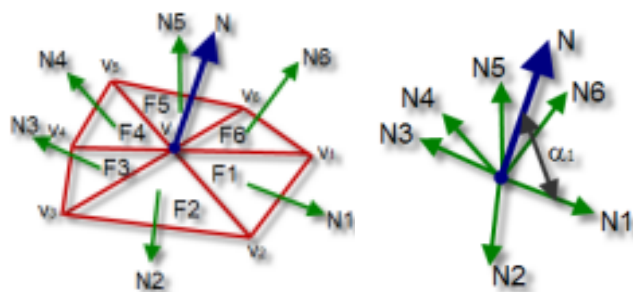


Рисунок 2.4 – Норми поверхні (зеленим) та середня норма (синім) для 1-кільцевого оточення вершин

Кривизна – це величина, на яку геометрична поверхня відхиляється від плоскої. Крива поверхня складається з декількох менших трикутників, щоб створити відчуття гладкої поверхні, порівняно з тим, що потрібно для плоскої поверхні. Нормальна варіація зазвичай дає хорошу інформацію про кривизну поверхні. Наприклад, якщо поверхня плоска, то всі нормалі поверхні паралельні одна одній і відхилення середньої нормалі від кожної з них дорівнює нулю. Якщо поверхня гладка, то відхилення нормалі поверхні від середньої нормалі узгоджується з відхиленням інших нормалей поверхні від середньої нормалі. Якщо поверхня має нерівномірну кривизну, відхилення нормалей поверхні від середньої нормалі може бути нестабільним.

Ознака BUMPINESS у вейвлет-області за методом Канаї обчислюється шляхом ділення скалярного коефіцієнта моделі з низькою роздільною здатністю на довжину вектора між його сусідніми скалярними коефіцієнтами.

Інтелектуальна вставка водяних знаків може включати або крок оптимізації, або крок класифікації. Залежно від методу обчислювального інтелекту, деталі кроку можуть відрізнятися в залежності від методів обчислювального інтелекту: нечітка логіка, генетичні алгоритми та нейронні мережі.

Процес вилучення водяного знаку показано на рисунку 2.5. Щоб зробити водяний знак стійким до атак перезапису, витягнутий водяний знак перезаписується з використанням геометричних зображень. Оновлена модель нормалізується і повертається для вирівнювання з головним компонентом даних 3D-моделі для вирівнювання сітки. Процес вилучення не є сліпим, якщо доступна вхідна модель, яку можна відняти від моделі з водяними знаками. Процес є напівсліпим, якщо є ключ, який дозволяє визначити, які вершини були позначені водяними знаками, а також кількість інформації, вставленої в кожен вершину.

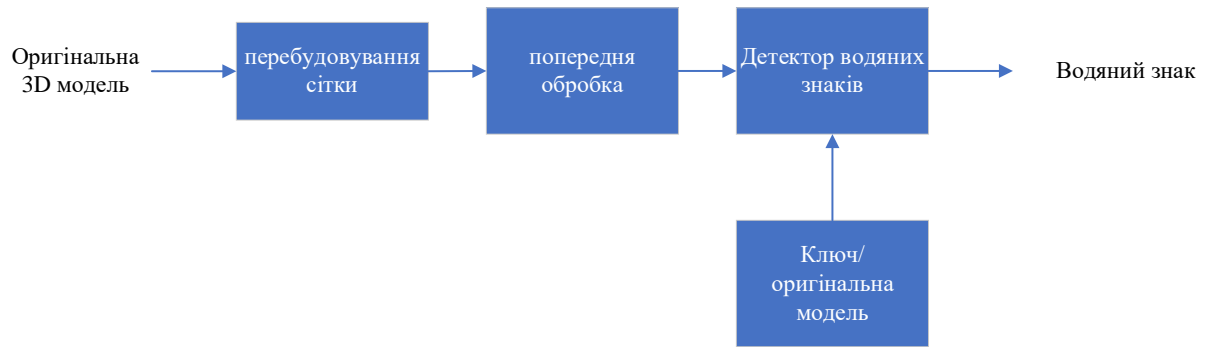


Рисунок 2.5 – Процес вилучення ЦВЗ

Подібність між видобутим водяним знаком і оригінальним водяним знаком обчислюється за допомогою кореляції. Кореляція обчислюється за допомогою рівнянь, наведених нижче.

$$A(u) = Ax(i) + Ay(j) + Az(k) , \quad (2.1)$$

$$A'(u) = A'x(i) + A'y(j) + A'z(k), \quad (2.2)$$

де $Ax(i)$, $Ay(j)$, $Az(k)$ – координати x, y, z u' – її вершини в атакованій моделі. $A'x(i)$, $A'y(j)$, $A'z(k)$ – координати x, y, z відповідної u' вершини в моделі з водяним знаком.

$$\text{Amount of correlation} = \frac{w + w' * \text{correlation}}{W}, \quad (2.3)$$

w = кількість вершин, що не були атаковані, w' = кількість вершин, що були атаковані, W = загальна кількість вершин у моделі з водяними знаками.

Якщо кореляція $> 80\%$, це означає, що модель не була атакована. Для крихких водяних знаків кореляція = 100% для виявлення підробки.

Потужність вбудовування водяного знаку може бути визначена кількістю вершин, позначених водяним знаком, та кількістю бітів водяного

знаку, що кількість, що вставляється в кожен вершину моделі. Для крихких водяних знаків кількість позначених вершин є більш важливою, ніж сила водяного знаку (кількість бітів, що вставляються на вершину, є більш важливою), оскільки метою є виявлення підробки в кожній вершині. Для стійкого водяного знаку кількість вершин може змінюватися в залежності від розміру моделі, а оскільки в процесі існує випадковість, кількість вершин не є фіксованою. Таким чином, для стійкого водяного знаку стійкість водяного знаку або ємність визначається кількістю бітів на вершину. Однак, кількість бітів, що вставляються в кожен вершину, може змінюватися, і, таким чином, відношення сигнал/шум (SNR) є гарним показником стійкості водяного знаку. Добре відомо, що SNR не є показником спотворення сприйняття. Відстань Хаусдорфа була використана як більш точна міра для порівняння помилок між двома поверхнями

Алгоритми водяних знаків зазвичай використовують відношення сигнал/шум (SNR) для визначення помітних спотворень і нормалізовану перехресну кореляцію (NCC) для вимірювання стійкості водяного знаку. Відстані Хаусдорфа (HD) зазвичай використовуються для визначення ступеня невідповідності між двома наборами точок і застосовуються як міра розрізнення для нанесення водяних знаків на зображення. Наведені нижче рівняння обчислюють SNR та HD для 1-кільцевої та 2-кільцевої локальних геометричних структур.

Кількість спотворень в 1-му кільці можна виміряти, обчисливши відношення сигнал/шум (SNR) наступним чином:

$$SNR = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i^2 + Y_i^2 + Z_i^2)}{\sum_{i=1}^N [(X_i - X'_i)^2 + (Y_i - Y'_i)^2 + (Z_i - Z'_i)^2]}, \quad (2.4)$$

де N – кількість вершин в 1-кільцевому або 2-кільцевому оточенні центральної вершини, включаючи центральну вершину;

X_i , Y_i та Z_i – декартові координати вершин в 1-кільцевому або 2-кільцевому оточенні, включаючи центральну вершину;

X_i , Y_i та Z_i – модифіковані координати центральної вершини.

$$VSNR = 20 * \text{Log}_{10}(SNR) \quad . \quad (2.5)$$

Для заданих множин точок відстань Хаусдорфа визначається як максимальна відстань однієї множини до найближчої точки в іншій множині. Таким чином, відстань Хаусдорфа можна представити як функцію максимуму, як показано в рівнянні нижче

$$h(a, b) = \max\{\min(d(a, b))\} \quad , \quad (2.6)$$

де 'a' та 'b' – множини точок, між якими вимірюється відстань Хаусдорфа. У запропонованих алгоритмах "a" – це список вершин, утворений 1-кільцевим або 2-кільцевим оточенням вершини V, а "b" – список вершин, утворений 2-кільцевим оточенням вершини V_i , яка є позицією V зі вставленим водяним знаком.

Слід, однак, зазначити, що $h(a, b) \neq h(b, a)$ Таким чином, симетрична відстань Хаусдорфа визначається як

$$H(a, b) = \max\{h(a, b)h(b, a)\} \quad . \quad (2.7)$$

У цій роботі використовували відстань Хаусдорфа та відношення сигнал/шум у вершині (VSNR), щоб знайти ступінь невідповідності між 1-кільцевими або 2-кільцевими шапками сусідів вихідної вершини V та вершини з водяним знаком V_i .

3 МЕТОД НАНЕСЕННЯ ЦИФРОВИХ ВОДЯНИХ ЗНАКІВ НА ТРИВИМІРНІ ОБ'ЄКТИ З ВИКОРИСТАННЯМ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ

Нечітка логіка є надмножиною класичної теорії чисел або теорії множин. Вона дозволяє моделювати неточну або нечітку інформацію, яка в іншому випадку є надзвичайно складною і важко представити за допомогою математичних рівнянь.

Нечітка логіка була введена професором Лотфі Заде з 1965 року і широко використовується в системах управління, пральних машинах та інших електронних системах. Вона найкраще підходить для моделювання нелінійних даних і представляє неточні дані у вигляді зрозумілих лінгвістичних правил IF THEN ELSE. Це робить їх простими в розробці і забезпечує спосіб фіксації людських знань, які інакше важко представити в математичних рівняннях, у вигляді простих лінгвістичних правил, які в іншому випадку легко визначити або описати за допомогою речень повсякденної мови. Нечітка логіка успішно використовується для вирішення проблем класифікації з використанням неконтрольованих даних.

3.1 Опис алгоритму

Як було показано у розділі 2, де є блок-схема нашого фреймворку, цю діаграму показано на рисунку 2.1. Збільшимо нижній рядок цієї діаграми і покажемо розширений потік для генерації та вбудовування водяного знаку за допомогою нечіткої логіки (рисунок 3.1)

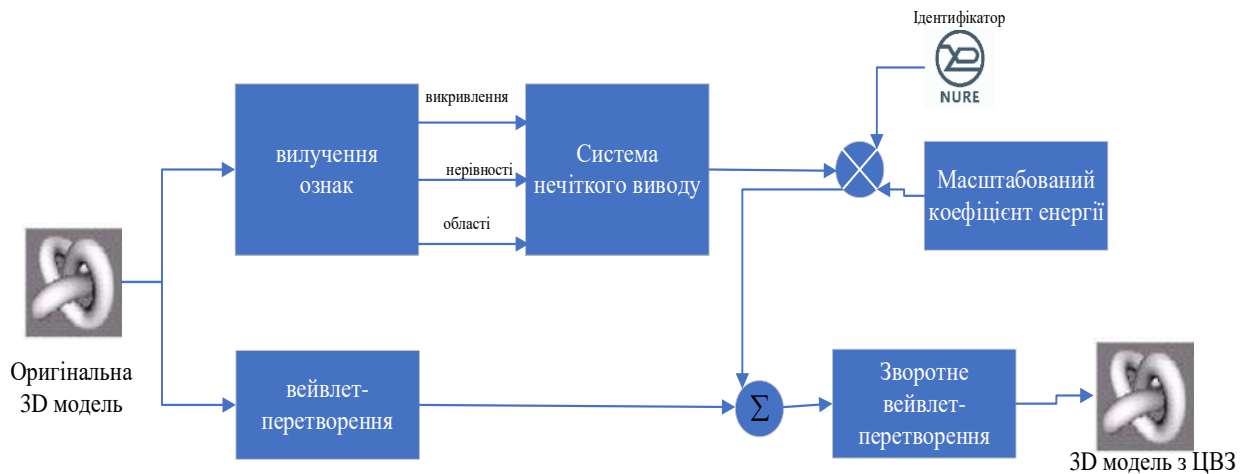


Рисунок 3.1 – Метод нанесення цифрових водяних знаків на тривимірні об'єкти з використанням нечіткої логіки

У цьому розділі нечітка логіка використовується для кількісної оцінки кількості водяних знаків, які потрібно вставити у вершини. Таким чином, нечітка логіка визначає, як класифікувати вершини в окремі контейнери, визначаючи, які вершини підходять для вставки водяного знаку.

Вставка водяного знаку включає наступні етапи

Крок 1 – Декомпозиція 3D моделі. Як показано в розділі 2.1, перед застосуванням вейвлет-перетворення всі вершини сітки нормалізуються між 0 та 1 шляхом розміщення уявного обмежувального поля, щоб забезпечити стійкість до атак масштабування. Потім вейвлет-перетворення реалізується за допомогою стандартної схеми і використовується вейвлет Коена-Даубеша-Фео (2, 2). Схема розкладання вимагає, щоб відліки вхідного сигналу були класифіковані на парні та непарні для обчислення скалярних та вейвлет-коефіцієнтів відповідно.

Декомпозиція вихідної 3D-моделі за допомогою 3D-вейвлет-перетворення з кількістю рівнів до трьох за допомогою вейвлету CDF (2, 2). Основною метою застосування вейвлетів до 3D-моделі є створення її представлення. На рисунку 3.2 показано блок-схему вейвлет-розкладання.

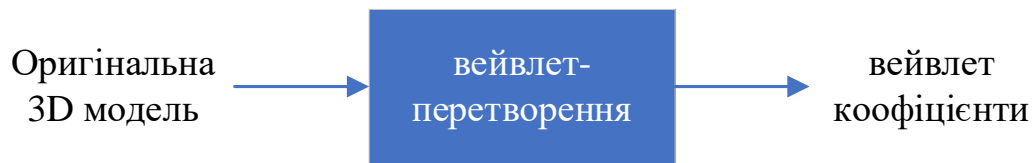


Рисунок 3.2 – Блок-схема для вейвлет-розкладання

Крок 2: Обчислення нечітких вхідних даних. Нечіткі вхідні змінні обчислюються з урахуванням геометрії моделі, таких як площа, кривизна та нерівності поверхні, що відповідають кожній вершині. Площа трикутної грані, утвореної 3-ма вершинами, обчислюється за величиною нормалі до трикутної ділянки.

Кривизна – це величина, на яку геометричний об'єкт відхиляється від площини. Крива поверхня складається з більшої кількості менших трикутників у порівнянні з плоскою поверхнею. Оскільки в даній системі розглядаються лише напірегулярні сітки, кожна регулярна вершина з'єднана з 6 іншими вершинами. Таким чином, для кожної відповідної сусідньої вершини обчислюється 6 нормалей поверхні. Кривизна обчислюється як середнє арифметичне кутів між нормалями поверхні та середньою нормаллю поверхні.

Нерівна поверхня – це поверхня, яка не є гладкою, а є неправильною та нерівною. Нерівна поверхня має більше деталей, пов'язаних з нею, і, отже, має більшу здатність зберігати водяні знаки. Нерівність обчислюється діленням значення вейвлет-коєфіцієнта на довжину вектора, що з'єднує двох сусідів EVEN, як показано на рисунку 3.3. Нерівності, площа та кривизна передаються як нечіткі вхідні дані до системи нечіткого виводу (FIS) для обчислення нечіткої перцептивної маски для кожного вейвлет-коєфіцієнта на кожному рівні. Кривизна та площа для вершин сітки обчислюються в просторовій області, тоді як нерівність для відповідної вершини обчислюється у вейвлет-області.

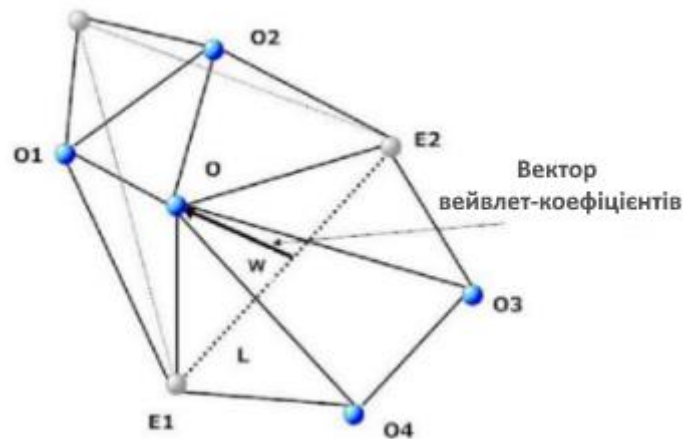


Рисунок 3.3 – Розрахунок нерівностей за допомогою вектора вейвлет-коефіцієнтів

Нечіткі вхідні змінні обчислюються з урахуванням геометрії моделей, таких як кривизна та нерівність поверхні для кожного вейвлет-коефіцієнта. Вихід нечіткої системи – це єдине значення, яке дає перцептивне значення для кожного відповідного вейвлет-коефіцієнта. Таким чином, нечітка перцептивна маска поєднує всі ці нелінійні змінні для побудови простої, зручної у використанні моделі просторового маскування. На рисунку 3.4 показано блок-схему системи нечіткого виводу (СНВ).

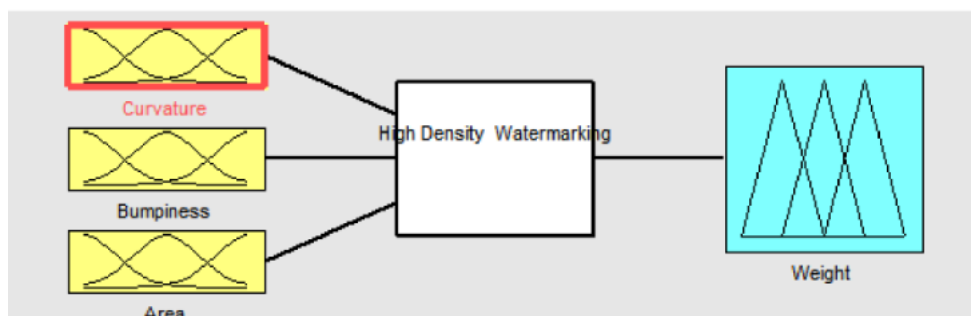


Рисунок 3.4 – Блок-схема системи нечіткого виведення

Крок 3: Обчислення нечіткої маски. Вихід нечіткої системи – це єдине значення, яке відповідає порогу сприйняття для кожного відповідного

вейвлет-коефіцієнта. Таким чином, нечітка перцептивна маска поєднує 3 нелінійні змінні: кривизна, нерівність та площа для побудови простої, зручної у використанні моделі. Хоча нечіткий вихід має 7 функцій належності, як показано на рисунку 3.5, для вставки водяного знаку в 3D-модель використовуються тільки набори нечітких виходів HIGH і HIGHER. Це робиться для того, щоб зробити водяний знак непомітним і більш надійним.

Загалом було розроблено 15 нечітких правил.

Лістинг 3.1– 15 нечітких правил

1. IF [Curvature] is Low AND [Bumpiness] is Low THEN [Weighting factor] is Lowest
2. IF [Curvature] is Low AND [Bumpiness] is Medium THEN [Weighting factor] is Lower
3. IF [Curvature] is Low AND [Bumpiness] is High THEN [Weighting factor] is Low
4. IF [Curvature] is Medium AND [Bumpiness] is Low THEN [Weighting factor] is Lower
5. IF [Curvature] is Medium AND [Bumpiness] is High AND [Area] is Low THEN [Weighting factor] is Medium
6. IF [Curvature] is Medium AND [Bumpiness] is High AND [Area] is Medium THEN [Weighting factor] is High
7. IF [Curvature] is Medium AND [Bumpiness] is High AND [Area] is High THEN [Weighting factor] is Higher
8. IF [Curvature] is High AND [Bumpiness] is Low THEN [Weighting factor] is Low
9. IF [Curvature] is High AND [Bumpiness] is Medium AND [Area] is Low THEN [Weighting factor] is Medium
10. IF [Curvature] is High AND [Bumpiness] is Medium AND [Area] is Medium THEN [Weighting factor] is High
11. IF [Curvature] is High AND [Bumpiness] is Medium AND [Area] is High THEN [Weighting factor] is Higher
12. IF [Curvature] is High AND [Bumpiness] is High THEN [Weighting factor] is Higher
13. IF [Curvature] is Medium AND [Bumpiness] is Medium AND [Area] is Low THEN [Weighting factor] is Low
14. IF [Curvature] is Medium AND [Bumpiness] is Medium AND [Area] is Medium THEN [Weighting factor] is Medium
15. IF [Curvature] is Medium AND [Bumpiness] is Medium AND [Area] is High THEN [Weighting factor] is High

При розробці нечіткої системи впливу було проведено ряд експериментів. Різні нечіткі правила були прийняті та проаналізовані за

допомогою графіків нечітких поверхонь, як показано на рисунках 3.8 та 3.9. Рисунок 3.6 ілюструє, як оцінюються правила для заданого нечіткого входу.

Після обчислення вагового коефіцієнта за допомогою FIS (Fuzzy Inference System) нечіткі множини далі множаться на випадкову двійкову послідовність і далі масштабуються на коефіцієнт важливості, що дає нечітку маску для відповідного вейвлет-коефіцієнта. Описана вище процедура обчислення вагового коефіцієнта обчислюється для всіх вейвлет-коефіцієнтів на кожному рівні. Ваговий коефіцієнт отримується шляхом дефазифікації нечіткого виводу за допомогою системи виводу типу Мамдані.

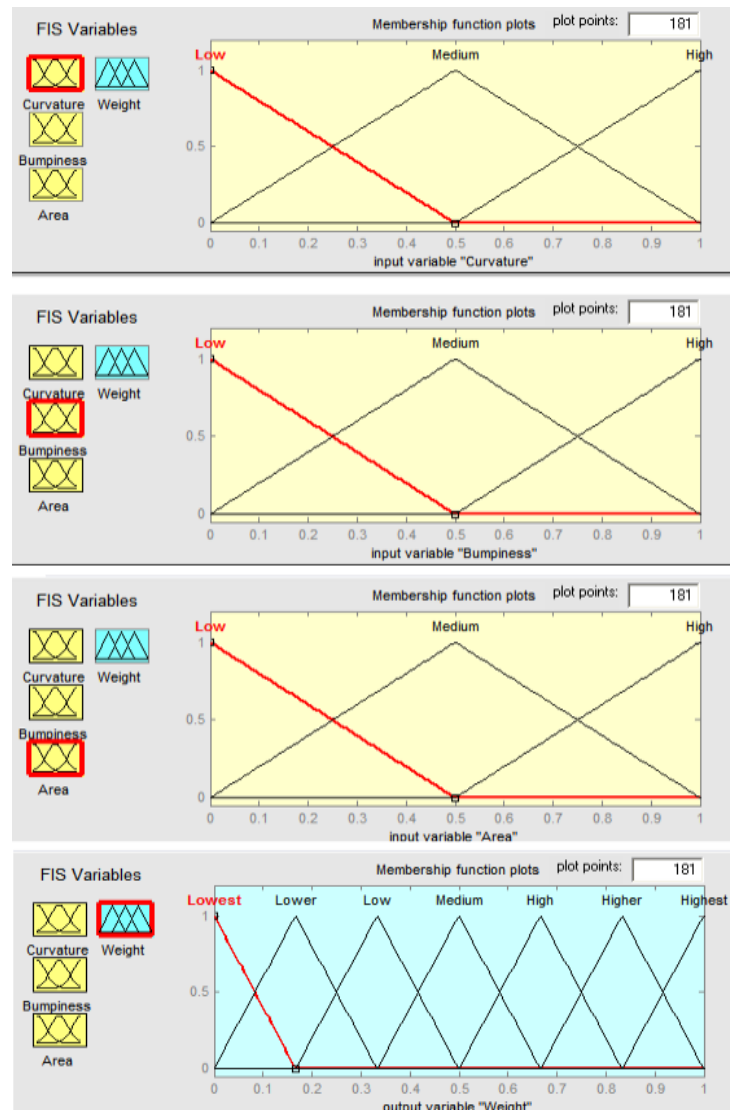


Рисунок 3.5 – Функції належності для нечітких входів і виходів

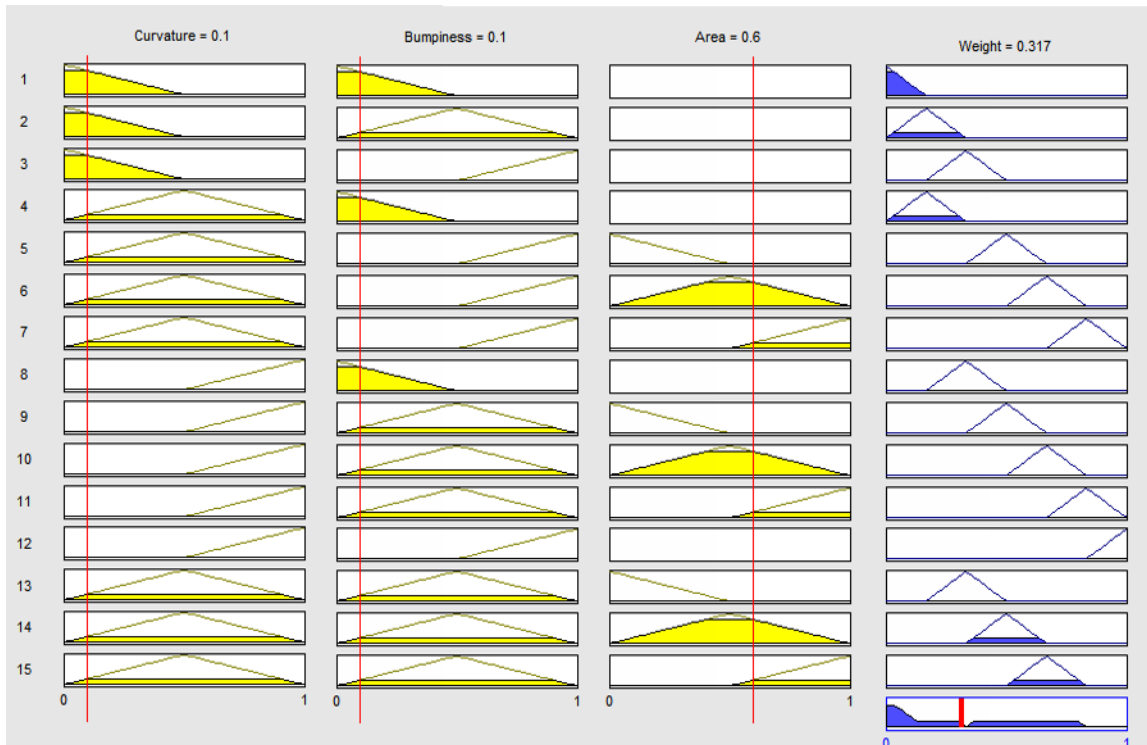


Рисунок 3.6 – Оцінка нечітких правил

Для вилучення водяного знаку використовується несліпий метод, як показано на рисунку 3.7. Алгоритм вилучення водяного знаку наступний.

Крок 1 – Декомпозиція 3D моделі. Обчислити 3D вейвлет-перетворення CDF (2, 2) для моделі, яку потрібно протестувати на наявність атак, і для вихідної моделі.

Крок 2 – Отримання водяного знаку. Відніміть коефіцієнти двох моделей, щоб отримати водяний знак.

Крок 3 – Кореляція водяних знаків. Зіставте оригінальний водяний знак (В) з відновленим водяним знаком (В*), щоб визначити автентичність.

Оскільки система не є сліпою схемою нанесення водяних знаків, для вилучення водяного знаку з атакваної моделі потрібні оригінальна модель і оригінальний водяний знак. Для оригінального та атакваного водяних знаків обчислюється кореляція і вибирається поріг, який визначає, чи атаквана модель.

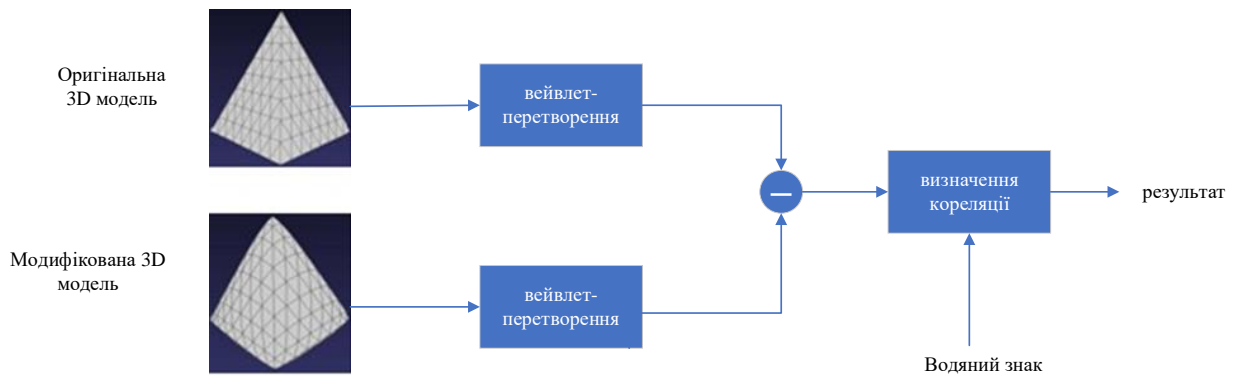


Рисунок 3.7 – Блок-схема для вилучення водяних знаків

3.2 Проведення експериментів

Вибір вейвлету залежить від характеру даних. Для зображень природи жоден конкретний вейвлет не має кращої якості порівняно з іншими вейвлетами. Те ж саме передбачається для моделей, створених за допомогою сканування об'єктів. Однак, якщо сітка створена синтетично, вибір вейвлету може мати величезний вплив на властивості компактного представлення вейвлету. Білінійний інтерпольований вейвлет буде краще працювати порівняно з іншими вейвлетами для розрідженого представлення 3D-даних. У запропонованому алгоритмі використовувався вейвлет CDF(2,2) для отримання багаторозрядного представлення моделі.

Як правило, вейвлет-перетворення, що використовується в 3D-мультимедіа, використовує схему підйому, щоб зробити його ефективним з точки зору пам'яті та швидкості. Існують різні типи вейвлет-перетворень, такі як сферичні вейвлети, Bsplines, CDF (2, 2) тощо. Завдяки локальній підтримці вейвлету CDF (2, 2) можна знайти відношення w/l , яке є відношенням вейвлет-вектора до вектора, що з'єднує дві парні вершини. Це відношення є нічим іншим, як параметром нерівномірності сітки. Тому використовуємо вейвлет-перетворення CDF (2, 2). Вейвлет-перетворення CDF (2, 2) – це біортогональне вейвлет-перетворення, яке використовує

схему підйому. Таким чином, воно є ефективним по пам'яті та швидкості. Локальна підтримка вейвлету CDF (2, 2) дорівнює 2. Він використовує лише сусідні парні вершини будь-якої вершини ODD. Завдяки цьому будь-які зміни в коефіцієнтах вейвлету відображаються лише локально. Нечіткі поверхні будуються так, як показано на рисунках 3.8 та 3.9, щоб показати нелінійність нечітких змінних.

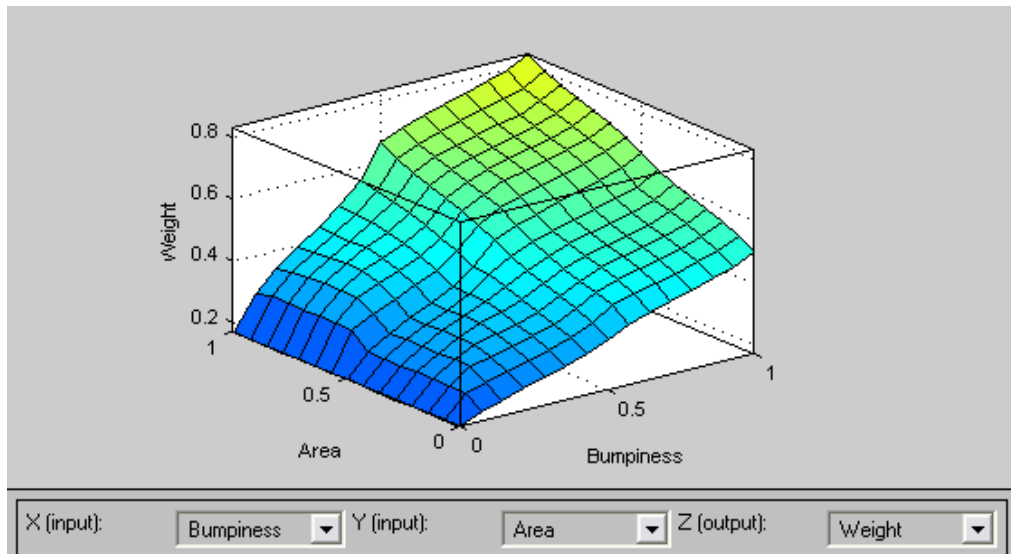


Рисунок 3.8 – Розмита поверхня для нерівностей і області

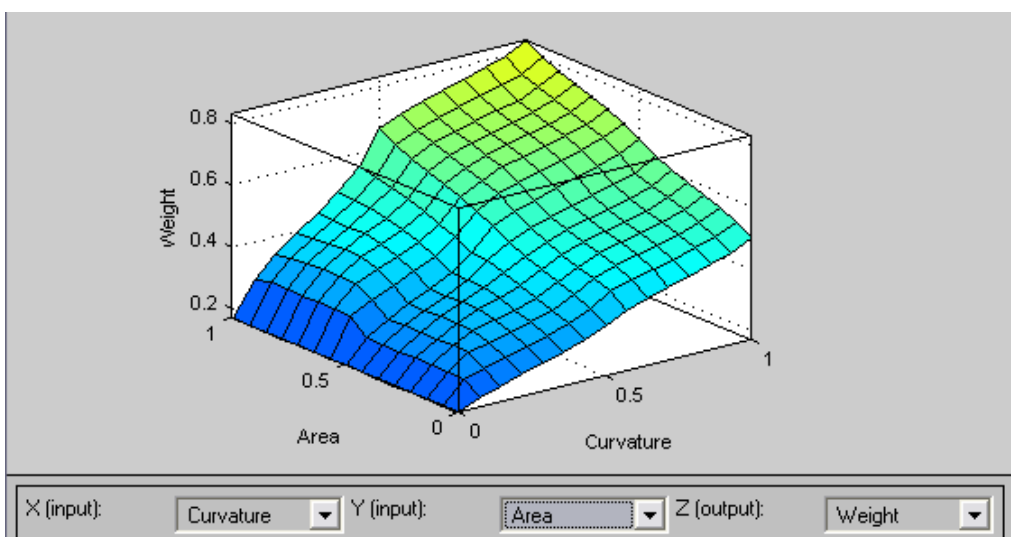


Рисунок 3.9 – Нечітка поверхня для кривизни та області

3.3 Оцінка ефективності

Для аналізу поведінки нечіткої маски для всіх трьох нечітких вхідних даних: кривизни, нерівностей та площі, використовувалися сітки, показані на рисунку 3.10, які мають різну форму. Деякі специфікації для цих моделей наведено в таблиці 3.1 Для вставки водяних знаків у сітку використовуються 8-розрядні зображення сірої шкали. Алгоритм було протестовано з різними зображеннями сірої шкали різного розміру для оцінки атак. Як показано в таблиці 3.2 та на рисунку 3.11, алгоритм є стійким до всіх видів атак і показує відмінні результати.

Таблиця 3.1 – Моделі, що використовуються для тестування нечіткої логіки

Модель	Кількість вершин	Кількість полігонів	Кількість вершин з водяними знаками
Smiley	1026	2048	576
Super Pyramid	16386	32768	10346
Doughnut	23040	46080	11780
Super Smiley	16386	32768	12046
Bumpy Doughnut	23040	46080	12364

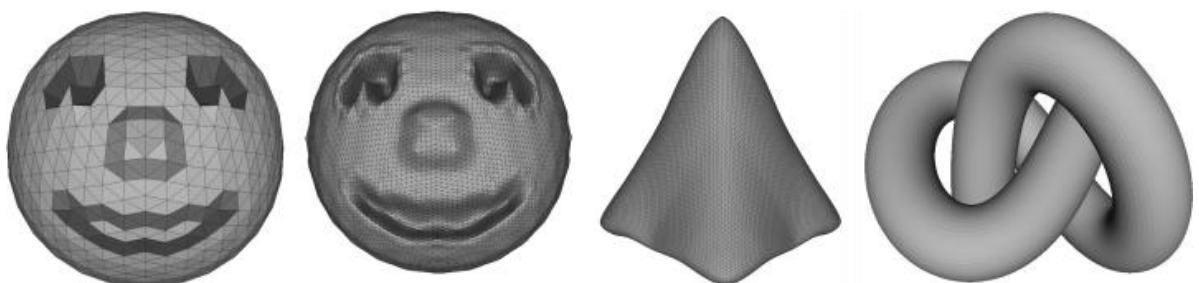


Рисунок 3.10 – Моделі, що використовуються для нечіткого тестування

Моделі, що використані для тестування, мали різну форму, щоб проаналізувати поведінку нечіткої маски для всіх трьох нечітких входів - кривизни, нерівностей і площі. Модель у формі кулі "смайлик" була використана для оцінки роботи нечітких правил для поверхонь з відносно плавними ступенями кривизни. Для оцінки кривизни з нерівностями використовувалася модель у формі пончика з низькою та високою роздільною здатністю. Пірамідальна модель також використовувалася для аналізу реакції нечіткої системи для поверхонь з відносно рівною геометрією, щоб можна було протестувати правила для полігональних трикутників більшої площі. Навіть якщо зловмисник використовує розбиття для збільшення кількості трикутних граней і, таким чином, зменшення площі трикутної грані, нечіткі входні параметри кривизни і нерівностей залишаються незмінними, оскільки геометрія поверхні залишається незмінною. Були також використані інші сітки з довільною геометрією для тестування стрільби за декількома нечіткими правилами одночасно. Однак для оцінки результатів та аналізу продуктивності були використані моделі лише з кривизною або лише з нерівностями.

Таблиця 3.2 – Моделі, що використовуються для тестування нечіткої логіки

Модель	Обертання, переміщення та масштабування	Додавання шуму 0,2	Згладжування (HC Laplacian Filter)	2-й водяний знак	Обрізання
Smiley	1	0.9829	0.9913	0.9995	0.9891
Super Pyramid	1	0.9919	0.9989	0.7108	0.9442
Doughnut	1	0.7988	0.9586	0.8365	0.9264
Super Smiley	1	0.8671	0.8985	0.8323	0.8011
Bumpy Doughnut	1	0.7144	0.8168	0.8332	0.9409

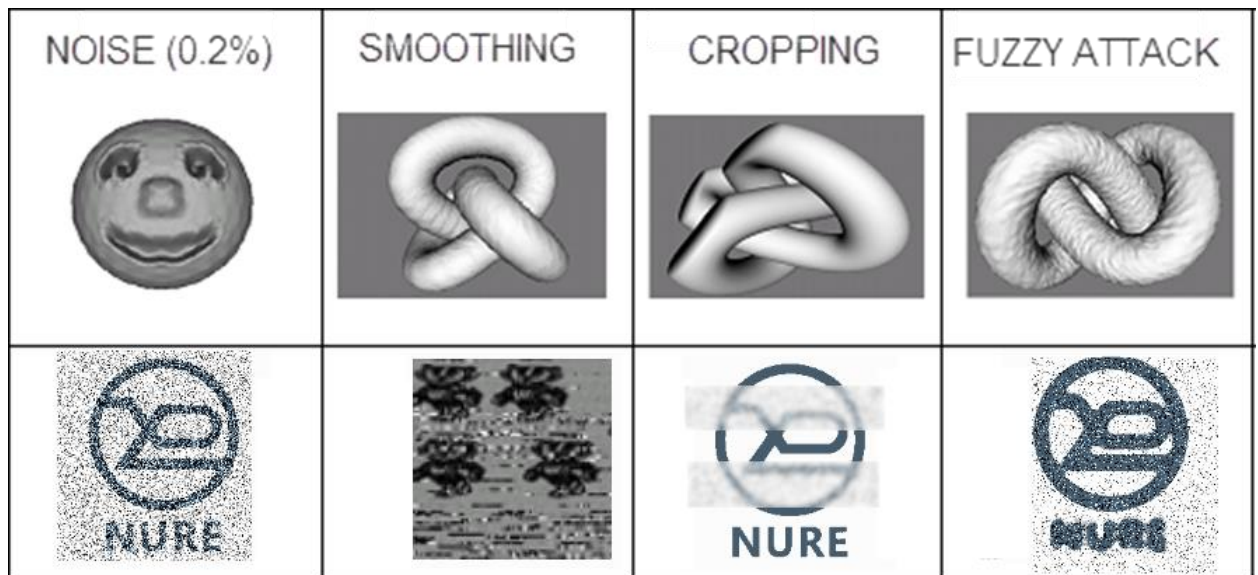


Рисунок 3.11 – Атаки на моделі з нечіткими водяними знаками

Для подальшої оцінки продуктивності на сітках з більшою кількістю граней було використано поділ для створення "суперсмайлика". Аналогічну процедуру було застосовано до сіток з меншою роздільною здатністю, таких як пончик та піраміда. Наступні атаки були застосовані до моделей з водяними знаками:

Обертання та Переклад: Алгоритм повністю інваріантний до атак обертання і перекладу. Зміна параметрів не впливає на відносну відстань між вершинами і, таким чином, величина вейвлет-коефіцієнтів залишається незмінною. Таким чином, наш алгоритм є інваріантним до обертання і трансляції.

Масштабування: Хоча масштабування змінює величину вейвлет-коефіцієнтів, але завдяки нормалізації моделі під час процесу вставки та вилучення водяного знаку, водяний знак не змінюється. Таким чином, наш алгоритм є інваріантним до обертання, перекладу, масштабування або комбінації геометричних перетворень.

Аналіз шуму: Як показано в таблиці 3.2, шум найбільше впливає на водяний знак у форматі bumpy doughnut та doughnut. Водяний знак менш чутливий до шуму у випадку плоских поверхонь і більш чутливий до шуму у

випадку нерівних поверхонь. Це пов'язано з тим, що в процесі накладання водяного знаку зміна ентропії вейвлет-коефіцієнтів є найбільшою для поверхонь з нерівностями та кривизною і найменшою для плоских поверхонь. Незважаючи на шумову атаку, витягнутий водяний знак залишається розпізнаваним у всіх випадках.

Згладжування: Атака згладжування впливає на нерівності моделі більше, ніж на кривизну. Це пояснюється тим, що це не що інше, як фільтр низьких частот, який видаляє високочастотну частину, яка і є нерівномірністю. Таким чином, на нерівності пончика це впливає сильніше, як візуально показано у таблиці 3.2.

Обрізання: У нашій системі водяний знак вставляється в модель рівномірно. Таким чином, навіть якщо модель обрізати, водяний знак не буде повністю знищено. Кількість знищених водяних знаків залежить від ступеня обрізання.

Другий водяний знак / Нечітка атака: До моделі з нечітким водяним знаком вставляється другий водяний знак з метою перезаписати існуючий водяний знак. Існуючий перший водяний знак випадковим чином розподілений по моделі, що ускладнює повне перезаписування існуючої моделі. Вставка другого водяного знаку не призвела до спотворення. Якщо поставлено умову не перезаписувати існуючі вершини з водяними знаками, нечітка система може підтримувати вставку декількох водяних знаків.

Перший водяний знак, витягнутий, як показано в таблиці 3.2, все ще можна розпізнати до певної міри.

ВИСНОВКИ

У результаті виконання кваліфікаційної роботи було досягнуто низку наукових і практичних результатів. Основні висновки дослідження наведені нижче:

- проведено детальний аналіз сучасних методів нанесення цифрових водяних знаків на тривимірні об'єкти. Визначено основні переваги та недоліки кожного методу, що дозволило виявити актуальні проблеми в цій галузі та окреслити напрямки для подальших досліджень;

- досліджено основи нечіткої логіки та її потенціал для застосування в обробці тривимірних об'єктів. Показано, що нечітка логіка може бути ефективним інструментом для адаптивного нанесення водяних знаків, дозволяючи враховувати різноманітні фактори, які впливають на якість та стійкість водяних знаків;

- розроблено новий метод нанесення цифрових водяних знаків на тривимірні об'єкти з використанням нечіткої логіки. Алгоритм забезпечує високу стійкість водяних знаків до різних видів атак, включаючи геометричні перетворення, компресію та додавання шуму, що є важливим для захисту 3D-об'єктів;

- реалізовано запропонований алгоритм у програмному середовищі та проведено його тестування на різних типах тривимірних об'єктів. Результати тестування підтвердили ефективність та надійність розробленого методу, демонструючи високу стійкість водяних знаків та мінімальний вплив на структуру і функціональність об'єктів.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. 3D Materials | 3D Textures | Photoreal Textures [Електронний ресурс].
– Режим доступу: https://www.a23d.co/textures/?gad_source=1&gclid=Cj0KCQjwxeuxBhC7ARIsAC7dS38P4aF2MBKju_1324GKH-qmTv4xd_NKw38Les59FeC8Gx-YsQLUqi4aAlrXEALw_wcB
2. TurboSquid: 3D Models for Professionals [Електронний ресурс]. –
Режим доступу: <https://www.turbosquid.com/>
3. Thingiverse [Електронний ресурс]. – Режим доступу:
<https://www.thingiverse.com/>
4. Autodesk 3ds Max: Create massive worlds and high-quality designs [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.autodesk.com/products/3ds-max/overview?term=1-YEAR&tab=subscription>
5. Blender [Електронний ресурс]. – Режим доступу: www.blender.org
6. ZBrush [Електронний ресурс]. – Режим доступу:
<https://www.maxon.net/en/zbrush>
7. FairPlay DRM – 5 Things to Know About DRM Technology [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://pallycon.com/blog/5-things-you-need-to-know-about-multi-drm-technology-part-3/>
8. Reading Between the Lines: Lessons from the SDMI Challenge. Scott A. Craver, Min Wu, Bede Liu, Adam Stubblefield, Ben Swartzlander, Dan W. Wallach, Drew Dean, and Edward W. Felten. Proc. of 10th USENIX Security Symposium, August 2001. [Електронний ресурс]. – Режим доступу:
<https://www.usenix.org/legacy/events/sec01/craver.pdf>
9. FBI makes arrest in 'Wolverine' uploading case [Електронний ресурс].
– Режим доступу: <https://www.cnet.com/culture/fbi-makes-arrest-in-wolverine-uploading-case/>
10. Beugnon, S., Itier, V., & Puech, W. (2022). 3D Watermarking. Multimedia Security 1: Authentication and Data Hiding, 219.

11. Ohbuchi, R., Masuda, H., Aono, M. (1997). Embedding data in 3D models. In: Steinmetz, R., Wolf, L.C. (eds) Interactive Distributed Multimedia Systems and Telecommunication Services. IDMS 1997. Lecture Notes in Computer Science, vol 1309. Springer, Berlin, Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/BFb0000334>

12. A. G. Bors, "Watermarking mesh-based representations of 3-D objects using local moments," in IEEE Transactions on Image Processing, vol. 15, no. 3, pp. 687-701, March 2006, doi: 10.1109/TIP.2005.863116

13. Wang, K., Lavoué, G., Denis, F., Baskurt, A. (2007). Three-Dimensional Meshes Watermarking: Review and Attack-Centric Investigation. In: Furon, T., Cayre, F., Doërr, G., Bas, P. (eds) Information Hiding. IH 2007. Lecture Notes in Computer Science, vol 4567. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-77370-2_4

14. S. Valette and P. Prost, "Wavelet-based multiresolution analysis of irregular surface meshes," in IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, vol. 10, no. 2, pp. 113-122, March-April 2004, doi: 10.1109/TVCG.2004.1260763

15. Narendra, M., Valarmathi, M.L. & Anbarasi, L.J. Watermarking techniques for three-dimensional (3D) mesh models: a survey. Multimedia Systems 28, 623–641 (2022). <https://doi.org/10.1007/s00530-021-00860-z>

16. Fausto Bernardini, Joshua Mittleman, Holly Rushmeier, Cláudio Silva, and Gabriel Taubin. The ball-pivoting algorithm for surface reconstruction. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 5:349–359, 1999.

17. M. Berg, O. Cheong, and M. Kreveld. Computational geometry: algorithms and applications. Springer, 2008.

18. Ameesh Makadia, Alexander IV Patterson, and Kostas Daniilidis. Fully automatic registration of 3D point clouds. Computer Vision and Pattern Recognition, IEEE Computer Society Conference on, 1:1297–1304, 2006.

19. P.J. Besl and N.D. McKay. A method for registration of 3-d shapes. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 14:239–256,

1992.

20. О.О ГАЛИЦЬКА, маг., В.О. МАРТОВИЦЬКИЙ, канд. техн. наук, О.В. СКИБА, маг., «ОГЛЯД ПІДХОДІВ ДО ЗАХИСТУ ТРИВИМІРНИХ МОДЕЛЕЙ ВІД НЕСАНКЦІОНОВАНОГО РОЗПОВСЮДЖЕННЯ», Радіотехніка, 2024, с. 95-99.