

Міністерство освіти і науки України  
Вінницький національний технічний університет

ДУДНИК ОЛЕКСАНДР ОЛЕКСАНДРОВИЧ

УДК 004.925.4

МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ПІДВИЩЕННЯ РЕАЛІСТИЧНОСТІ ТА  
ПРОДУКТИВНОСТІ ТЕКСТУРУВАННЯ У СИСТЕМАХ КОМП'ЮТЕРНОЇ  
ГРАФІКИ

Спеціальність 05.13.05 – «Комп'ютерні системи та компоненти»

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Дисертацією є рукопис.

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

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор,  
**Романюк Олександр Никифорович,**  
Вінницький національний технічний університет,  
Перший проректор з науково-педагогічної роботи по  
організації навчального процесу та його науково-  
методичного забезпечення

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор,  
**Башков Євген Олександрович,**  
ДВНЗ «Донецький національний технічний  
університет»,  
проректор з наукової роботи

доктор технічних наук, професор,  
**Антощук Світлана Григорівна,**  
Одеський національний політехнічний університет,  
директор Інституту комп'ютерних систем

Захист відбудеться «12» жовтня 2018 р. о 10<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 05.052.01 у Вінницькому національному технічному університеті за адресою: 21021, Україна, м. Вінниця, вул. Хмельницьке шосе, 95, ГНК, ауд. 210.

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

Автореферат розісланий «3» вересня 2018 р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради

С. М. Захарченко

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Обґрунтування вибору теми дослідження.** Сучасний етап розвитку комп'ютерних систем характеризується широким використанням комп'ютерної візуалізації, яка є ефективним засобом підтримки двостороннього каналу взаємодії між комп'ютером і користувачем. Найвищу реалістичність візуального відтворення об'єктів і процесів реального світу забезпечує тривимірна комп'ютерна графіка. Оскільки рівень продуктивності графічних засобів забезпечує можливість високореалістичного відтворення тривимірних об'єктів, то вимоги до рівня складності моделей та точності відображення високодеталізованих поверхонь постійно зростають.

У комп'ютерних системах високу ефективність візуалізації забезпечують методи та засоби, що дають змогу оптимально використовувати обчислювальні ресурси графічної системи для забезпечення високого рівня реалістичності відтворення графічних зображень. Одним із таких засобів є текстурування, яке дозволяє врахувати локальні особливості поверхні без надмірного ускладнення геометрії моделі. Процедури накладання текстур успішно застосовують для відтворення на поверхні об'єктів кольорів, фактури, нерівностей, імітації відбиття світла та інших візуальних властивостей.

Сьогодні часто застосовують процедурне текстурування, яке має обмежені галузі застосування, оскільки не забезпечує можливості відтворення локальних особливостей поверхні довільної форми та розмірів. Альтернативними є методи, які передбачають накладання на поверхню об'єктів попередньо сформованих фрагментів зображень.

Текстурування є одним із найскладніших етапів процесу кінцевої візуалізації, оскільки для кожної точки поверхні визначаються координати в дискретному просторі та значення інтенсивності кольору з урахуванням освітлення. Сучасні методи текстурування для визначення кольору пікселя враховують значення не одного, а відразу кількох текселів, що значно впливає на час формування графічних сцен і обмежує можливості реалізації динамічного та інтерактивного режимів.

Для забезпечення високої реалістичності формування графічних сцен використовують не тільки кольорові текстурні карти, а і допоміжні карти, наприклад, карти висот, нормалей, відстаней і т.д., що дозволяє реалістично відтворити рельєфні особливості поверхонь. Це суттєво ускладнює обчислювальний процес і призводить до зниження продуктивності візуалізації.

Таким чином, існуючі методи високоточного накладання текстур характеризуються суттєвою обчислювальною складністю, що в значній мірі впливає на час формування графічних зображень. Тому актуальними є питання підвищення продуктивності методів і засобів текстурування.

Точність визначення кольорів пікселів на етапі текстурування має найбільший вплив на реалістичність вихідного зображення, підвищення якої передбачає розробку нових методів і засобів накладання текстур.

Для існуючих методів накладання текстур характерні візуальні артефакти, пов'язані з неточностями під час зіставлення дискретних просторів текстури та екрана.

Підвищення реалістичності формування зображень можна досягти при врахуванні положення спостерігача, що дасть можливість точнішого відтворення перспективи сцени, тому важливими є питання розробки відповідних методів текстурування.

При формуванні графічних сцен реалізують незалежно окремі процедури текстурування, такі як визначення текстурних координат, фільтрація текстур, визначення інтенсивності кольорів, накладання рельєфу тощо. Поєднання цих процедур нерідко призводить до появи небажаних візуальних ефектів, оскільки при реалізації одних процедур не враховують особливостей інших, або до зниження продуктивності, оскільки має місце дублювання обчислень. Тому важливими є питання розробки комбінованих методів накладання текстур.

Формування високореалістичних графічних зображень у реальному часі та в інтерактивному режимі висуває жорсткі вимоги до продуктивності текстурування. При цьому використання простих методів накладання текстур неприйнятне для формування реалістичних зображень.

Тому актуальними є питання підвищення продуктивності та реалістичності формування графічних сцен, оскільки існуючі методи текстурування не задовольняють потреби багатьох галузей застосування тривимірної комп'ютерної графіки. Це передбачає розробку нових методів і засобів текстурування.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Результати досліджень були використані для розробки системи візуального відтворення біомедичних даних при реалізації НДР «Система автоматизованої багатофункціональної лазерної поляритмії плівок плазми крові людини для діагностики патологічних змін молочних залоз» (номер державної реєстрації 0116U004709).

**Мета та завдання дослідження.** Метою роботи є підвищення продуктивності текстурування за рахунок зменшення складності обчислень, а також реалістичності за рахунок точнішого визначення кольорів пікселів.

Основними задачами дослідження є:

- провести аналіз існуючих методів і засобів накладання текстур для визначення напрямків підвищення їх продуктивності та реалістичності;
- запропонувати нові:
  - методи підвищення продуктивності перспективно-коректного текстурування;
  - методи підвищення реалістичності та продуктивності анізотропної фільтрації текстур і рельєфного текстурування;
- розробити програмні компоненти та систему візуалізації на основі запропонованих методів;
- провести експериментальні дослідження розроблених засобів текстурування.

**Об'єкт дослідження** – процес кінцевої візуалізації тривимірних об'єктів у системах комп'ютерної графіки.

**Предмет дослідження** – методи та засоби текстурування тривимірних графічних об'єктів.

**Методи дослідження.** У процесі досліджень використовувались: теорія чисел та чисельних методів, теорія диференціально-інтегрального числення,

лінійна алгебра, методи аналітичної геометрії для розробки моделей та методів текстурування тривимірних об'єктів; комп'ютерне моделювання для аналізу та перевірки отриманих теоретичних положень.

#### **Наукова новизна отриманих результатів:**

1. Уперше запропоновано метод накладання текстур, особливість якого полягає у виконанні процедурних операцій в об'єктному просторі та фільтрації в площині екрана, що не потребує виконання анізотропної фільтрації текстур, і, як наслідок, дає можливість підвищити продуктивність формування графічних сцен до 30%.
2. Уперше запропоновано математичну модель проекції екранного пікселя в текстурний простір, яка враховує зміну форми пікселя при перспективному проектуванні для реалізації вагової функції при анізотропній фільтрації текстур, що дозволило підвищити точність визначення кольорів пікселів.
3. Уперше запропоновано комбінований метод виконання рельєфного текстурування з використанням технології parallax mapping та анізотропної фільтрації, що дозволяє підвищити реалістичність формування графічних сцен за рахунок урахування рельєфу поверхні при анізотропній фільтрації.
4. Запропоновано модифікацію методу Хекберта, у якому використано ітераційні формули для визначення координат текселів, що дозволило зменшити кількість операцій додавання та множення для визначення текстурних координат пікселя, і, як наслідок, підвищити продуктивність методу до 26%.
5. Подальшого розвитку отримав метод анізотропної фільтрації текстур, в якому при перспективно-коректному текстуруванні використано нові формули для прискореного обчислення параметрів рівняння еліпса, що дозволяє підвищити продуктивність анізотропної фільтрації текстур до 18% за рахунок зменшення кількості арифметичних операцій.
6. Подальшого розвитку отримав метод Донеллі, в якому, на відміну від існуючого, при формуванні карти відстаней до поверхні враховуються умови видимості текселів, що дозволило зменшити кількість ітерацій трасування видового вектора та підвищити продуктивність методу до 11%.

**Практичне значення отриманих результатів** полягає в тому, що на основі отриманих в дисертації теоретичних положень запропоновано алгоритми та розроблено програмні засоби текстурування для комп'ютерних систем високореалістичної візуалізації тривимірних зображень.

**Особистий внесок здобувача.** Усі наукові результати, викладені у дисертаційній роботі, отримані автором особисто. У друкованих працях, опублікованих у співавторстві, автору належать такі результати: формули для обчислення об'єму відсікання пікселя [1]; метод підвищення реалістичності зафарбовування при просторово-варіативному розміщенні полігонів [2]; метод анізотропної фільтрації текстур із використанням спеціальних текстурних карт для визначення вагових коефіцієнтів текселів [3]; метод анізотропної фільтрації з використанням вагових функцій [4]; ітераційні формули для визначення текстурних координат на основі методу Хекберта [5]; метод анізотропної фільтрації з використанням кешування [6]; метод текстурування з виконанням процедурних операцій в об'єктному просторі [7]; реалізація конвеєра рендерингу засобами

обчислювальних шейдерів [8]; метод виконання анізотропної фільтрації текстур у поєднанні з технологією parallax mapping [9]; модифікований метод parallax mapping з використанням карти відстаней до поверхні [10]; метод підвищення продуктивності parallax mapping з використанням спеціальної МІР-піраміди [11]; аналіз методу моделювання поверхонь на основі функцій збурення [12]; аналіз особливостей побудови графічних акселераторів [13]; метод підвищення продуктивності анізотропної фільтрації [14]; аналіз методів фотореалістичного текстурування [15]; аналіз методу перспективно-коректного текстурування [16]; аналіз розвитку архітектур графічних акселераторів [17]; аналіз методів фільтрації текстур [18]; огляд математичних моделей піксела [19]; аналіз методів підвищення продуктивності анізотропної фільтрації текстур [20]; вагова функція на основі гаусівської моделі піксела [22]; метод підвищення продуктивності перспективно-коректного текстурування при використанні анізотропної фільтрації [23]; метод білінійної фільтрації з використанням кругової моделі піксела [24]; аналіз методу анізотропної фільтрації в реальному часі [25]; комп'ютерна програма для виконання білінійної фільтрації з використанням кругової моделі піксела [26]; комп'ютерна програма для обчислення об'єму відсікання піксела [27]; комп'ютерна програма для проведення експертного оцінювання реалістичності зображень [28]; комп'ютерна програма для рендерингу зображень із виконанням процедурних операцій в об'єктному просторі [29].

**Апробація матеріалів дисертації.** Основні положення дисертації доповідалися та обговорювалися на Міжнародних і Всеукраїнських конференціях: Міжнародні науково-практичні конференції «Електронні інформаційні ресурси: створення, використання, доступ» (Вінниця, 2014, 2017), VI Міжнародна науково-технічна конференція «Моделювання та комп'ютерна графіка» (Красноармійськ, 2015), Міжнародні науково-практичні Інтернет-конференції «Молодь в технічних науках: дослідження, проблеми, перспективи» МТН-2015, МТН-2016 (Вінниця, 2015, 2016), Науково-технічна конференція «Інформатика, математика, автоматика» ІМА-2016 (Суми, 2016), XVI, XVII міжнародні конференції з математичного моделювання МКММ\_2015, МКММ\_2016 (Херсон, 2015, 2016), Міжнародна конференція з управління та зв'язку IEEE SIBCON-2017 (Астана, 2017), на пленарному засіданні VII Міжнародної науково-технічної конференції «Моделювання та комп'ютерна графіка» (Покровськ, 2017).

**Публікації.** Основні результати досліджень опубліковано в 33 наукових працях, у тому числі 13 статей у фахових виданнях України, 12 – у виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз (з них 1 у базі Scopus та IEEE Xplore), 8 – у матеріалах конференцій, 8 авторських свідоцтв про реєстрацію авторського права на комп'ютерну програму.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку літератури, що містить 138 найменувань, 12 додатків. Робота містить 73 ілюстрації, 3 таблиці. Загальний обсяг роботи складає 202 сторінок, основний зміст викладено на 127 сторінках друкованого тексту.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми, окреслено її джерельну базу, сформульовано мету, основні задачі досліджень, визначено наукову новизну та

практичне значення основних результатів, наведено відомості про їхню апробацію та реалізацію.

У **першому розділі** проаналізовано можливості сучасних комп'ютерних систем тривимірної візуалізації реального часу. Розглянуто основні етапи графічного конвеєра та архітектури графічних акселераторів різних поколінь. Окреслено місце текстурювання в загальному процесі кінцевої візуалізації та його взаємодію з іншими етапами рендерингу.

Розглянуто класифікацію методів накладання текстур, їх переваги та недоліки. Проаналізовано сучасні технології забезпечення високої реалістичності та продуктивності текстурювання. Розглянуто особливості існуючих методів фільтрації текстур. Обґрунтовано необхідність подальших досліджень у напрямку підвищення ефективності процесу текстурювання.

Проаналізовано сучасні методи візуалізації нерівностей на поверхнях тривимірних об'єктів з використанням рельєфного текстурювання. Визначено напрямки подальших досліджень для підвищення реалістичності та продуктивності рельєфного текстурювання.

Показано, що можливості існуючих методів і засобів накладання текстур не задовольняють вимоги багатьох галузей застосування тривимірної комп'ютерної графіки, особливо при формуванні динамічних зображень з високим рівнем реалістичності.

На основі проведеного аналізу визначено напрямки подальших досліджень для досягнення поставленої мети.

У **другому розділі** дисертаційної роботи запропоновано методи підвищення реалістичності накладання текстур.

Запропоновано метод анізотропної фільтрації (АФ) з використання вагових функцій на основі гаусівської моделі пікселя (ГМП) з урахуванням форми проекції пікселя в текстурній площині. З метою досягнення вищої точності визначення кольорів при АФ для усереднення кольорів текселів вводять вагові коефіцієнти (ВК), значення яких зменшується по мірі наближення до периферії проекції. Але в існуючих методах не враховується форма проекції екранного пікселя на текстурну площину.

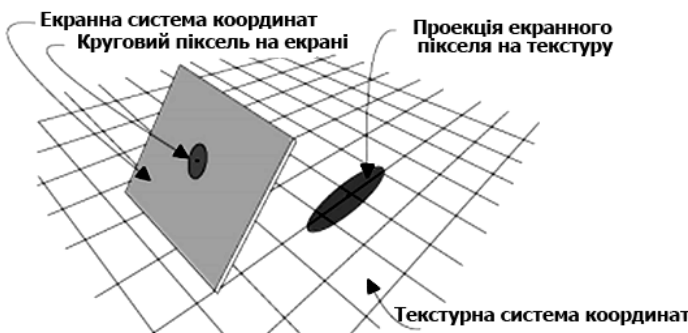


Рисунок 1 – Проекція екранного пікселя на текстуру

Анізотропні методи фільтрації текстур базуються на тому, що форма та площа проекції пікселя на полігон залежить від положення полігону відносно площини відображення. Тому АФ передбачає обчислення форми проекції окремо для кожного пікселя та подальшу вибірку та усереднення тих текселів, що формують цю проекцію.

Відповідно до цього методу проекцію пікселя на текстурну площину розглядають як витягнутий еліпс (рис. 1). Для визначення необхідних для фільтрації текселів складають рівняння еліпса за таким алгоритмом:

1. Визначення векторів осей:

$$(U_y, V_y) = \left( \frac{du}{dy}, \frac{dv}{dy} \right), (U_x, V_x) = \left( \frac{du}{dx}, \frac{dv}{dx} \right). \quad (1)$$

2. Визначення коефіцієнтів рівняння:

$$A = V_x^2 + V_y^2, B = -2(U_x V_x + U_y V_y), C = U_x^2 + U_y^2, F = (U_x V_y + U_y V_x)^2. \quad (2)$$

3. Отримання рівняння виду:

$$A U^2 + B U V + C V^2 = F, \quad (3)$$

де  $U = u - u_0, V = v - v_0$ .

У дисертаційній роботі запропоновано за вагову функцію використовувати тіло обертання кривої Гаусса, масштабоване вздовж осей еліпса таким чином, щоб його основа відповідала формі еліпса (рис. 2).

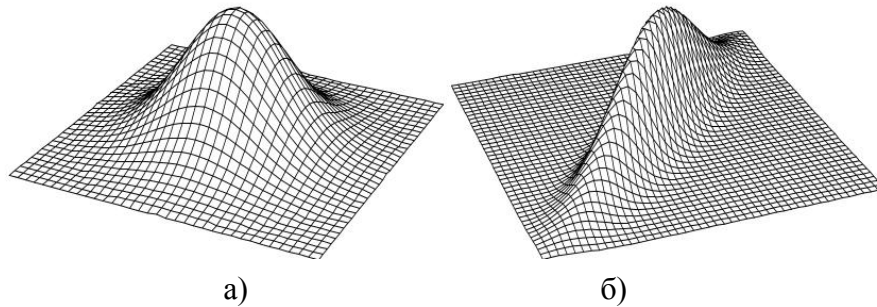


Рисунок 2 – Форма пікселя в просторі екрану (а) та його проекції в просторі текстури (б)

Запропоновано таку формулу для розрахунку вагового коефіцієнта:

$$w_{u,v} = \left\{ 1 - \frac{1}{2} \left[ \frac{[U \cdot \cos \theta + V \cdot \sin \theta]^2}{L^2} + \frac{[V \cdot \cos \theta - U \cdot \sin \theta]^2}{d^2} \right] \right\}^8, \quad (4)$$

де  $L, d$  – довжини осей еліпса;  $U, V$  – параметри рівняння (3), що відповідають відстаням від тексела до центра еліпса вздовж координатних осей;  $\theta$  – кут нахилу еліпса.

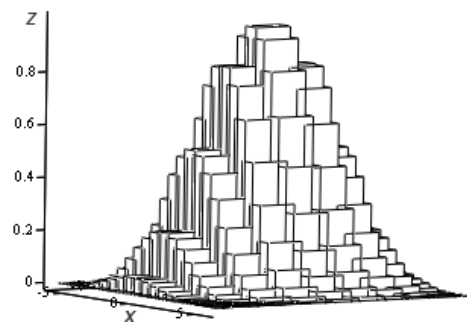


Рисунок 3 – Графік вагової функції

Кут нахилу еліпса визнається за однією з формул:  $\cos(\theta) = U_x / L, \cos(\theta) = V_y / d$ , де  $U, V$  – вектори осей еліпса, отримані за формулою (1). Квадрати довжин осей еліпса розраховують за формулами:  $L^2 = \sqrt{C^2} = C, d^2 = \sqrt{A^2} = A$ .

Для прикладу графік вагових коефіцієнтів текселів, що формують еліпс з діагоналями 3 і 6 і кутом нахилу  $30^\circ$ , зображено на рис. 3.

Формула для визначення кольору пікселя з використанням вагової функції

$$\text{має такий вигляд: } I = \left( \sum_{i=1}^n I_{u_i, v_i} \cdot w_{u_i, v_i} \right) / \sum_{i=1}^n w_{u_i, v_i}.$$

Коли до реалістичності вихідного зображення висуваються жорсткі вимоги, виконують АФ з субтекселною точністю. При цьому враховують, що текселі, які знаходяться на периферії проекції, потрапляють у проекцію не повністю, а відтинаються краями еліпса. Тому при визначенні вагових коефіцієнтів потрібно врахувати, яка частина пікселя відсікається. Існуючі реалізації враховують лише площу тексела, яка відтинається, що не відповідає ГМП.



Тому запропоновано визначити вагові коефіцієнти пропорційно до об'єму відсікання тексела у формі ГМП (рис. 4):  $w = F d = v \cdot 0.5 - v d$ . Отримано

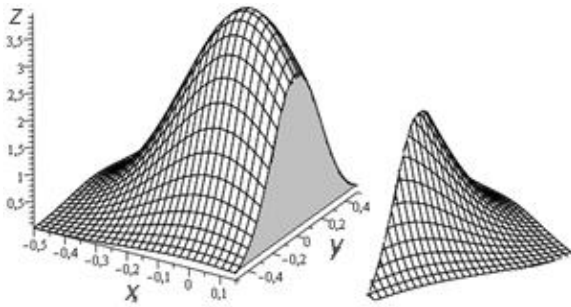


Рисунок 4 – Відсікання частини піксела, що має об'єм  $v d \Delta_1 d$

формулу для визначення об'єму відсікання:

$$v d = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\infty}^d e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} dx = N(d, 0, \sigma), \text{ де } N(d, 0, \sigma)$$

— функція нормального закону розподілу з математичним сподіванням  $a=0$  і середнім квадратичним відхиленням  $\sigma$ .

Формула має високу обчислювальну складність, тому запропоновано

апроксимаційні формули для спрощення обчислень.

Формули отримані шляхом апроксимації поліномами другого та третього порядку. Якщо  $\sigma = 0.2$ , то на проміжку  $d \in 0; 0.5$ , при  $n=2$

$$v d \approx P_2 d = 0.5 + 2.151d - 2.358d^2, \text{ а при } n=3 - v d \approx P_3 d = 0.496 + 2.288d - 3.074d^2 + 0.956d^3.$$

Абсолютні похибки для поліномів  $P_2 d$  і  $P_3 d$  не перевищують  $7 \cdot 10^{-3}$  і  $5 \cdot 10^{-3}$  відповідно.

Запропоновано формули для кусково-лінійної апроксимації:

$$v d \approx P_1 d = \begin{cases} 0.506 + 1.79d, & 0 \leq d < 0.165; \\ 0.636 + 1.008d, & 0.165 \leq d < 0.305; \\ 0.853 + 0.295d, & 0.305 \leq d < 0.5. \end{cases}$$

Абсолютна похибка  $P_1 d$  не перевищує 0.01.

Для обох формул розроблено структурні схеми обчислювальних блоків (рис. б), а також програмну реалізацію.

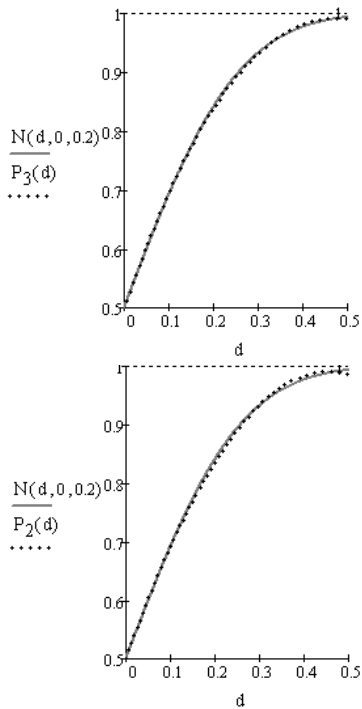


Рисунок 5 – Графіки  $P_2 d$  і  $P_3 d$

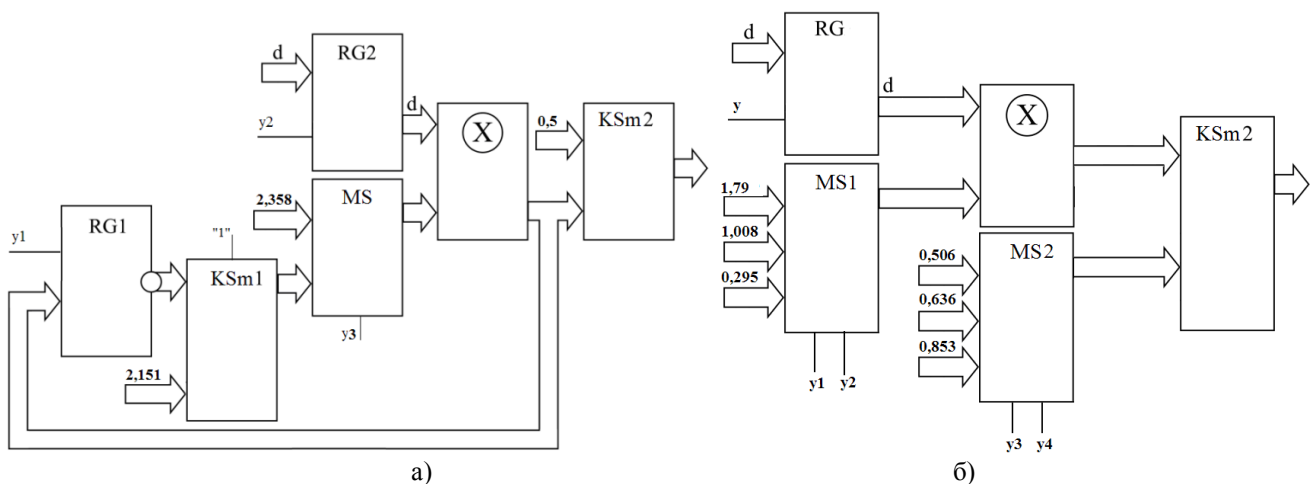


Рисунок 6 – Структурна схема обчислювального блоку розрахунку  $v d$  поліномами

$P_2 d$  (а) і  $P_1 d$  (б)

Запропоновані методи та математичні моделі дали можливість підвищити точність визначення кольорів пікселів у процесі анізотропної фільтрації текстур і, як наслідок, підвищити реалістичність формування графічних зображень.

У **третьому розділі** запропоновано методи підвищення продуктивності перспективно-коректного текстуровування та анізотропної фільтрації текстур.

Сучасні графічні акселератори характеризуються наявністю значних об'ємів доступної оперативної пам'яті, що дозволяє оперувати великою кількістю текстурних карт. Тому існує тенденція до підвищення продуктивності різних обчислень шляхом використання спеціальних текстурних карт із заздалегідь розрахованими проміжними значеннями.

Запропоновано підвищити продуктивність анізотропної фільтрації за рахунок використання спеціальних текстурних карт для визначення вагових коефіцієнтів.

Карта вагових коефіцієнтів (КВК) – кольорова текстурна карта, значення кожного з текселів якої лежить у межах від 0 до 1 і відповідає значенню деякої вагової функції  $w_{u,v}$  для відповідних координат.

Для визначення текстурних координат точки на КВК запропоновано виконувати їх білінійну інтерполяцію. При цьому як координатні осі потрібно використовувати осі еліпса.

Відносні координати точки в системі координат осей еліпса обчислюються за формулами:

$$x = K_x - v_y \cdot u + v \cdot v \cdot s, \quad y = K_y - u_y \cdot u + u \cdot v \cdot s, \quad (5)$$

де  $u_y, v_y$  – значення ординат векторів осей еліпса;  $u, v$  – відстань від тексела до центра еліпса вздовж координатних осей,  $u, v$  – координати тексела;  $s = 1 / \sqrt{A \cdot C}$  – спільне для  $x$  і  $y$ , тому його можна обчислити один раз;  $K_x = u_0 \cdot v_y - v_0 \cdot v_x, K_y = u_0 \cdot u_y - v_0 \cdot u_x$ .

Доведено, що  $K_x$  і  $K_y$  не залежать від координат поточного тексела, тому вони можуть бути обраховані один раз для усього еліпса на етапі визначення коефіцієнтів рівняння еліпса.

Абсолютні координати точки на карті вагових коефіцієнтів визначаються за формулою:

$$u = w \cdot (x + 1) / 2, \quad v = h \cdot (y + 1) / 2, \quad (6)$$

де  $w, h$  - ширина та висота текстурної карти.

У випадках, коли КВК будується на основі функції симетричної відносно обох осей (наприклад, крива Гаусса), необхідний для зберігання текстури об'єм пам'яті можна скоротити в чотири рази. Для цього достатньо використовувати лише верхній правий сектор текстурної карти. У такому випадку формули (5) матимуть вигляд:  $x = |K_x - v_y \cdot u + v \cdot v \cdot s|, y = |K_y - u_y \cdot u + u \cdot v \cdot s|$ , а формули (6) спрощуються до такого вигляду:  $u = x \cdot w, v = y \cdot h$ .

У випадках, коли обсяг необхідної пам'яті є пріоритетним, а вагова функція задана тілом обертання, можна скористатись одновимірною текстурою, оскільки значення функції в усіх точках, що лежать на однаковій відстані від осі обертання, є однаковим незалежно від координат точок. Тому координати точки в одновимірній текстурі можна обчислити за формулою:

$x = \sqrt{K_x \cdot V_y \cdot u + V \cdot v \cdot S^2 + K_y \cdot U_y \cdot u + U \cdot v \cdot S^2}$ . У такому випадку формули (6) матимуть вигляд:  $u = x \cdot w, v = 0$ .

Таким чином, за допомогою отриманих формул можна визначити координати тексела на КВК. Це дає змогу зчитувати вагові коефіцієнти зі спеціальної текстурної карти та вилучити їх знаходження з обчислювального процесу і, як наслідок, підвищити продуктивність текстурування.

Визначення текстурних координат (ТК) при перспективно-коректному текстуруванні (ПКТ) за методом Хекберта є трудомісткою процедурою, оскільки вимагає попикселного виконання складних операцій за формулою

$$u = Ax + By + C \div Gx + Hy + I, v = Dx + Ey + F \div Gx + Hy + I,$$

де  $u, v$  – ТК;  $x, y$  – екранні координати (ЕК);  $A - I$  – коефіцієнти матриці перспективної проекції.

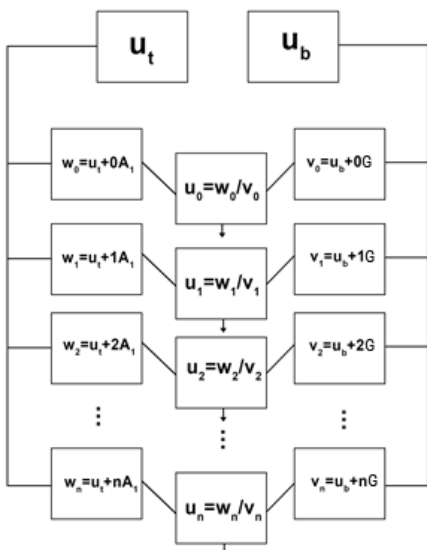


Рисунок 7 – Паралельний підрахунок координат

Для підвищення продуктивності визначення ТК запропоновано спрощені ітераційні формули.

Доведено, що значення  $u_i = A_1 \cdot x_0 + A_1 \cdot n + B_1 \cdot y_i + C_1, u_b = G \cdot x_0 + H \cdot y_i + I$  є константними для всіх пікселів у рядку растеризації. Тому  $u$  може бути обчислено за формулою  $u_n = u_t + A_1 \cdot n / u_b + G \cdot n$ .

Це спрощення дало можливість зменшити кількість операцій додавання та множення до 4 на кожен піксел відповідно.

Запропоновано алгоритм паралельного підрахунку ТК (рис. 7): для кожного рядка растеризації спочатку обчислюються параметри  $u_t$  і  $u_b$ , потім паралельно обчислюються значення чисельника і знаменника за формулами  $w_n = u_t + A_1 \cdot n, v_n = u_b + G \cdot n$ . Після цього виконується операція ділення для визначення координати:  $u_n = w_n / v_n$ .

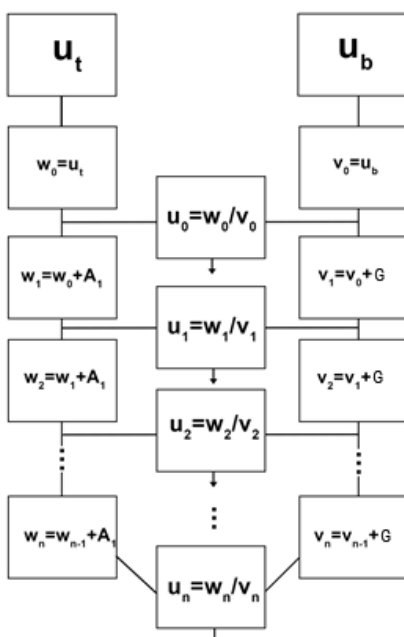


Рисунок 8 – Послідовний підрахунок координат

Оскільки для кожного наступного  $x$   $n$  збільшується на 1, має місце формула:

$$w_n = w_{n-1} + A_1, v_n = v_{n-1} + G. \tag{7}$$

Запропоновано послідовний алгоритм обчислення ТК (рис. 8):  $w_n$  і  $v_n$  для кожного  $x$  обчислюють шляхом додавання до  $w_{n-1}$  і  $v_{n-1}$ , визначених для  $x-1, A_1$  і  $D$  відповідно.

Визначення ТК також можна прискорити за допомогою паралельних обчислень. Запропоновано реалізацію паралельного обчислення ТК для пікселів, що знаходяться на парних і непарних позиціях у рядку растеризації. Якщо  $w_n = w_{n-1} + A_1, v_n = v_{n-1} + D$  то:

$w_{n+1} = (w_{n-1} + A_1) + A_1$ ,  $v_{n+1} = (v_{n-1} + G) + G$ . Тоді, паралельно обчислення текстурних координат пікселів на парних і непарних позиціях можливе за формулами

$$w_n = w_{n-2} + 2A_1, \quad v_n = v_{n-2} + 2G. \quad (8)$$

При цьому ТК для перших двох пікселів визначаються за формулою (7). На основі формул (7) і (8) встановлено залежність, що дозволяє проводити паралельну растеризацію рядка з використанням довільної кількості потоків за допомогою формул:  $w_n = w_{n-k} + kA_1$ ,  $v_n = v_{n-k} + kG$ , де  $k$  – кількість паралельних потоків. Також можливе паралельне обчислення ТК у два потоки шляхом одночасної растеризації рядка у зустрічних напрямках: справа наліво за формулою (7), а зліва направо за формулою:  $w_n = w_{n+1} - A_1$ ,  $v_n = v_{n+1} - G$ .

Модифікація методу Хекберта, в якій використано ітераційні формули для визначення ТК, дозволяє зменшити кількість операцій додавання та множення і, як наслідок, підвищити продуктивність формування графічних сцен у 0,25 раза.

Для визначення текселів, необхідних для фільтрації, складають рівняння еліпса за формулами (1), (2), (3). Похідні для формул (1) знаходять згідно з виразами:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial x} &= u(x+1, y) - u(x, y) = \frac{A(x+1) + By + C}{G(x+1) + Hy + I} - \frac{Ax + By + C}{Gx + Hy + I}, \\ \frac{\partial v}{\partial x} &= v(x+1, y) - u(x, y) = \frac{D(x+1) + Ey + F}{G(x+1) + Hy + I} - \frac{Dx + Ey + F}{Gx + Hy + I}, \\ \frac{\partial u}{\partial y} &= u(x, y+1) - u(x, y) = \frac{Ax + B(y+1) + C}{Gx + H(y+1) + I} - \frac{Ax + By + C}{Gx + Hy + I}, \\ \frac{\partial v}{\partial y} &= v(x, y+1) - u(x, y) = \frac{Dx + E(y+1) + F}{Gx + H(y+1) + I} - \frac{Dx + Ey + F}{Gx + Hy + I}. \end{aligned} \quad (9)$$

У дисертаційній роботі розроблено простіші ітераційні формули:

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{num_{-1} + M}{(K + Gx)(L + Gx)}, \quad \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{num_{-1} + N}{(K + Gx)(L + Gx)}, \quad \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{num_{-1} + O}{(K + Gx)(L + Gx)}, \quad \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{num_{-1} + P}{(K + Gx)(L + Gx)},$$

де  $J = G + I$ ,  $K = I + Hy$ ,  $L = G + I + Hy = J + Hy$  розраховуються один раз;  $num_{-1}$  – значення чисельника для попереднього пікселя в рядку растеризації (для першого розраховують за формулами  $num = AI - CG + AHy - BGy$ ,  $num = DI - FG - DHy + EHy$ ).

Порівняно з базовим методом зменшено кількість арифметичних операцій, необхідних для визначення параметрів рівняння еліпса, на кожен піксел, що дало можливість підвищити продуктивність АФ на 18%.

У більшості систем візуалізації растеризація виконується в площині екрана, що передбачає виконання трудомістких фільтрацій без можливості їх розпаралелення для забезпечення прийнятної реалістичності накладання текстур. Альтернативними методами текстурування є методи з растеризацією в площині текстури або полігону. Такі методи можуть призводити до появи незафарбованих ділянок і накладання кольорів кількох текселів на один піксел.

Для усунення недоліків запропоновано метод, який полягає в тому, що перед растеризацією полігон повертають паралельно екрана. Це дає можливість точно врахувати всі фрагменти полігону без інтерполяції вздовж аплікати. Після визначення кольору кожного пікселя виконується зворотний поворот та проектування на екран.

Для коректного врахування всіх точок, що формують площу полігону текстурування, запропоновано таку послідовність операцій:

1. Виконати поворот полігону відносно координатних осей таким чином, щоб він зайняв паралельне площині проєкції положення.
2. Визначити кольори пікселів полігону шляхом зіставлення їх координат із текстурними.
3. Виконати зворотний поворот кожного пікселя окремо для визначення його координат для початкового положення полігону.
4. Виконати проєкцію пікселя на екран і відтворити його колір на екрані.

Для того, щоб повернути полігон паралельно екрана, необхідно здійснити два послідовних повороти навколо координатних осей  $x$  і  $y$ . Щоб визначити кути повороту знайдемо вектор нормалі (ВН) до площини полігону  $ABC$  за трьома точками:  $N_x = A_y B_z - A_z B_y - A_y C_z + A_z C_y + B_y C_z - B_z C_y$ ,  $N_y = A_z B_x - A_x B_z - A_x C_z + A_z C_x + B_x C_z - B_z C_x$ ,  $N_z = A_x B_y - A_y B_x - A_x C_y + A_y C_x + B_x C_y - B_y C_x$ , де  $N_{xyz}$  – координати ВН  $N$ ,  $A_{xyz}, B_{xyz}, C_{xyz}$  – координати вершин полігону  $ABC$ .

Для визначення кута повороту  $\alpha$  навколо осі  $x$  спроекуємо вектор  $N$  на площину  $yz$  та обчислимо довжину проєкції за формулою:  $d = \sqrt{N_y^2 - N_z^2}$ , де  $d$  – довжина проєкції ВН  $N$  на площину  $yz$ ;  $N_{yz}$  – координати вектора  $N$ . Синус і косинус кута  $\alpha$  знайдемо за формулами  $\cos \alpha = N_z / d$ ,  $\sin \alpha = N_y / d$ .

Після повороту полігону навколо абсциси апліката одиничного вектора буде дорівнювати  $d$ , абсциса –  $N_x$ , а довжина ВН – 1. Тому синус і косинус кута  $\beta$  для повороту навколо ординати відповідно дорівнюють:  $\cos \beta = d$ ,  $\sin \beta = N_x$ .

Повне перетворення повороту можна подати у матричному вигляді:

$$M = T R_x [R_y] = T [R_{xy}],$$

де  $M$  – матриця координат полігону, повернутого паралельно  $xy$ ;  $T$  – матриця початкових координат полігону,  $R_x$  – матриця повороту відносно осі  $x$ ;  $[R_y]$  – матриця повороту відносно осі  $y$ .  $[R_{xy}]$  – матриця послідовного повороту навколо осі  $x$  і  $y$  відповідно. Після підстановки параметрів і спрощень отримаємо:  $x' = x \cos \beta - z \cos \alpha \sin \beta - y \sin \alpha \sin \beta$ ,  $y' = y \cos \alpha - z \sin \alpha$ ,  $z' = x \sin \beta + y \cos \beta \sin \alpha + z N_z$ , де  $x', y', z'$  – координати точки після повороту в тривимірному просторі;  $x, y, z$  – координати точки до повороту;  $N_z$  – апліката ВН полігону. При цьому обрахунок  $z$ -компоненти достатньо виконувати лише для однієї з вершин полігону.

Після повороту полігону паралельно площині  $xy$  проводимо його текстурування з використанням техніки *mir-mapping*. Оскільки  $z$ -координати усіх пікселів однакові, то рівень *mir-піраміди* (LOD рівень) визначається один раз для кожного полігону, на відміну від текстурування в площині екрана, де LOD рівень визначається окремо для кожного пікселя. Колір кожного пікселя записується до кадрового буфера відповідно до ЕК. Для визначення ЕК пікселя необхідно виконати перетворення проєкції на площину  $xy$ . Для повороту пікселя в

початкову площину необхідно виконати перетворення, зворотне до  $[R_{xy}]$ . Тому перетворення проєкції пікселя на екран можна записати у такому вигляді:  $[M'] = M [R_{xy}]^{-1} P = M [PR_{xy}^{-1}]$ , де  $[M']$  – матриця координат в екранній площині;  $M$  – матриця координат в площині полігону, повернутого паралельно  $xy$ ;  $[R_{xy}]^{-1}$  – матриця обернена до матриці  $[R_{xy}]$ ;  $P$  – матриця проєкції на екран;  $[PR_{xy}^{-1}]$  – загальна матриця перетворення проєкції.  $[R_{xy}]^{-1}$  визначається шляхом добутку матриць обернених до  $R_x$  та  $[R_y]$  ( $R_x^{-1}$  та  $[R_y]^{-1}$ ) в зворотному порядку:  $[R_{xy}]^{-1} = [R_y]^{-1} R_x^{-1}$ . Після підстановки параметрів і спрощень

отримаємо:

$$x' = \frac{\cos \beta \cdot x + \sin \beta \cdot z}{1 - r \sin \alpha \cdot y + r N_z \cdot z - r N_y \cdot x}, \quad y' = \frac{\cos \alpha \cdot y + N_y \cdot z - \sin \alpha \sin \beta \cdot x}{1 - r \sin \alpha \cdot y + r N_z \cdot z - r N_y \cdot x},$$

$$z' = \frac{N_z \cdot z - \sin \alpha \cdot y - \cos \alpha \sin \beta \cdot x}{1 - r \sin \alpha \cdot y + r N_z \cdot z - r N_y \cdot x}.$$

Значення параметра  $r$  приймають таким, що дорівнює

$-1 \div z_c$ , де  $z_c$  – відстань від камери до площини проєкції.

Оскільки в результаті обчислень отримують ЕК пікселя у вигляді чисел з плаваючою комою, їх не можна однозначно віднести до конкретного пікселя на екрані, оскільки просте округлення до цілого призводить також до появи артефактів (накладання пікселів та поява отворів). Необхідно врахувати колір тексела для усіх екранних пікселів, які покриває його проєкція. Координати пікселів, що покриває проєкція тексела, знаходяться за формулами:  $x_1 = \lfloor x \rfloor$ ,  $y_1 = \lfloor y \rfloor$ ,  $x_2 = \lfloor x \rfloor + 1$ ,  $y_2 = \lfloor y \rfloor + 1$ ,  $x_3 = \lfloor x \rfloor + 1$ ,  $y_3 = \lfloor y \rfloor$ ,  $x_4 = \lfloor x \rfloor$ ,  $y_4 = \lfloor y \rfloor + 1$ . При виконанні проєкції текселів із текстурного простору в екранний можливе накладання проєкцій кількох текселів на один піксель. Значення кольорів усіх текселів, що накладаються на один піксель, перед виведенням на екран необхідно усереднити з урахуванням вагових коефіцієнтів. Як ваговий коефіцієнт використаємо площу тексела, що покриває піксель. Площі знаходимо за формулами:  $s_1 = 1 - x + \lfloor x \rfloor - 1 - y + \lfloor y \rfloor$ ,  $s_2 = x - \lfloor x \rfloor - y - \lfloor y \rfloor$ ,  $s_3 = x - \lfloor x \rfloor - 1 - y + \lfloor y \rfloor$ ,  $s_4 = 1 - x + \lfloor x \rfloor - y - \lfloor y \rfloor$ . Колір пікселя

на екрані визначаємо за формулою:  $I = \left( \sum_{i=1}^n s_i \cdot I_i \right) \div \sum_{i=1}^n s_i$ .

Обчислювальні витрати на визначення LOD рівня істотно нижчі порівняно з текстуруванням у площині екрана за рахунок того, що LOD рівень визначається один раз на кожен полігон, а не один раз на кожен піксель екрана. Фільтрація в площині екрана продуктивніша порівняно з АФ, оскільки не потребує виконання трудомістких операцій з визначення розмірів та положення еліпса і координат пікселів, що його формують. При цьому може застосовуватись окремий потік для кожного пікселя полігону при виконанні операцій визначення текстурних координат і зворотної проєкції, що дає змогу підвищити продуктивність обчислень.

**Четвертий розділ** дисертаційної роботи присвячено методам підвищення реалістичності та продуктивності рельєфного текстурування в системах комп'ютерної графіки.

Виконання АФ при текстуруванні з використанням техніки *parallax mapping* (PM) може призводити до некоректного визначення кольорів, надмірного розмиття окремих ділянок зображення. Відомі методи АФ не враховують нерівності поверхні, а тому всі текселі, що формують проекцію пікселя на текстуру в формі еліпса, вважаються видимими для користувача та використовуються для визначення кольору пікселя.



З формул (1) і (9) видно, що форма і положення проекції пікселя на текстуру залежить як від ТК пікселя, так і від ТК сусідніх пікселів (рис. 9). При текстуруванні з використанням РМ текстурні координати зміщуються, що призводить до зміни форми та площі ділянки текстури, що формує колір пікселя (рис. 10). З урахуванням видимості точки для користувача, множину текселів  $T$  можна розділити на дві підмножини: множина видимих текселів  $T_{vis}$  і множина невидимих текселів  $T_{invis}$ , таких, що  $T = T_{vis} \cup T_{invis}$ , при чому  $\forall t \in T_{vis} : t \notin T_{invis}, T_{vis} \neq \emptyset$ . При цьому, зі збільшенням площі проекції, збільшується вірогідність того, що  $T_{invis} \neq \emptyset$ , тобто, охоплення множиною  $T$  ділянок, які перекриваються іншими ділянками з більшою висотою (рис. 11).



Помилки при визначенні кольорів виникають у результаті того, що при фільтрації враховуються текселі  $t \in T_{invis}$ . Для їх усунення запропоновано виконувати трасування видового вектора (ВВ) для кожного тексела  $t \in T$  щоб виявити такі елементи та вилучити їх з процесу АФ (рис 12).

Оскільки при ортогональному порядку обходу текселів напрямком обходу не збігається з напрямком ВВ, можливий випадок, коли деякі текселі  $t \in T_{vis}$  можуть

бути враховані двічі. Така ситуація виникає, коли ВВ проходить через точки, що



Рисунок 13 – Текселі що, можуть бути враховані двічі

відповідають двом текселам, один із яких  $t_1 \in T_{vis}$ , а інший  $t_2 \in T_{invis}$ , і  $t_1$  у порядку обходу зустрічається раніше за  $t_2$  (рис. 13). Для усунення подвійного врахування текселів слід виділити в пам'яті окремий буфер для зберігання координат текселів, що уже

були враховані, та перед урахуванням кожного тексела перевіряти наявність його координат в буфері.

При виявленні у рядку тексела, що  $t_1 \in T_{invis}$ , обхід рядка слід зупинити та почати з останнього тексела у зворотному напрямку й продовжувати до тих пір, поки не зустрінеться ще один тексел, що  $t_2 \in T_{invis}$ .

Урахування рельєфних особливостей поверхні при анізотропній фільтрації текстур дає можливість підвищити точність визначення кольорів пікселів і підвищити деталізацію зображення на розмитих ділянках, що сприяє підвищенню реалістичності формування зображень.

Одним із точних спрощених методів parallax mapping є метод Донеллі. Він полягає у використанні додаткової тривимірної текстурної карти відстаней до поверхні (КВП). У КВП значення кожного тексела приймають таким, що дорівнює відстані від нього до найближчої точки поверхні. При трасуванні ВВ зчитують значення із КВП і виконують кроки рівні цим значенням. Це дозволяє пропустити ділянки, на яких гарантовано немає перетину ВВ із поверхнею. В багатьох випадках, при використанні цього методу для поверхонь із складним рельєфом і з різкими перепадами висот, спостерігається зниження продуктивності, оскільки збільшується кількість ітерацій трасування.

Встановлено, що в таких випадках ВВ, який проходить через конкретний тексел, що лежить над поверхнею та перетинає поверхню таким чином, що частина ВВ на проміжку від тексела до поверхні дорівнює мінімальній відстані від цієї точки до поверхні і при цьому не перетинає поверхню на проміжку від початку вектора до цього тексела може не існувати.

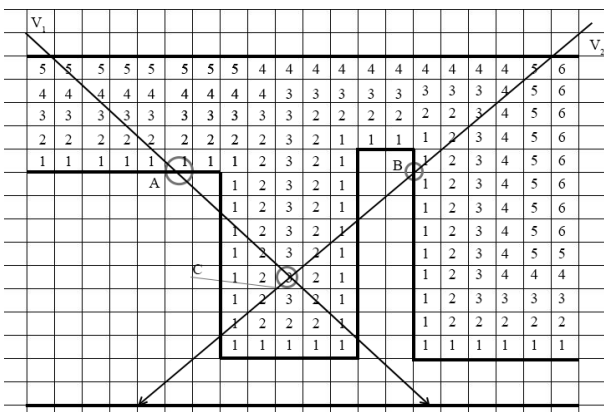


Рисунок 14 – Трасування ВВ, що перетинає поверхню в кількох точках

Розглянемо приклад на рис. 14. ВВ  $v_1$  і  $v_2$  проходить через точку  $C$ . Мінімальна відстань від точки  $C$  до поверхні – 3 піксели. Для знаходження точки перетину  $v_1$  з поверхнею достатньо дві ітерації з кроком 5 і 1 відповідно.  $v_1$  перетинає поверхню в точці  $A$ . Подальше трасування не виконується. Аналогічно, вектор  $v_2$  вперше перетинає поверхню в точці  $B$ . Оскільки точки  $A$  і  $B$  лежать на спільних векторах з точкою  $C$ , але знаходяться



ближче до початку вектора, вони перекривають видимість точки  $c$ . Тому відстань від точки  $c$  до поверхні не має значення при трасуванні векторів  $v_1$  і  $v_2$ .

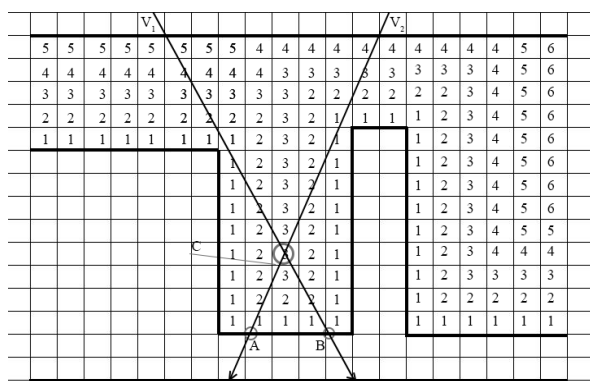


Рисунок 15 – Трасування ВВ, що перетинає поверхню один раз

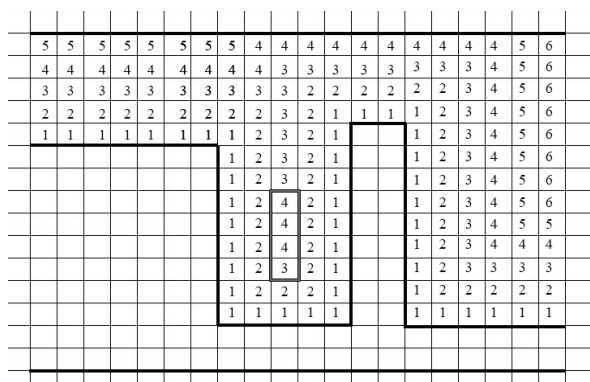


Рисунок 16 – Уточнена КВП

поверхні складає 4 піксели. Тому після досягнення променем точки  $c$  для визначення координат точок перетину променя з поверхнею ( $A$  і  $B$ ) достатньо однієї ітерації трасування.

Таким чином, уточнення карти відстаней до поверхні дало можливість зменшити кількість ітерацій трасування ВВ при визначенні координат точок перетину вектора з поверхнею та знизити обчислювальні затрати на виконання РМ для поверхонь із складним рельєфом. Особливістю методу є те, що в результаті змінюються тільки дані в додатковій текстурній карті, а сам алгоритм трасування залишається без змін. Це дає можливість підвищити продуктивність роботи вже існуючого програмного забезпечення без внесення змін у його вихідний код та повторної компіляції.

**П'ятий розділ** дисертації присвячено програмній реалізації запропонованих методів, експериментальним дослідженням та аналізу отриманих результатів.

Програмне забезпечення для хост-комп'ютера розроблено з використанням мови програмування C++ відповідно до стандарту C++17. Взаємодія з відеоакселератором відбувається відповідно до стандарту OpenGL 4.5. Вихідні коди можуть бути скомпільованими як додатки або бібліотеки для усіх сучасних версій операційних систем, а також мобільних платформ (за умови наявності апаратної підтримки платформою відповідних версій OpenGL). Перевірено на сумісність із компіляторами GCC, починаючи з версії 7.2.0 та clang, починаючи з версії 4.0.1. Шейдерні програми розроблено мовою програмування OpenGL Shading Language (GLSL) відповідно до стандарту OpenGL 4.5.

У випадку, коли ВВ не перетинають поверхню до проходження через точку  $c$  (рис. 15), після кількох ітерацій трасування ВВ  $v_1$  потрапляє в точку  $c$ . Оскільки мінімальна відстань від точки  $c$  до поверхні – 3 піксели, виконується ще одна ітерація з кроком 3. Оскільки точку  $A$  все ще не досягнуто, то виконується остання ітерація з кроком 1. Таким чином, відстань від точки  $c$  до точки  $A$  складає 4 піксели. Трасування ВВ  $v_2$  аналогічне.

У зв'язку з цим зберігати на карті відстаней мінімальну відстань від точки  $P$  до поверхні недоцільно. Доведено, що оптимальніше зберігати найменшу з можливих відстаней від точки до поверхні за умови, що ВВ, який проходить через точку  $P$ , не перетинається з поверхнею на проміжку від початку ВВ до точки  $P$  (рис. 16). Після уточнення карти відстаней, мінімальна відстань від точки  $c$  до

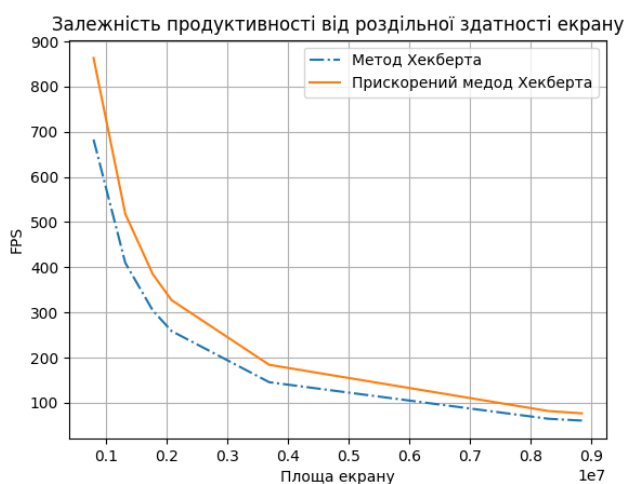


Рисунок 17 – Графіки зміни продуктивності методу прискореного визначення ТК

текстуруванні реалізовано засобами фрагментного шейдера. При порівнянні запропонованого методу з методом Хекберта було досягнуто підвищення продуктивності на 26% в усіх тестах.

При аналізі запропонованого методу підвищення продуктивності анізотропної фільтрації текстур при ПКТ проводились порівняння з анізотропною фільтрацією за алгоритмом EWA при використанні методу Хекберта для визначення ТК і при використанні запропонованого модифікованого методу Хекберта. Запропонований метод забезпечує на 8% вищу продуктивність порівняно з анізотропною фільтрацією при визначенні ТК із використанням прискореного методу Хекберта та на 18% вищу продуктивність порівняно з анізотропною фільтрацією із використанням класичного методу Хекберта (рис. 18). При зменшенні кута нахилу полігону приріст продуктивності збільшується до 40%, оскільки зменшується площа проекції пікселя на текстуру, і, як наслідок, збільшується питома вага етапу визначення параметрів рівняння еліпса в загальному процесі АФ.

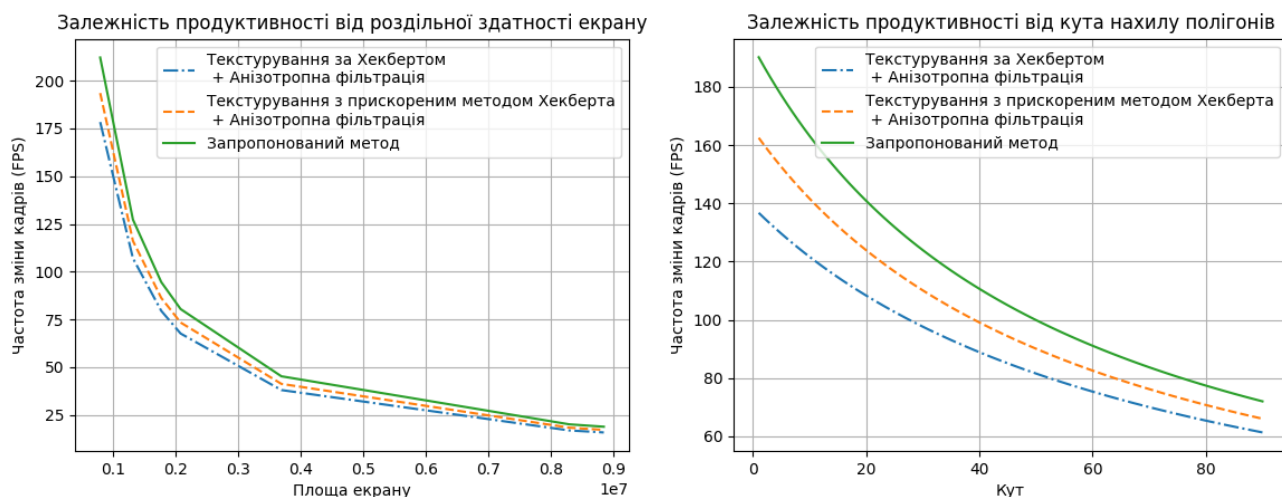


Рисунок 18 – Графіки зміни продуктивності методу прискореного визначення параметрів рівняння еліпса для АФ

Існуючий конвеєр рендерингу не має можливості виконання геометричних перетворень над окремими пікселями та зміни координат пікселів після визначення їх кольорів, що необхідно для методу текстурування з виконанням процедурних операцій в об'єктному просторі. Тому розроблено новий конвеєр

Для проведення експериментальних досліджень використовувався комп'ютер на базі процесора Intel Core i7 2600K з тактовою частотою 3.5 ГГц та відеоакселератора AMD Radeon RX 460. Проводилось тестування із застосуванням різної кількості ядер GPU, з різною кількістю середньостатистичних полігонів, із різною роздільною здатністю вихідного зображення та при різних кутах нахилу полігонів відносно спостерігача.

Метод прискореного визначення ТК (рис. 17) при перспективно-коректному

рендерингу шляхом комбінування набору обчислювальних і графічних шейдерів. При цьому для забезпечення обміну даними між хост-комп'ютером та шейдерами різних типів у пам'яті GPU використано шейдерні буфери зберігання (Shader Storage Buffer Object, SSBO), які забезпечують можливість зчитування та запису масивів даних у обчислювальних і фрагментному шейдерах. Загальний конвеєр складається із 4 обчислювальних шейдерів і 1 фрагментного:

- Шейдер повороту здійснює MV-перетворення та поворот полігону в положення, що паралельне площині екрана. Потім записує нові координати назад у буфер вершин і формує матрицю зворотного повороту, яку записує у буфер поворотів.



Рисунок 19 – Структура шейдеру повороту

- Шейдер растеризації здійснює розбиття полігону на фрагменти та записує координати фрагментів у фрагментний буфер відповідно до зміщення (рис. 20).
- Шейдер текстурування реалізовує визначення текстурних координат пікселя, вибірку кольору із текстури та запис його в буфер кольорів (рис. 20).

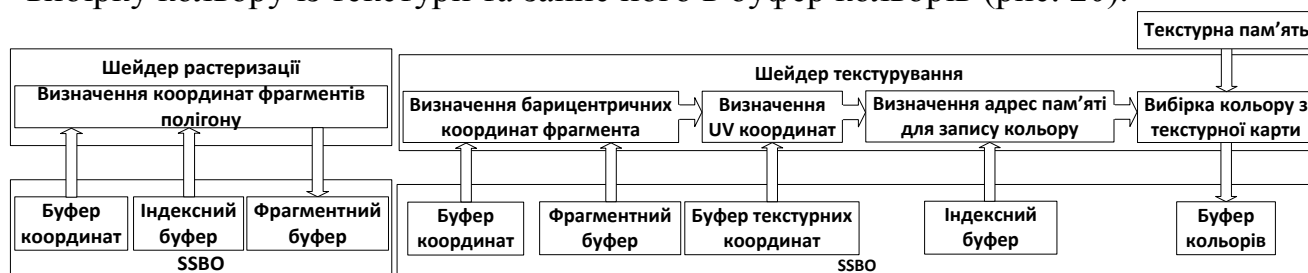


Рисунок 20 – Структура шейдерів растеризації та текстурування

- Шейдер зворотного повороту реалізовує визначення екранних координат пікселя в екранній площині та вагових коефіцієнтів, R-перетворення та визначення видимості пікселя.
- Фрагментний шейдер визначає колір пікселя на екрані.

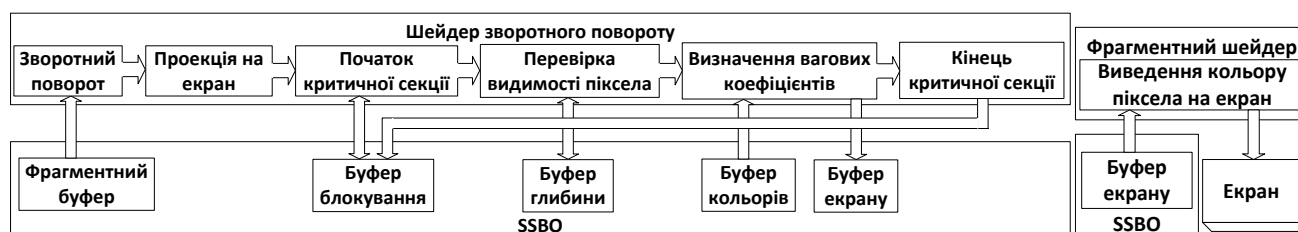


Рисунок 21 – Структура шейдера зворотного повороту та фрагментного шейдера

Управління всіма етапами процесу візуалізації здійснюється засобами CPU. Загальну схему взаємодії програмних компонентів наведено на рис. 22.

Результати тестування показують, що при виконанні процедурних операцій в об'єктному просторі досягається підвищення продуктивності в середньому до 30% порівняно з методами растеризації в площині екрана та виконанням АФ. (рис. 23). При цьому продуктивність не залежить від роздільної здатності екрана

та кутів нахилу полігонів. Продуктивність методу, на відміну від методів з растеризацією в площині екрана, залежить від сумарної площі полігонів.

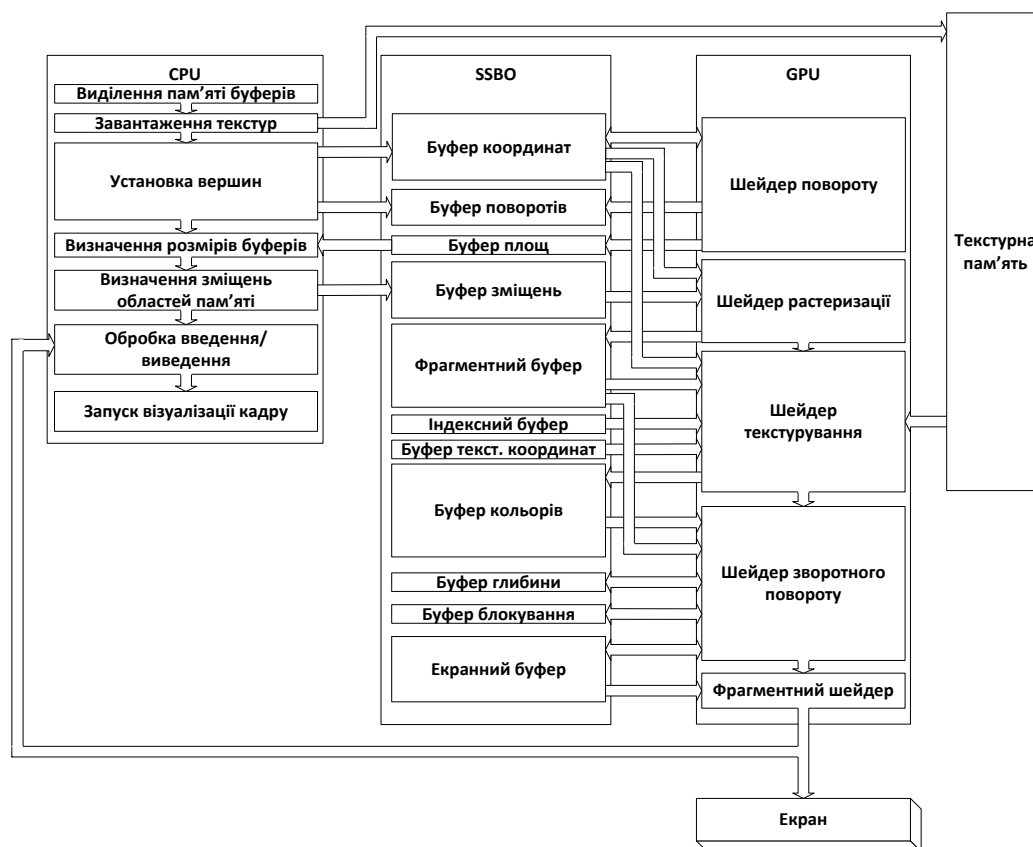


Рисунок 22 – Схема взаємодії програмних компонентів при рендерингу на GPU з використанням методу текстуровання з виконанням операцій в об'єктному просторі

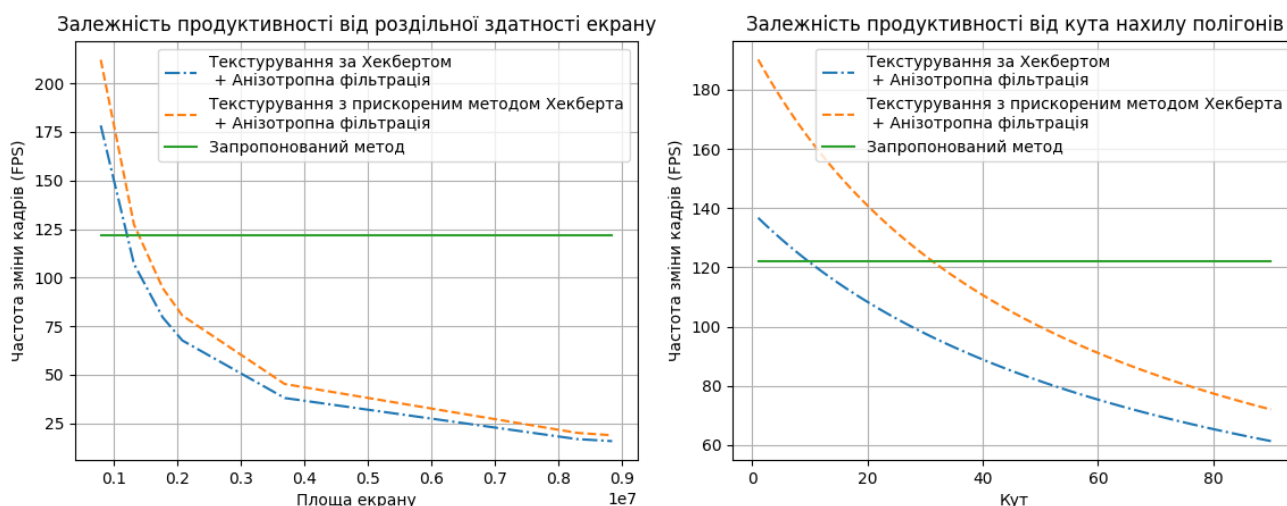


Рисунок 23 – Продуктивність методу текстуровання з виконанням процедурних операцій в об'єктному просторі

Тестування методів АФ з використанням вагових функцій показало підвищення реалістичності при використанні запропонованих методів, що підтверджується експертними оцінками. Нормована середньоквадратична похибка NMSE зображення, сформованого з використанням вагових карт, відносно до зображення, сформованого із використанням вагових функцій, що розраховуються в реальному часі, складає всього 0,000708. Це свідчить про те що, відхилення візуально непомітні.

При обчисленні вагових коефіцієнтів у реальному часі за формулою (4) спостерігається зниження продуктивності всього до 5% (рис. 24). Використання вагової карти замість обчислення формул забезпечило підвищення продуктивності до 25% (рис. 24).

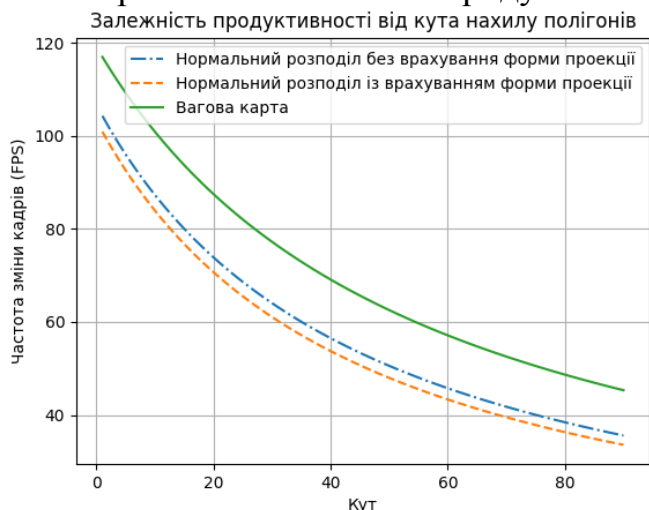


Рисунок 24 – Продуктивність методів АФ з використанням вагових коефіцієнтів

Методом експертних оцінок підтверджено, що запропонований метод підвищення реалістичності анізотропної фільтрації текстур при використанні технології parallax mapping забезпечує більш високу точність відтворення високодеталізованих рельєфних поверхонь і зменшує розмитість зображення. При цьому спостерігається зниження продуктивності всього на 5.1% (рис. 25).

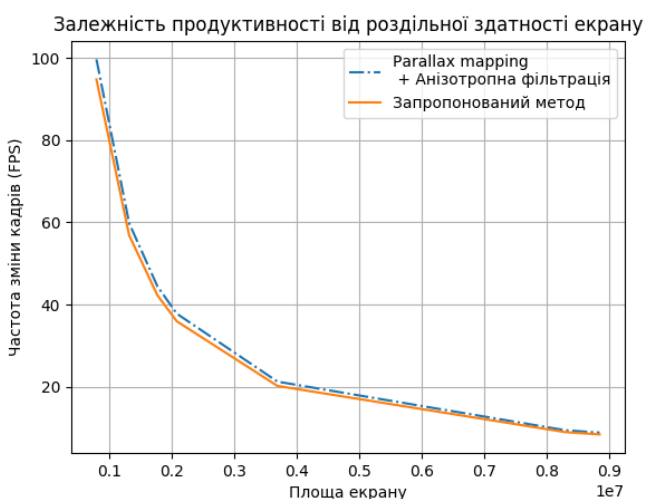
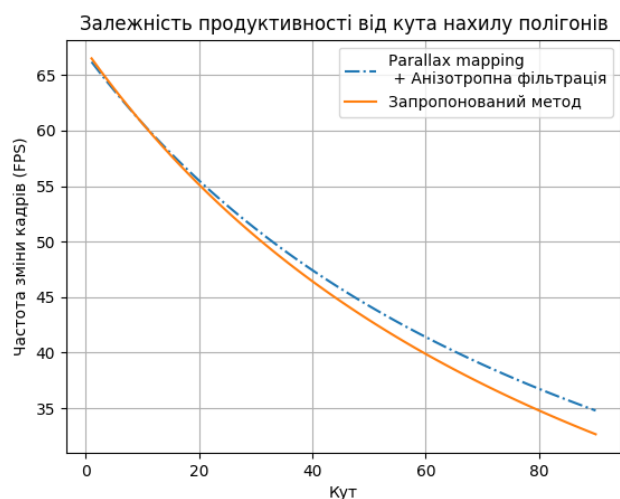


Рисунок 25 – Продуктивність АФ при використанні parallax mapping

Метод підвищення продуктивності РМ при використанні КВП дозволяє підвищити продуктивність текстурування за методом Донеллі до 11% (рис. 26).

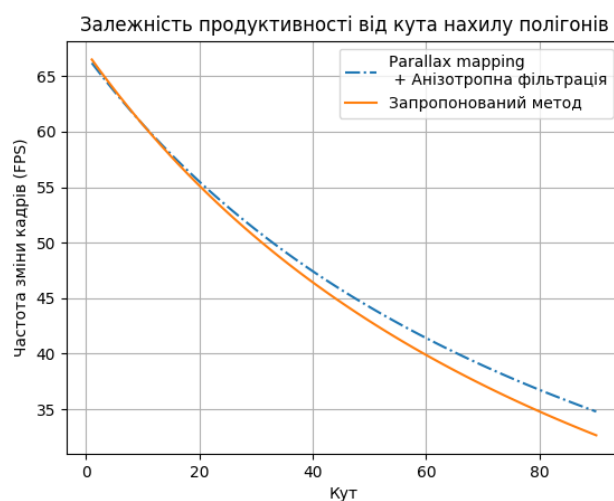
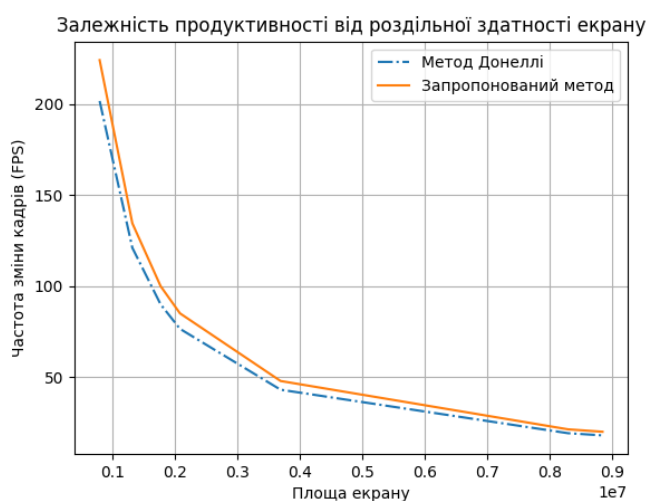


Рисунок 26 – Продуктивність методів parallax mapping з використанням карти відстаней до поверхні

На основі запропонованих у роботі нових методів розроблено систему кінцевої візуалізації, яка охоплює всі необхідні етапи обчислень, складається з підсистеми геометричних перетворень – ПГП, підсистеми растеризації полігонів – ПРП, підсистеми накладання текстур – ПНТ, підсистеми розрахунку освітлення – ПРО (рис. 27).

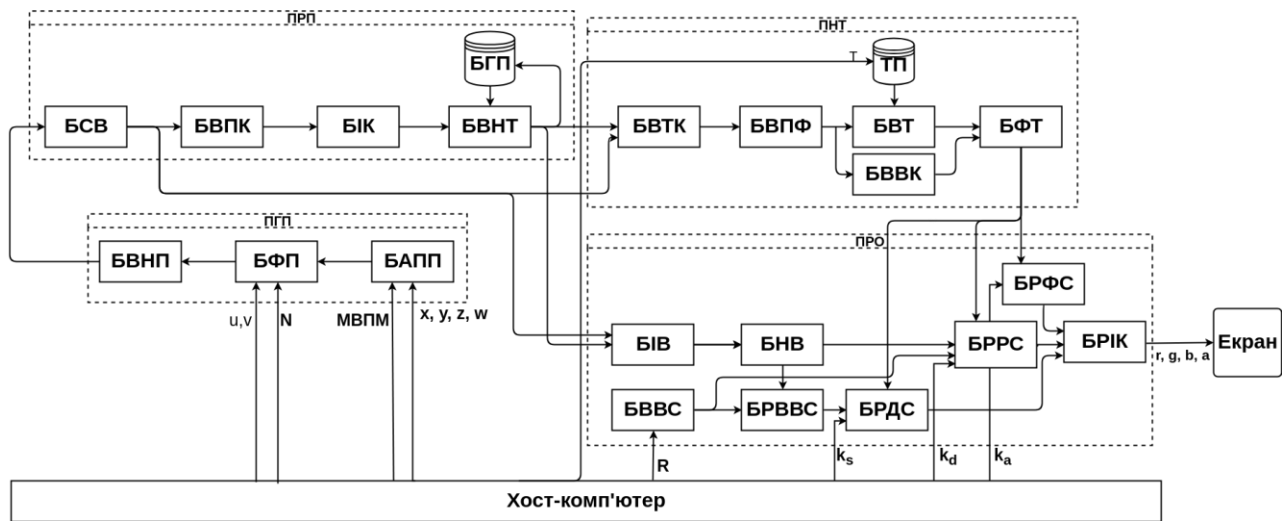


Рисунок 27 – Структурна схема системи кінцевої візуалізації

Усі підсистеми та блоки запропонованої системи можуть бути реалізовані програмними, апаратними і комбінованими засобами.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розвинуто теорію кінцевої візуалізації тривимірних графічних об'єктів, що дозволило розв'язати задачу підвищення продуктивності формування зображень та їх реалістичності у системах комп'ютерної графіки з використанням нових методів і засобів накладання текстур, їх фільтрації та імітації нерівностей поверхонь. У ході досліджень було отримано такі результати:

1. Проведено аналіз сучасних методів і засобів кінцевої візуалізації, зокрема, на етапі текстурування. Показано, що найвищу реалістичність накладання текстур забезпечують методи перспективно-коректного текстурування та анізотропної фільтрації текстур. Проте вони потребують високих обчислювальних затрат і не забезпечують прийняттого рівня реалістичності в ряді випадків. Обґрунтовано, що для реалізації нових методів підвищення реалістичності та продуктивності формування графічних зображень актуальною є розробка нових програмних засобів у вигляді шейдерних програм, що дасть можливість ефективного підвищення реалістичності візуалізації тривимірних моделей без затрат на модифікацію апаратного забезпечення.

2. Запропоновано метод анізотропної фільтрації з використання вагових функцій на основі гаусівської моделі пікселя з урахуванням форми проєкції пікселя в текстурній площині, що дає можливість підвищити точність визначення кольорів і реалістичність формування графічних зображень. Точність визначення кольорів досягається за рахунок використання математичної моделі пікселя, що враховує зміну форми об'єктів у результаті перспективних перетворень при проєкції екранного пікселя в текстурну площину.

3. Запропоновано нові формули визначення об'єму відсікання тіла обертання кривої Гаусса для використання у процесі виконання анізотропної фільтрації

текстур із субтекселною точністю, що дає можливість підвищити реалістичність анізотропної фільтрації текстур за рахунок урахування фізичних властивостей пікселя.

4. Вперше запропоновано використання спеціальних текстурних карт для визначення вагових коефіцієнтів текселів при виконанні анізотропної фільтрації текстур замість обчислення їх в реальному часі з метою вилучення з обчислювального процесу складних розрахунків і підвищення продуктивності процесу текстурування. Використання вагових карт дало можливість підвищення продуктивності на 25%.

5. Запропоновано модифікацію методу Хекберта, в якій використано ітераційні формули для визначення координат текселів, що дозволило зменшити кількість операцій додавання та множення для визначення текстурних координат пікселя, і як наслідок, підвищити продуктивність на 26%.

6. Запропоновано нові ітераційні формули визначення параметрів рівняння еліпса при обчисленні положення проекції пікселя на текстурну площину за методом Хекберта, що дозволяє зменшити кількість арифметичних операцій в обчислювальному процесі та підвищити продуктивність на 18%.

7. Вперше запропоновано метод текстурування, особливість якого полягає у виконанні процедурних операцій в об'єктному просторі та фільтрації в площині екрана, що дає можливість усунути артефакти, характерні для методів текстурування в екранній площині, та підвищити реалістичність формування зображень. Підвищення продуктивності рендерингу запропонованими засобами відносно рендерингу з використанням текстурування на основі анізотропної фільтрації складає, в середньому, 30%.

8. Визначено причини похибок візуалізації при використанні технології parallax mapping у поєднанні з анізотропною фільтрацією текстур та запропоновано комбінований метод виконання рельєфного текстурування з використанням технології parallax mapping та анізотропної фільтрації, що дозволяє усунути артефакти, притаманні для зображень, сформованих шляхом поєднання цих технологій, за рахунок перевірки текселів, що формують проекцію пікселя на видимість.

9. Запропоновано модифікований метод parallax mapping з використанням карти відстаней до поверхні, що відрізняється від класичного використання модифікованої карти відстаней, яка враховує умови видимості текселів і дозволяє підвищити продуктивність рельєфного текстурування до 11%.

10. Впровадження результатів досліджень підтверджуються відповідними актами та використовуються на таких підприємствах і організаціях: компанія «ДЦ Інжиніринг», для підвищення продуктивності роботи графічних станцій; ПМВП «Фотоніка Плюс», для підвищення продуктивності та реалістичності формування зображень у графічних системах; кафедра програмного забезпечення Вінницького національного технічного університету для використання у навчальному процесі.

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

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

- [1] О. Н. Романюк, І. В. Абрамчук, О. О. Дудник, та О. В. Мельник, "Модифікація гаусівської моделі пікселя для задач антиаліаязингу", *Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка* №1, с. 84-88, 2015.
- [2] О. Н. Романюк, та О. О. Дудник, "Підвищення реалістичності зафарбовування тривимірних графічних об'єктів", *Вісник ХНТУ* № 3, с. 269-272, 2016.
- [3] О. Н. Романюк, та О. О. Дудник, "Анізотропна фільтрація з використанням текстурних карт вагових коефіцієнтів", *Реєстрація, зберігання і обробка даних* № 3, с. 34-41, 2017.
- [4] С. О. Романюк, О. О. Дудник, Л. А. Савицька, та О. В. Романюк та ін., "Анізотропна фільтрація з використанням вагових функцій", *Вестник Херсонского национального технического университета* № 3, 2015, с. 459-462.
- [5] О. Н. Романюк, та О. О. Дудник, "Метод підвищення продуктивності перспективно-коректного текстурування", *Наукові праці ДонНТУ* № 1 (22), с. 43-46, 2016.
- [6] О. Н. Романюк, та О. О. Дудник, "Анізотропна фільтрація текстур з використанням методів кешування", *Вісник Вінницького політехнічного інституту* № 6, с. 59-64, 2017.
- [7] О. Н. Романюк, та О. О. Дудник, "Підвищення продуктивності текстурування з виконанням процедурних операцій в об'єктному просторі", *Наукові праці ДонНТУ. Серія "Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка"* № 2 (23), с. 45-51, 2016.
- [8] О. Н. Романюк, та О. О. Дудник, "Реалізація альтернативного конвеєра рендерингу на GPU з використанням обчислювальних шейдерів", *Наукові праці Донецького національного технічного університету Серія: "Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка"*, Покровськ, 2017.
- [9] О. Н. Романюк, та О. О. Дудник, "Особливості анізотропної фільтрації текстур при використанні технології parallax mapping", *Вісник Хмельницького національного університету* № 1, с. 245, 2017.
- [10] О. Н. Романюк, та О. О. Дудник, "Модифікований метод parallax mapping з використанням карти відстаней до поверхні", *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія* № 1, с. 78-82, 2017.
- [11] О. Н. Романюк, та О. О. Дудник, "Використання модифікованої MIP-піраміди для підвищення продуктивності parallax mapping", *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, №1, 112-116, 2018.
- [12] S. I. Vyatkin, S. A. Romanyuk, and O. O. Dudnyk, "Geometric modeling with scalar perturbation functions", *Measuring and computing equipment in technological processes*, № 4, pp. 45-50, 2014.
- [13] S. I. Vyatkin, A. N. Romanyuk, and O. O. Dudnyk, "Function-based gpu architecture", *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах* № 1, p. 139-144, 2015.



- [14] A. N. Romanyuk, and O. O. Dudnyk, "Ways to improve performance of anisotropic texture filtering", *Control and Communications (SIBCON), 2017 International Siberian Conference on.* IEEE, 2017, [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7998589/>
- [15] О. Н. Романюк, та О. О. Дудник, "Розробка методів текстуровання для задач фотореалістичного рендерингу", *Матеріали сьомої міжнародної науково-технічної конференції "Моделювання і комп'ютерна графіка"*, 18-24 вересня 2017 р, с. 26-33.
- [16] О. Н. Романюк, та О. О. Дудник "Неортогональна растеризація при перспективнокоректному текстурованні", *VI Международная конференция «Моделирование и компьютерная графика»*, м. Красноармійськ, 25-29 травня 2015 р., с. 174-178.
- [17] О. Н. Романюк, та О. О. Дудник, "Еволюція конвеєра рендерингу в відеокартах", *Збірник матеріалів міжнародної науково-практичної Інтернет-конференції «Електронні інформаційні ресурси: створення, використання, доступ»*, 24-25 жовтня 2016 р., с. 440-448.
- [18] О. О. Дудник, та О. Н. Романюк, "Аналіз методів фільтрації текстур" *Матеріали міжнародної науково-практичної Інтернет-конференції "Молодь в технічних науках: дослідження, проблеми, перспективи (МТН-2015), Вінниця, 16-17 квітня 2015 р.*, [Електронний ресурс]. Доступно: <http://conf.inmad.vntu.edu.ua/fm/index.php?page=materials&line=11&mat=115>
- [19] Романюк О. Н, та О. О. Дудник, "Математичні моделі Пікселя" *Збірник матеріалів Всеукраїнської науково-практичної конференції "Електронні інформаційні ресурси в освіті і науці: створення, використання, доступ"*, Вінниця, 2014, с. 3-8.
- [20] О. Н Романюк, О. О. Дудник, та С. В. Вяткін, "Шляхи підвищення продуктивності анізотропної фільтрації", *Матеріали міжнародної науково-практичної Інтернет-конференції "Молодь в технічних науках: дослідження, проблеми, перспективи (МТН-2016), 2016*, [Електронний ресурс]. Доступно: <http://conf.inmad.vntu.edu.ua/fm/index.php?page=materials&line=20&mat=343>
- [21] О. О. Дудник, "Аналіз методів рельєфного текстуровання", *Електронні інформаційні ресурси: створення, використання, доступ: Збірник матеріалів Міжнародної науково-практичної Інтернет- конференції.*, Вінниця, 2017, с. 230-236.
- [22] О. Н. Романюк, та О. О. Дудник, "Анізотропна фільтрація з використанням вагової функції на основі Гаусівської моделі пікселя", *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах № 2*: 117-121, 2016.
- [23] О. Н. Романюк, та О. О. Дудник, "Підвищення продуктивності перспективно-коректного текстуровання з використанням анізотропної фільтрації", *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах № 3*, с. 192-195, 2016.
- [24] О. Н. Романюк, та О. О. Дудник, "Модифікація білінійного текстуровання з використанням кругової моделі пікселя", *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах № 1*, с. 243-245, 2016.

- [25] С. И. Вяткин, А. Н. Романюк, и А. А. Дудник, "Анизотропная фильтрация текстуры в реальном времени", *Измерительная и вычислительная техника в технологических процессах* № 4, с. 217-221, 2015.
- [26] О. Н. Романюк, та О. О. Дудник, Комп'ютерна програма "Визначення кольору пікселя з використанням кругової моделі", Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №66660, К.: Державна служба інтелектуальної власності України, 15.07.16
- [27] О. Н. Романюк, та О. О. Дудник, Комп'ютерна програма "Обчислення об'єму перетину пікселя", Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №61823, К.: Державна служба інтелектуальної власності України, 25.09.15
- [28] О. Н. Романюк, та О. О. Дудник, Комп'ютерна програма "Система експертного оцінювання сформованого зображення по відношенню до еталону", Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №66659, К.: Державна служба інтелектуальної власності України, 15.07.16
- [29] О. Н. Романюк, О. О. Дудник, та Б. Л. Войт Комп'ютерна програма "Рендеринг тривимірних зображень із використанням процедурних операцій в об'єктному просторі", Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №71796, К.: Державна служба інтелектуальної власності України, 05.05.17
- [30] О. О. Дудник, Комп'ютерна програма "Генерація вагових текстурних карт", Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №78246, К.: Міністерство економічного розвитку і торгівлі України, 12.04.18
- [31] О. О. Дудник, Комп'ютерна програма "Анізотропна фільтрація текстур з використанням вагової функції на основі гаусівської моделі пікселя", Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №78247, К.: Міністерство економічного розвитку і торгівлі України, 12.04.18
- [32] О. О. Дудник, Комп'ютерна програма "Анізотропна фільтрація текстур з використанням вагових текстурних карт", Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №78249, К.: Міністерство економічного розвитку і торгівлі України, 12.04.18
- [33] О. О. Дудник, Комп'ютерна програма "Генерація текстурних карт відстаней до поверхні на основі карт висот з урахуванням видимості точок поверхні", Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №78248, К.: Міністерство економічного розвитку і торгівлі України, 12.04.18

## АНОТАЦІЯ

**Дудник О. О. Методи та засоби підвищення реалістичності та продуктивності текстурування у системах комп'ютерної графіки. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.05 «Комп'ютерні системи та компоненти». – Вінницький національний технічний університет. – Вінниця, 2018.

У дисертаційній роботі розвинуто теорію кінцевої візуалізації тривимірних графічних об'єктів, що дозволило підвищити продуктивність формування зображень та їх реалістичність у системах комп'ютерної графіки з використанням нових методів і засобів накладання текстур, їх фільтрації та імітації нерівностей.

Запропоновано метод анізотропної фільтрації з використання вагових функцій на основі гаусівської моделі пікселя з урахуванням форми проекції пікселя в текстурній площині, що дає можливість підвищити точність визначення кольорів пікселів.

Запропоновано нові формули визначення об'єму відсікання тіла обертання кривої Гаусса для використання у процесі виконання анізотропної фільтрації текстур із субтекселною точністю, що дає можливість підвищити реалістичність.

Вперше запропоновано використання спеціальних текстурних карт для визначення вагових коефіцієнтів текселів при виконанні анізотропної фільтрації текстур замість обчислення їх в реальному часі, для підвищення продуктивності.

Запропоновано модифікацію методу Хекберта, в якій використано ітераційні формули для визначення координат текселів, що дозволило зменшити кількість арифметичних операцій при визначенні текстурних координат пікселя та, як наслідок підвищити продуктивність на 26%.

Запропоновано нові ітераційні формули визначення параметрів рівняння еліпса при виконанні анізотропної фільтрації, що дозволило зменшити кількість арифметичних операцій та підвищити продуктивність на 18%.

Вперше запропоновано метод текстурування, особливість якого полягає у виконанні процедурних операцій в об'єктному просторі та фільтрації в площині екрана, що не потребує виконання анізотропної фільтрації текстур, і як наслідок, дає можливість підвищити продуктивність 30%.

Визначено причини похибок візуалізації при використанні технології parallax mapping у поєднанні з анізотропною фільтрацією текстур та запропоновано комбінований метод виконання рельєфного текстурування з використанням parallax mapping та анізотропної фільтрації, що дозволяє усунути артефакти, характерні для зображень, сформованих шляхом поєднання цих технологій.

На основі запропонованих методів розроблено програмні компоненти та систему кінцевої візуалізації.

**Ключові слова:** текстурування, накладання текстур, фільтрація текстур, перспективно-коректне текстурування, рельєфне текстурування, parallax mapping.

## ABSTRACT

**Dudnyk O. O. Methods and tools of increasing the realism and productivity of texture mapping in computer graphics systems. – Qualification scientific paper as manuscript.**

Thesis for PhD degree in technical sciences on the speciality 05.13.05 «Computer systems and components». – Vinnytsia National Technical University. – Vinnytsia, 2018.

In the thesis the theory of rendering of three-dimensional scenes was supplemented, which allowed to solve the problem of improving the performance of image formation and their realism in computer graphics systems using new methods and tools for texture overlay, filtering and simulation of surface irregularities.

Three-dimensional computer graphics provide the highest realism of visual reproduction of objects and processes of the real world. Since the performance of graphics tools provides the ability to display highly realistic three-dimensional objects, the requirements for the level of complexity of models and the accuracy of reflection of

highly detailed surfaces are also constantly growing. The formation of dynamic graphic images in real time and in interactive mode imposes stringent performance requirements of texture mapping. The use of simple techniques blending textures is not acceptable to produce realistic looking images. Therefore, there is a need to develop new methods and means of texturing in order to reduce the complexity of realistic reproduction of graphic scenes.

The author analyzes modern methods and means of visualization, in particular at the stage of texturing. It has shown that the methods of perspective-correct texturing and anisotropic texture filtering provide the highest realism of texture mapping. However, they are computationally expensive and do not provide an acceptable level of realism in some cases. It is proved that the development of new software in the form of shader programs that will enable effective increase of the realism of three-dimensional models without the cost of hardware modification is an actual direction of research for the implementation of new methods of increasing the realism and productivity of the formation of graphic images.

The author proposes a method of anisotropic filtering with use the weight functions based on the Gauss pixel model taking into account the shape of the pixel projection in the texture plane, which makes it possible to improve the accuracy of the pixel color. This gave the opportunity to increase the accuracy of determining the color of pixels.

The author proposes new formulas for calculating the volume of cutting off the body of rotation of the Gauss curve for use in the process of performing anisotropic texture filtering with subtextual accuracy. This makes it possible to increase the realism of anisotropic texture filtering by taking into account the physical properties of the pixel.

For the first time author proposes the use of special texture maps to determine the weight coefficients of texels when performing anisotropic texture filtering instead of calculating them in real time in order to extract complex calculations from the computational process and improve the productivity of the texturing process. The use of weight maps made it possible to increase productivity by 25%.

The author proposes a modification of the Heckbert method, which uses iterative formulas to calculate the coordinates of texels, which allowed to reduce the number of addition and multiplication operations to determine the texture coordinates of the pixel, and as a consequence, to increase productivity by 26%.

New iterative formulas for determining the parameters of the ellipse equation for calculating the position of the pixel projection on the texture plane using the Heckbert method are proposed. Their use allows to reduce the number of arithmetic operations in the computing process and increase productivity by 18%.

For the first time author proposes a method of texture mapping, the peculiarity of which is to perform procedural operations in the object space and filtering in the screen plane, which makes it possible to eliminate artifacts characteristic of the methods of texturing in the screen plane and increase the realism of image formation. To implement the method, the author has developed a new rendering pipeline by combining a set of computational and graphic shaders. Improving the performance of the rendering of the proposed facilities in relation to rendering using anisotropic texture filtering is on average 30%.

The author proposed a modified parallax mapping method using a distance map

to a surface that differs from the classical use of a modified distance map that takes into account the visibility of texels, and allows to increase the productivity of relief texturing up to 11%.

The author has found the causes of visualization errors when using parallax mapping technology in combination with anisotropic texture filtering and proposed a combined method of relief texturing using parallax mapping technology and anisotropic filtering. The method allowed to eliminate artifacts characteristic of images formed by combining these technologies by checking texels, which form the projection of the pixel visibility.

On the basis of the theoretical propositions, models, analytical dependences, results of the experimental analysis obtained in the thesis, the author proposes algorithms and software tools for texture mapping in the systems of highly realistic rendering of three-dimensional images. The obtained characteristics and parameters of the developed tools confirm the correctness of scientific provisions and the adequacy of the proposed models.

**Keywords:** texturing, texture mapping, texture filtering, perspective-correct texture mapping, relief texture mapping, parallax mapping.

## АННОТАЦИЯ

**Дудник А. А. Методы и средства повышения реалистичности и производительности текстурирования в системах компьютерной графики. – Квалификационная научная работа на правах рукописи.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.05 «Компьютерные системы и компоненты». – Винницкий национальный технический университет. – Винница, 2018.

В диссертационной работе развита теория конечной визуализации трёхмерных графических объектов, что позволило повысить производительность формирования изображений и их реалистичность в системах компьютерной графики с использованием новых методов и средств наложения текстур, их фильтрации и имитации неровностей.

Предложен метод анизотропной фильтрации с использованием весовых функций на основе гауссовской модели пиксела с учётом формы проекции пиксела в текстурной плоскости, что позволяет повысить точность определения цветов.

Предложены новые формулы определения объёма отсечения тела вращения кривой Гаусса для использования в процессе выполнения анизотропной фильтрации текстур с субтексельной точностью, для повышения реалистичности.

Впервые предложено использование специальных текстурных карт для определения весовых коэффициентов текселов при выполнении анизотропной фильтрации текстур вместо вычисления их в реальном времени, для повышения производительности.

Предложена модификация метода Хекберта, в которой использовано итерационные формулы для определения координат текселов, что позволило уменьшить сложность вычислений и повысить производительность на 26%.

Предложены новые итерационные формулы определения параметров уравнения эллипса при выполнении анизотропной фильтрации, что позволило

снизить вычислительную сложность и повысить производительность на 18%.

Впервые предложен метод текстурирования, особенность которого заключается в выполнении процедурных операций в объектном пространстве и фильтрации в плоскости экрана, который не требует выполнения анизотропной фильтрации текстур, что даёт возможность повысить производительность до 30%.

Определены причины ошибок визуализации при использовании технологии parallax mapping в сочетании с анизотропной фильтрацией текстур и предложен комбинированный метод выполнения рельефного текстурирования с использованием parallax mapping и анизотропной фильтрации, позволяет устранить артефакты характерные для изображений, сформированных путём объединения этих технологий.

На основе предложенных методов разработаны программные компоненты и система конечной визуализации.

**Ключевые слова:** текстурирование, наложение текстур, фильтрация текстур, перспективно-корректное текстурирование, рельефное текстурирование, parallax mapping.

Підписано до друку 28.08.2018 р. Формат 21x29.7 1/4.  
Наклад 100 прим. Зам. № 2018-146.  
Віддруковано в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі  
Вінницького національного технічного університету.  
м. Вінниця, вул. Хмельницьке шосе, 95. Тел.: 59-81-59  
Суб'єкт видавничої справи  
серія ДК №3516 від 01.07.2009р.