

<https://doi.org/10.31891/2219-9365-2024-77-33>

УДК 004.932.056.5(045)

САЛІЄВА Ольга

Вінницький національний технічний університет
<https://orcid.org/0000-0003-2388-7321>
salieva8257@gmail.com

БЕЗПАЛИЙ Кирило

Вінницький національний технічний університет
<https://orcid.org/0009-0008-0331-9312>
kyrylo.bezpalii@vntu.edu.ua

МОВЧАНЮК Мар'яна

Вінницький національний технічний університет
maryana.movchanyuk@gmail.com

ГУМЕНЮК В'ячеслав

Вінницький національний технічний університет
<https://orcid.org/0009-0004-0348-7616>
hvv@vntu.edu.ua

УДОСКОНАЛЕННЯ АЛГОРИТМУ ВБУДОВУВАННЯ ЦИФРОВОГО ВОДЯНОГО ЗНАКУ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЙОГО СТІЙКОСТІ ДО ГЕОМЕТРИЧНИХ ОПЕРАЦІЙ ПЕРЕТВОРЕННЯ У ТРИВИМІРНИХ МОДЕЛЯХ

Розвиток обчислювальних потужностей і методів візуалізації даних не лише сприяв широкому використанню тривимірних моделей, але й підвищив попит на них у різних галузях людської діяльності. Це, у свою чергу, призвело до виникнення таких проблем як порушення авторських прав та суперечок щодо автентичності власника, поширених через легкість піратського використання 3D-моделей. Ефективним рішенням для запобігання зазначених проблем є використання цифрових водяних знаків, які відіграють ключову роль у захисті від незаконного копіювання, модифікації та фальсифікації різних візуальних матеріалів. У свою чергу, алгоритми вбудовування та виявлення цифрових водяних знаків у тривимірних моделях повинні задовольняти ряд вимог, зокрема бути стійкими до різноманітних геометричних операцій перетворення, забезпечуючи тим самим надійність та ефективність у процесі обробки даних. У зв'язку із цим, у роботі пропонується удосконалити один із алгоритмів вбудовування цифрового водяного знаку, що використовує пошук опорних точок та базується на знаходженні оцінки різкої зміни площі. Для досягнення поставленої мети було внесено зміни до першого етапу роботи алгоритму шляхом застосування алгоритму 3D-розпізнавання реберних вершин, які є більш стабільними для вбудовування водяного знаку і, відповідно, їх пошук і визначення характеризуються високим рівнем надійності. Крім того, даний алгоритм має ряд переваг, зокрема: він є досить гнучким, оскільки підтримка може бути адаптована як глобально, так і локально; існує можливість його використання для будь-якого типу сітки, за умови вибору відповідного набору параметрів; стійкість до впливу шуму, який фільтрується під час процесу найкращого припасування. З метою підтвердження сильних сторін вдосконаленого алгоритму, було проведено його тестування на складній моделі та доведено, що він є більш стійким до низки поширених геометричних атак на тривимірні сітчасті моделі, та показує кращий результат, ніж оригінальний алгоритм пошуку опорних точок для вбудовування цифрового водяного знаку.

Ключові слова: цифровий водяний знак, тривимірна модель, стійкість, реберні вершини, геометричні операції перетворення.

SALIEVA Olha, BEZPALYI Kyrylo,

MOVCHANIUK Mariana, HUMENIUK Viacheslav

Vinnitsia National Technical University

IMPROVEMENT OF THE DIGITAL WATERMARK EMBEDDING ALGORITHM TO INCREASE ITS RESISTANCE TO GEOMETRIC TRANSFORMATION OPERATIONS IN THREE-DIMENSIONAL MODELS

The development of computing power and data visualization methods has not only facilitated the widespread use of 3D models, but also increased the demand for them in various fields of human activity. This, in turn, has led to problems such as copyright infringement and disputes over the authenticity of the owner, which are common due to the ease of pirating 3D models. An effective solution to prevent these problems is the use of digital watermarks, which play a key role in protecting against illegal copying, modification, and falsification of various visual materials. In turn, algorithms for embedding and detecting digital watermarks in three-dimensional models must meet a number of requirements, including being resistant to various geometric transformation operations, thereby ensuring reliability and efficiency in the data processing process. In this regard, this paper proposes to improve one of the digital watermark embedding algorithms that uses the search for landmarks and is based on finding an estimate of the abrupt change in area. To achieve this goal, the first stage of the algorithm was modified by applying a 3D edge vertex recognition algorithm, which is more stable for watermark embedding and, accordingly, their search and detection are characterized by a high level of reliability. In addition, this algorithm has a number of advantages, in particular: it is quite flexible, as the support can be adapted both globally and locally; it can be used for any type of mesh, provided that an appropriate set of parameters is chosen; it is less affected by noise that is filtered out during the best fit process. In order to confirm the strengths of the proposed improved algorithm, we tested it on a complex model and proved that it is more resistant to a number of common

geometric attacks on 3D mesh models and shows better results than the original algorithm for finding landmarks for embedding a digital watermark.

Keywords: database, digital watermark, three-dimensional model, stability, edge vertices, geometric transformation operations.

Постановка проблеми у загальному вигляді

та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

На сьогодні тривимірні моделі відіграють універсальну роль у творчій, технічній, аналітичній сферах та потребують забезпечення автентифікації, цілісності та захисту авторських прав. Вирішення зазначених проблем сприяє використанню цифрових водяних знаків, особливо невидимих, які вирізняються тим, що не впливають на візуальну сприйнятливості оригінальної тривимірної моделі та потребують знаходження ефективного балансу між їх надійністю, роботою у режимі реального часу та ємністю. Крім того, на ефективність застосування цифрових водяних знаків безпосередньо впливають геометричні перетворення. Тому особливий інтерес становлять дослідження, пов'язані із розробкою нових, або удосконаленням існуючих алгоритмів вбудовування цифрових водяних знаків для забезпечення їх стійкості. Виходячи з цього, у даній роботі слід дослідити відомі методи вбудовування водяних знаків для тривимірних моделей; проаналізувати їхні слабкі та сильні сторони; для підвищення стійкості невидимих водяних знаків від геометричних операцій перетворення розробити покращений алгоритм вбудовування водяних знаків у тривимірні моделі; запропонувати алгоритм, що реалізує вдосконалений метод; провести тестування розробленого алгоритму, оцінити його стійкість у порівнянні з досліджуваним алгоритмом.

Аналіз досліджень та публікацій

Останніми роками проводяться численні дослідження методів вбудовування цифрових водяних знаків у тривимірні моделі, які потребують ефективного захисту від різного типу атак. Так, у роботі [1] автори дослідили продуктивність цифрових водяних знаків, що піддаються атаці, яка складається з лінійної фільтрації з інваріантним зсувом та адитивного кольорового гауссівського шуму. У праці [2] запропоновано нову схему цифрового нанесення водяних знаків на тривимірну модель у просторовій області, яка базується на генерації трикутних смуг шляхом обходу 3D-сіткової моделі. Автори роботи [3] у своїй публікації відобразили розроблений алгоритм нанесення водяних знаків на полігональні сітки, при чому вставка водяного знаку досягається квантуванням дисперсії вершин. У дослідженні [4] було проведено поглиблений огляд методів нанесення водяних знаків на основі автентифікації для 3D-моделей у просторовій області та описано різні типи геометричних атак й методології, які допомагають виявити та локалізувати їх. У свою чергу, в роботі [5] запропоновано нову схему нульового водяного знаку для 3D-сіткових моделей, що базується на мультимедійних об'єктах.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми

Особливий інтерес представляє робота [6], у якій автори запропоновано нову схему нанесення водяних знаків на тривимірні трикутні сіткові моделі. Згідно даного алгоритму опорні точки з областей, що швидко змінюються, використовуються для унікального розбиття 3D-сіткової моделі на ділянки Вороного. Потім кожна ділянка Вороного проектується на опорну квадратну площину і генерується відповідне зображення полігону. Далі вбудовується водяний знак в область перетворення кожного зображення полігону. Модель 3D-сітки з водяними знаками отримується шляхом збурення вершин кожної ділянки відповідно до зображення діапазону з водяними знаками. Проте варто зазначити деякі слабкі сторони даного алгоритму, а саме: опорні точки, що вираховуються для заданої сітчастої моделі не завжди є надійними для вбудовування інформації, а також їх пошук та впорядкування може бути ускладнене геометричними атаками на модель. Тому у даній роботі пропонується використати для пошуку опорних точок алгоритм 3D-розпізнавання реберних вершин, який дозволить усунути вищезазначені недоліки.

Формулювання цілей статті

Метою дослідження є удосконалення алгоритму вбудовування цифрового водяного знаку для підвищення його стійкості до геометричних операцій перетворення у тривимірних моделях.

Виклад основного матеріалу

Розглянемо як працює запропонований у роботі [6] алгоритм вбудовування та виявлення водяного знаку.

На початковому етапі роботи алгоритму відбувається пошук опорних точок для вбудовування водяного знаку. З цією метою спочатку визначається окіл навколо вершин:

$$N(v_i) = \{v_j \mid |v_i v_j| > 0, i = 1, 2, \dots, N; j = 1, 2, \dots, N\}, \quad (1)$$

де $|v_i v_j| > 0$ – відношення, що показує зв'язок між вершиною v_i та вершиною v_j ;

N – загальна кількість вершин у сітковій моделі.

Для позначення кільцевого околу визначається α – кільцевий ($\alpha \neq 1$) окіл вершини v_i , значення якого регулює масштаб округу навколо неї.

Далі розраховується нормаль напрямку для обраної вершини (v_i):

$$\vec{n}_{v_i} = \frac{\sum_{j=1}^{N_i} v_j \in N(v_i) (\vec{v}_j - \vec{v}_m)}{N_i}, \quad (2)$$

де N_i – загальна кількість вершин, дотичних до вершини v_i ;

\vec{v}_m – середній вектор від усіх вершин до центру тривимірної сітчастої моделі;

\vec{n}_{v_i} – нормальний вектор v_i .

Після визначення напрямку нормалі до кожної вершини, відбувається процес оцінювання області 3D-сіткової моделі:

$$D(v_i) = \sum_{j=1}^{N_i} v_j \in N(v_i) \cos^{-1}(\vec{n}_{v_i}, \vec{n}_{v_j}), \quad (3)$$

де $\cos^{-1}(\vec{n}_{v_i}, \vec{n}_{v_j})$ – кут між напрямками нормалей вершин v_i та v_j , що визначає оцінку різкої зміни площини.

Далі обираються перші N_f вершин з найбільшим значенням $D(v_i)$ у якості особливих точок ($V_n (n = 1, 2, \dots, N_f)$), що надалі будуть використовуватися як центроїди для ділянок Вороного.

Наступним кроком є вимірювання геодезичної відстані між кожною вершиною та кожною особливою точкою:

$$P(v_i)_n = \text{Min}\{d_g(v_i, V_n), n = 1, 2, \dots, N_f\}, i = 1, 2, \dots, N, \quad (4)$$

де $d_g(v_i, V_n)$ – функція вимірювання для обчислення геодезичної відстані між вершиною v_i та опорною точкою V_n ;

функція $\text{Min}\{\}$ виконує пошук мінімального значення, яке використовується для знаходження опорної точки, що має мінімальну геодезичну відстань з v_i .

Надалі створюється зображення діапазону для кожної ділянки Вороного. При цьому задається опорна квадратна площина перпендикулярна напрямку нормалі до центроїда V_n , на якій визначається система координат $x - y$. Потім обчислюється відстань від кожної опорної точки $r(x_n, y_n)$ до поверхні сітчастої моделі та використовується метод лінійної нормалізації для перетворення цих відстаней у значення, що належать діапазону $[0; 255]$. Це дозволяє створити матрицю розміром $N_x \times N_y$, яку також називають зображенням діапазону.

Далі виконується процес вбудовування водяного знаку, що включає в себе дискретне косинусне перетворення:

$$D_{nw} = D_n + \beta \cdot W, \quad (5)$$

де D_n – вибрані високочастотні коефіцієнти з оригінального зображення діапазону;

β – сила вбудовування;

D_{nw} – високочастотні коефіцієнти з водяним знаком.

З метою створення зображення у діапазоні із вбудованим водяним знаком виконується обернене дискретне косинусне перетворення.

Після вбудовування водяного знаку в зображення діапазону ділянки P_n , деякі значення пікселів можуть змінитися, що впливає на відстань між опорними точками та відповідними точками їх перетину.

Зазначимо, що процес виявлення водяного знаку є зворотнім до його вбудовування.

Таким чином, аналізований алгоритм базується на оцінюванні різкої зміни площі. Проте опорні точки сітчастої моделі не завжди є надійними для вбудовування інформації, а також їх пошук та впорядкування може бути ускладнене геометричними атаками на модель. Щоб усунути зазначені недоліки варто для пошуку опорних точок використати алгоритм 3D-розпізнавання реберних вершин [7], які є більш стабільними для вбудовування водяного знаку, а їх визначення – надійнішим, ніж у описаному алгоритмі.

Розглянемо як працює алгоритм 3D-розпізнавання реберних вершин [7].

Дослідимо сіткову модель M , яка є сукупністю ребер $e_i \in M (i = 1, 2, \dots, R)$, де R – множина всіх ребер моделі, а \vec{e}_i – вектор, що являє собою ребро, яке складається з двох вершин. Далі необхідно побудувати окіл навколо двох вершин ребра, з радіусом α та визначити площину параметрів, яка перпендикулярна до вектора \vec{e}_i та перетинає його середину (рис. 1 (а)). Точки знаходяться як перетин площини з набором сусідніх ребер (рис. 1 (б)). В подальшому необхідно вибрати два поліноми: один для вершин, розташованих по один бік області параметрів, а інший – для тих, що розташовані по інший бік даної області (рис. 1 (в)).

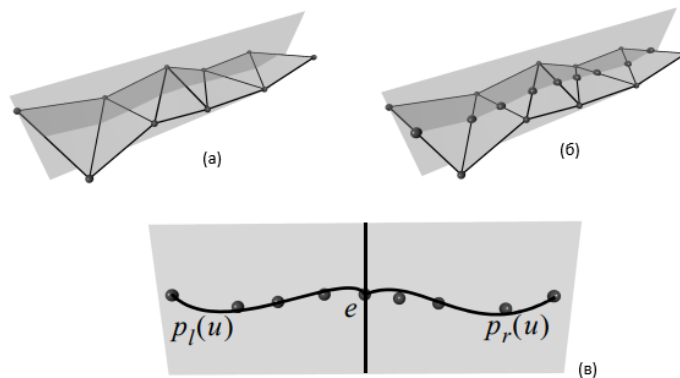


Рис. 1. Методи визначення реберної вершини: (а) – площина параметрів, (б) – перетин між площиною параметрів і сіткою, (в) – два многочлени і кут між їхніми дотичними в точці e [7]

Вага, яка призначається поліномам, визначається пропорційно куту між дотичними до двох кривих, розрахованими в точці параметра:

$$w(e_i) = \cos\left(\frac{(1, p'_l(e_i))}{\|(1, p'_l(e_i))\|} \cdot \frac{(1, p'_r(e_i))}{\|(1, p'_r(e_i))\|}\right)^{-1} \quad (6)$$

де $p'_l(e_i)$ – похідна лівого полінома від ребра e_i ;

$p'_r(e_i)$ – похідна правого полінома від ребра e_i ;

$w(e_i)$ – вага ребра.

Отримані кутові ребра містять кутові вершини моделі, які будуть використовуватися для вбудовування цифрового водяного знаку.

Додатковий ступінь свободи отримується за допомогою степеня підгонки полінома, який може бути адаптований відповідно до розміру підтримки оператора.

Важливою перевагою цього підходу є його гнучкість, оскільки підтримка може бути адаптована як на глобальному, так і на локальному рівні. Таким чином, послаблюється вплив шуму, який відфільтровується під час процесу найкращого припасування. Крім того, даний підхід можна використовувати для будь-якого типу сітки, за умови вибору відповідного набору параметрів.

Розробимо алгоритм, що реалізує вдосконалений метод вбудовування цифрового водяного знаку у тривимірну модель. Робота даного алгоритму складається з таких кроків:

Крок 1. Обробка прийнятої сітчастої моделі та її підготовка для виконання вбудовування водяного знаку.

Крок 1.1. Отримання моделі.

Крок 1.2. Генерація водяного знаку з випадкових чисел, що вибираються з гауссівського розподілу з нульовим середнім значенням і дисперсією 1.

Крок 1.3. Розділення моделі на масив ребер.

Крок 1.4. Визначення середніх нормалей для всіх вершин моделі.

Крок 2. Визначення кутових ребер.

Крок 2.1. Визначення околу з певним радіусом для обраного ребра.

Крок 2.2. Створення площі з середини обраного ребра.

Крок 2.3. Визначення усіх точок перетину площі з ребрами в околі.

Крок 2.4. Створення двовимірної системи координат з центром у вибраній в середині побудованої площини точці.

Крок 2.5. Перетворення визначених тривимірних координат точок перетину з площиною у двовимірні координати даної площі.

Крок 2.6. Визначення лівого та правого поліномів.

Крок 2.7. Обрахунок кута між двома поліномами.

Крок 3. Вибір опорних вершин.

Крок 3.1. Визначення сили ребра. Якщо значення сили ребра вище за ϕ ($\phi = 0^\circ, \dots, 180^\circ$), то дане ребро є найсильнішим в околі.

Крок 3.2. Визначення опорної вершини як такої, що з'єднана з сильним ребром.

Крок 4. Процес підготовки ділянки Вороного.

Крок 4.1. Побудова площини перпендикулярної до нормалі V_n .

Крок 4.2. Побудова сітки двовимірних координат на даній площині.

Крок 4.3. Розбиття отриманої двовимірної сітки координат на рівномірні проміжки, для утворення квадратних ділянок.

Крок 4.4. Визначення відстані між опорною точкою на моделі та точкою перетину в двовимірній сітці.

Крок 4.5. Перетворення відстаней у діапазон від 0 до 255.

Крок 5. Вбудовування водяного знаку в сітчасту модель.

Крок 5.1. Розділення зображення діапазону на 8 блоків.

Крок 5.2. Застосування дискретного косинусного перетворення до кожного блоку.

Крок 5.3. Знаходження в кожному блоці високочастотних коефіцієнтів, що будуть використовуватися для вбудовування інформації про водяний знак.

Крок 5.4. Використання оберненого дискретного косинусного перетворення.

Крок 5.5. Збурення точок в околі, для внесення водяного знаку з отриманого зображення.

Крок 6. Витягування та перевірка водяного знаку з моделі.

Крок 6.1. Отримання таких параметрів як: високочастотні коефіцієнти, що використовувалися для вбудовування водяного знаку, модель з водяним знаком, водяний знак та значення T , що використовуються для порівняння водяних знаків.

Крок 6.2. Обробка та знаходження відповідних опорних точок.

Крок 6.3. Обрахунок зображення діапазону з якого витягуються високочастотні коефіцієнти.

Крок 6.4. Витягування водяного знаку за допомогою формули:

$$W_n^* = \frac{D_{nw}^* - D_n}{\beta},$$

де D_{nw}^* – високочастотні коефіцієнти водяного знаку, отримані із зображення діапазону області P_n з водяним знаком;

D_n – високочастотні коефіцієнти, отримані із вихідного зображення діапазону області P_n ;

W_n^* – водяний знак, витягнутий із області P_n .

Крок 6.5. Отримання остаточного водяного знаку за формулою:

$$w_i^* = \frac{\sum_{n=1}^{N_f} w_{in}^*}{N_f}, i = 1, 2, \dots, L,$$

де w_{in}^* – i -тий біт водяного знаку, витягнутий з області P_n ;

w_i^* – i -тий біт кінцевого водяного знаку,

L – довжина водяного знаку.

Крок 6.6. Отриманий водяний знак порівнюється з оригіналом за допомогою формули:

$$c(w, w^*) = \frac{\sum_{i=1}^L (w_i - \bar{w})(w_i^* - \bar{w}^*)}{\sqrt{\sum_{i=1}^L (w_i - \bar{w})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^L (w_i^* - \bar{w}^*)^2}},$$

де \bar{w} – середнє значення оригінального водяного знаку;

\bar{w}^* – середнє значення вилученого водяного знаку.

Крок 6.6.1. Якщо отримане значення більше за поріг T , то водяний знак вбудований в модель.

Крок 6.6.2. Якщо отримане значення менше за поріг T , то водяний знак відсутній в моделі.

Доведемо, що вдосконалений алгоритм є більш стійким до геометричних атак та надійнішим, ніж оригінальний алгоритм пошуку опорних точок для вбудовування водяного знаку.

Проведемо тестування запропонованого алгоритму за допомогою виконання різних атак на обрані тривимірні моделі (рис. 2).

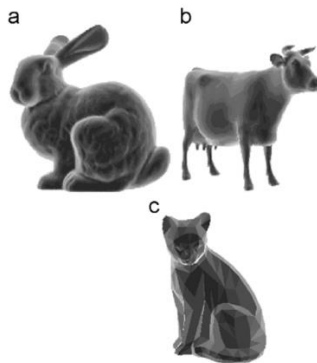


Рис. 2. Моделі, що використовується для тестування вдосконаленого методу: (а) модель зайця, (б) модель корови та (с) модель кота

Для оцінювання невидимості та стійкості буде використано пікове відношення сигнал/шум (PSNR), яке визначатиметься між початковою моделлю та моделлю із водяним знаком:

$$PSNR = 10 \log_{10} \frac{N \cdot \|\vec{v}\|_{max}^2}{\sum_{i=1}^N \|\vec{v}_i^* - \vec{v}_i\|^2}, \quad (7)$$

де \vec{v}_i – вершина вихідної моделі;

\vec{v}_i^* – відповідна вершина моделі з водяним знаком;

N – загальна кількість вершин моделі;

$\|\vec{v}\|_{max}^2$ – найвіддаленіша від центру вершина вихідної моделі.

Відповідно до складності сіток, кількість ділянок поділу для моделей складатиме 20, 15 і 8.

Для початкового та вдосконаленого алгоритмів розрахуємо значення $PSNR$ і таких параметрів як: $N_x \times N_y$ – розмір зображення діапазону, L – довжина водяного знаку, α – площа околу, β – сила вбудовування водяного знаку (табл. 1).

Таблиця 1

Значення параметрів моделей обраних для тестування алгоритмів

Модель	Вершини	Полігони	Ділянки	$N_x \times N_y$	L	α	β	PSNR (дБ) ориг. [6]	PSNR (дБ) вдоск.
Заєць	362272	725000	20	80 × 80	20	5	0,1	88.6837	88.3561
Корова	3406	6952	15	36 × 36	30	3	0,05	87.8950	88.1424
Кіт	418	805	8	20 × 20	15	2	0,01	86.5972	86.9217

Проаналізувавши отримані результати, бачимо, що для обох алгоритмів значення PSNR перевищує 86 дБ. Це свідчить про те, що досліджувані алгоритми для вбудовування водяних знаків мають хорошу непомітність.

Оцінимо результативність захисту від атак:

$$c(w, w^*) = \frac{\sum_{i=1}^L (w_i - \bar{w})(w_i^* - \bar{w}^*)}{\sqrt{\sum_{i=1}^L (w_i - \bar{w})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^L (w_i^* - \bar{w}^*)^2}} \quad (8)$$

де \bar{w} – середнє значення оригінального водяного знаку;

\bar{w}^* – середнє значення вилученого водяного знаку.

Розглянемо такі геометричні атаки як: обрізання, спрощення, додавання шуму та комбінація атаки спрощення з обрізанням. Результати тестування стійкості проти зазначених атак наведено у таблиці 2.

Таблиця 2

Результати тестування стійкості проти досліджуваних атак

Атака обрізання						
Метод	Відсоток моделі	Заєць $c(w, w^*)$	Відсоток моделі	Корова $c(w, w^*)$	Відсоток моделі	Кіт $c(w, w^*)$
1	2	3	4	5	6	7
Початковий [6]	20%	0.9118	20%	0.8996	5%	0.9411
Вдосконалений		0.9432		0.9253		0.9702
Початковий [6]	50%	0.7021	50%	0.6812	25%	0.7521
Вдосконалений		0.7735		0.7236		0.8062
Атака спрощення						
1	2	3	4	5	6	7
Початковий [6]	10%	0.9732	10%	0.9517	5%	0.9441
Вдосконалений		0.9924		0.9843		0.9524
Початковий [6]	30%	0.8657	30%	0.8433	10%	0.8827
Вдосконалений		0.9135		0.8712		0.9021
Початковий [6]	50%	0.7595	45%	0.6727	20%	0.7993
Вдосконалений		0.7957		0.7004		0.8163
Атака додавання шуму						
1	2	3	4	5	6	7
Початковий [6]	0.15%	0.9833	0.15%	0.9704	0.05%	0.9538
Вдосконалений		0.9892		0.9794		0.9642
Початковий [6]	0.5%	0.9389	0.45%	0.9121	0.1%	0.8689
Вдосконалений		0.9535		0.9203		0.8874
Комбінація атаки спрощення з обрізанням						
1	2	3	4	5	6	7
Початковий [6]	80%+30%	0.6701	80%+30%	0.6259	95% + 10%	0.7301
Вдосконалений		0.7024		0.6335		0.7394

Аналізуючи отримані дані, можна зробити висновок, що при використанні вдосконаленого алгоритму для вбудовування водяного знаку у складну модель, даний водяний знак залишається стійким навіть в тих випадках коли спрощення сітки досягало 15%, амплітуда вектору шуму досягала 0,035%, або поки модель не була обрізана на 30%.

У свою чергу, значення коефіцієнта кореляції перевищують 0,5 після того, як моделі з водяним знаком були атаковані спрощенням сітки, додаванням шуму та обрізанням. З отриманих значень $c(w, w^*)$,

можна зробити висновок, що вдосконалений метод є більш захищеним та ефективнішим, ніж початковий метод.

Таким чином, запропонований вдосконалений алгоритм нанесення водяних знаків є більш стійким до низки поширених геометричних атак на тривимірні сітчасті моделі, та показує кращий результат, ніж оригінальний алгоритм пошуку опорних точок для вбудовування водяного знаку.

Обговорення результатів та перспективи подальшого розвитку досліджень

Отримані результати свідчать, що за рахунок заміни першого етапу роботи оригінального алгоритму вбудовування водяних знаків у тривимірні моделі, а саме завдяки впровадженню алгоритму 3D-розпізнавання реберних вершин для пошуку опорних точок, було забезпечено стійкість вдосконаленого алгоритму до геометричних атак, що робить його надійнішим порівняно з початковим методом пошуку опорних точок для вбудовування водяного знаку. Проте подальших досліджень потребує визначення методів адаптації вдосконаленого алгоритму для роботи з динамічними тривимірними моделями, що змінюються з часом.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

У даній роботі досліджено алгоритм вбудовування цифрових водяних знаків для тривимірних моделей, який використовує пошук опорних точок та базується на знаходженні оцінки різкої зміни площі. Визначено недолік роботи першого етапу даного алгоритму, який полягає у тому, що опорні точки не завжди є надійними для вбудовування інформації. Крім того, геометричні атаки на 3D-модель ускладнюють їх пошук та впорядкування. Враховуючи вказані прогалини, було удосконалено досліджуваний алгоритм шляхом впровадження алгоритму 3D-розпізнавання реберних вершин, для знаходження більш стійких опорних точок, покращуючи таким чином стійкість невидимого водяного знаку до геометричних операцій перетворення у тривимірних моделях. Також було розроблено алгоритм, що реалізує вдосконалений метод вбудовування цифрового водяного знаку в тривимірну модель та проведемо тестування запропонованого алгоритму за допомогою виконання різних атак на обрані 3D-моделі. Результати тестування, що включають порівняння з початковим методом та визначення непомітності за допомогою PSNR, свідчать про те, що вдосконалений алгоритм проявляє більшу стійкість до геометричних атак порівняно з початковим методом. А саме, стійкість водяного знаку, вбудованого у складну тривимірну модель, залишається високою при спрощенні сітки до 15%, амплітуді шуму до 0,035% та обрізці моделі на 30%. Таким чином, на основі вдосконаленого алгоритму вбудовування водяних знаків для 3D-моделей було досягнуто підвищення стійкості невидимих цифрових водяних знаків до геометричних операцій перетворення.

Література

1. Su J. K., Eggers J. J., Girod B. Analysis of digital watermarks subjected to optimum linear filtering and additive noise. *Signal Processing*. 2001. Vol. 81, no. 6. P. 1141–1175. URL: [https://doi.org/10.1016/s0165-1684\(01\)00038-x](https://doi.org/10.1016/s0165-1684(01)00038-x)
2. Ashourian M., Enteshari R., Jeonghee Jeon. Digital watermarking of three-dimensional polygonal models in the spherical coordinate system. *Proceedings Computer Graphics International*, 2004., Greece. URL: <https://doi.org/10.1109/cgi.2004.1309270>
3. Robust Watermarking of Polygonal Meshes Based on Vertex Norms Variance Distortion / Y. Ben Amar та ін. *Journal of Global Information Management*. 2017. Vol. 25, no. 4. P. 46–60. URL: <https://doi.org/10.4018/jgim.2017100104>
4. Borah S., Borah B. Watermarking Techniques for Three Dimensional (3D) Mesh Authentication in Spatial Domain. *3D Research*. 2018. Vol. 9, no. 3. URL: <https://doi.org/10.1007/s13319-018-0194-7>
5. Wang X., Zhan Y. A zero-watermarking scheme for three-dimensional mesh models based on multi-features. *Multimedia Tools and Applications*. 2017. Vol. 78, no. 19. P. 27001–27028. URL: <https://doi.org/10.1007/s11042-017-4666-1>
6. Ai Q.S., Liu Q., Zhou Z.D., Yang L., Xie S.Q. A new digital watermarking scheme for 3D triangular mesh models. *Signal Processing*. 2009. Vol. 89, no. 11. – P. 2159–2170. URL: <https://dl.acm.org/doi/10.1016/j.sigpro.2009.04.031>
7. Hubeli A., Gross M. Multiresolution Feature Extraction from Unstructured Meshes. *IEEE Visualization*. 2001. – 8 p. URL: https://www.researchgate.net/publication/220943458_Multiresolution_Feature_Extraction_from_Unstructured_Meshes

References

1. Su J. K., Eggers J. J., Girod B. Analysis of digital watermarks subjected to optimum linear filtering and additive noise. *Signal Processing*. 2001. Vol. 81, no. 6. P. 1141–1175. URL: [https://doi.org/10.1016/s0165-1684\(01\)00038-x](https://doi.org/10.1016/s0165-1684(01)00038-x)
2. Ashourian M., Enteshari R., Jeonghee Jeon. Digital watermarking of three-dimensional polygonal models in the spherical coordinate system. *Proceedings Computer Graphics International*, 2004., Greece. URL: <https://doi.org/10.1109/cgi.2004.1309270>

3. Robust Watermarking of Polygonal Meshes Based on Vertex Norms Variance Distortion / Y. Ben Amar та ін. *Journal of Global Information Management*. 2017. Vol. 25, no. 4. P. 46–60. URL: <https://doi.org/10.4018/jgim.2017100104>
4. Borah S., Borah B. Watermarking Techniques for Three Dimensional (3D) Mesh Authentication in Spatial Domain. *3D Research*. 2018. Vol. 9, no. 3. URL: <https://doi.org/10.1007/s13319-018-0194-7>
5. Wang X., Zhan Y. A zero-watermarking scheme for three-dimensional mesh models based on multi-features. *Multimedia Tools and Applications*. 2017. Vol. 78, no. 19. P. 27001–27028. URL: <https://doi.org/10.1007/s11042-017-4666-1>
6. Ai Q.S., Liu Q., Zhou Z.D., Yang L., Xie S.Q. A new digital watermarking scheme for 3D triangular mesh models. *Signal Processing*. 2009. Vol. 89, no. 11. – P. 2159–2170. URL: <https://dl.acm.org/doi/10.1016/j.sigpro.2009.04.031>
7. Hubeli A., Gross M. Multiresolution Feature Extraction from Unstructured Meshes. *IEEE Visualization*. 2001. – 8 p. URL: https://www.researchgate.net/publication/220943458_Multiresolution_Feature_Extraction_from_Unstructured_Meshes