

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України
Вінницький національний технічний університет

РОМАНЮК ОКСАНА ВОЛОДИМИРІВНА

УДК 004.925

**МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ФОРМУВАННЯ ЗОБРАЖЕНЬ РЕЛЬЄФНИХ ПОВЕРХОНЬ У
СИСТЕМАХ КОМП'ЮТЕРНОЇ ГРАФІКИ**

Спеціальність 05.13.05 – Комп'ютерні системи та компоненти

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Вінниця – 2012

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано у Вінницькому національному технічному університеті Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України.

Науковий керівник:

кандидат технічних наук, доцент
Войтко Вікторія Володимирівна,
Вінницький національний технічний університет,
доцент кафедри програмного забезпечення.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор,
Лауреат Державної премії України
в галузі науки і техніки
Башков Євген Олександрович,
Донецький національний технічний університет,
проректор з наукової роботи,
завідувач кафедри прикладної математики
та інформатики;

доктор технічних наук, професор
Русин Богдан Павлович,
Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка
НАН України, м. Львів,
завідувач відділу методів і систем обробки, аналізу та
ідентифікації зображень.

Захист відбудеться ” 16 ” березня 2012 р. о 12⁰⁰ год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 05.052.01 у Вінницькому національному технічному університеті за адресою: 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ауд. 210 ГНК.

Із дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Вінницького національного технічного університету за адресою: 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ГНК.

Автореферат розіслано ” 14 ” лютого 2012 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради

С. М. Захарченко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Для підвищення інформативності комп'ютерної графіки як ефективного засобу взаємодії між людиною та ЕОМ необхідно точніше відтворювати конструктивні, візуальні та фактурні особливості графічних об'єктів. Синтез зображень таких об'єктів передбачає відтворення графічної сцени з високим ступенем деталізації, тобто точну передачу мікрорельєфу поверхонь об'єктів. У найближчі роки очікується, що графічні сцени будуть містити від 1 до 3 млн. полігонів, які графічна система повинна обробляти в режимі реального часу. При цьому необхідно забезпечити компроміс між високою реалістичністю відтворення графічних об'єктів і прийнятним для конкретної задачі часом їх формування.

На теперішньому етапі розвитку комп'ютерної графіки для надання зображенням поверхонь реалістичного вигляду використовується накладання на них оцифрованих зображень (текстур), що забезпечує деталізацію графічних сцен без збільшення складності каркасної моделі. Для підвищення реалістичності текстурування виконують перспективно-коректне визначення координат текселів, трансформацію векторів, а також імітацію світлових ефектів, що створюють у спостерігача додаткову ілюзію нерівності зображення поверхні. Оскільки зазначені процедури виконуються для кожної точки графічного зображення, то формування зображень рельєфних поверхонь є надзвичайно трудомістким процесом кінцевої візуалізації, який суттєво впливає на продуктивність формування графічних сцен.

Особливо нагальним це питання є для мобільних обчислювальних засобів, які через малі габарити та інші технологічні обмеження мають відносно низьку продуктивність, та обчислювальних систем з інтегрованими графічними ядрами, які в останні роки становлять близько 70% обсягів продажів усіх графічних процесорів.

У зв'язку з цим актуальною задачею є підвищення продуктивності формування зображень рельєфних поверхонь за рахунок розробки нових методів і засобів, які б забезпечили спрощення процедур візуалізації на програмному та апаратному рівнях.

Теоретичним підґрунтям для досліджень, які були виконані в дисертаційній роботі, були роботи вчених України та країн СНД – Башкова Є. О., Баяковського Ю. М., Васюхіна М. І., Вяткіна С. І., Галактіонова В. А., Гусятіна В. М., Долговесова Б. С., Зорі С. А., Кожем'яка В. П., Коснікова Ю. Л., Михайленка В. Є., Руденка О. Г., Русина Б. П., Петуха А. М., Палташева Т. Т., Татарчук Н. В. Серед науковців далекого зарубіжжя найвідомішими є праці Бліна Д., Фонга Б., Пірсі М., Хекберта П., Хеккера К., Кілгарда М., Хаста А., Роджерса Д., Херна Д. та інших.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Роботу виконано у Вінницькому національному технічному університеті в рамках НДР "Розробка імітаційної моделі оптико-електронного томографа око-процесорного типу для діагностики захворювань молочної залози" за договором з ТОВ "Медівін" (номер державної реєстрації 0109U008944) і держбюджетної НДР № 30-Д-313 "Створення інформаційних діагностичних технологій для оцінювання стану і визначення індексу здоров'я людини" (номер державної реєстрації 0108U000656).

Мета й задачі дослідження. Метою роботи є підвищення продуктивності формування зображень рельєфних поверхонь у системах комп'ютерної графіки за рахунок зменшення складності обчислювального процесу та програмно-апаратної реалізації.

Основними **задачами дослідження** є:

- аналіз існуючих методів і засобів формування зображень рельєфних поверхонь з метою визначення нових підходів до підвищення їх продуктивності;
- отримання простіших аналітичних залежностей для процедур формування зображень рельєфних поверхонь з метою спрощення обчислювального процесу та програмно-апаратної реалізації;
- розробка та аналіз запропонованих високопродуктивних методів формування зображень рельєфних поверхонь з метою зменшення часу генерації графічних сцен;
- удосконалення методів перспективно-коректного текстурування з метою зменшення їх обчислювальної складності та спрощення апаратної реалізації;

- розробка нової моделі відбивальної здатності поверхонь з метою зменшення її степеня й спрощення програмної та апаратної реалізації;
- удосконалення методів визначення нормалізованих векторів з метою зменшення їх обчислювальної складності;
- розробка підсистем і пристроїв формування зображень рельєфних поверхонь;
- розробка програмних модулів для формування зображень рельєфних поверхонь для високопродуктивних графічних систем.

Об'єкт дослідження – процес формування зображень рельєфних поверхонь у системах комп'ютерної графіки.

Предмет дослідження – методи та засоби формування зображень рельєфних поверхонь.

Методи дослідження. У процесі дослідження застосовувалися: методи аналітичної геометрії, лінійної алгебри, математичного аналізу для розробки та модифікації методів формування зображень рельєфних поверхонь; теорія інтерполювання функцій для знаходження аналітичних залежностей для перспективно-коректних перетворень і нової моделі відбивальної здатності поверхонь; теорія автоматів для розробки апаратних компонент систем комп'ютерної графіки; комп'ютерне моделювання для аналізу та перевірки достовірності отриманих теоретичних положень.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Уперше запропоновано метод імітації нерівностей на зображенні поверхні графічних об'єктів, у якому використано збурення дистрибутивних функцій відбивальної здатності для розрахунку дифузної та спекулярної складових кольору, що дозволило підвищити продуктивність за рахунок вилучення з обчислювального процесу процедур трансформації векторів та їх нормалізації.

2. Запропоновано нову модель відбивальної здатності поверхні, яка, порівняно з відомими, забезпечує високу точність відтворення як епіцентра відблиску, так і його блюмінгу, та підвищує продуктивність формування зображень рельєфних поверхонь.

3. Подальшого розвитку отримав метод нормал-мепінгу, у якому використано нові формули прискореної трансформації векторів у дотичний простір, що дозволило підвищити продуктивність за рахунок спрощення обчислювального процесу.

4. Запропоновано методи підвищення продуктивності перспективно-коректного накладання текстур, у яких вперше використано нові рекурентні співвідношення для визначення текстурних координат поточної точки у рядку растеризації, що дозволило вилучити з циклу текстурування операції ділення і підвищити продуктивність за рахунок спрощення обчислювального процесу та розширити сферу застосування за рахунок як цілочислового, так і дробового подання текстурних координат і, як результат, задовольнити вимоги графічних стандартів OpenGL і DirectX.

5. Удосконалено методи визначення нормалізованих векторів, у яких, на відміну від існуючих, використано нові властивості та апроксимаційні формули, що забезпечило підвищення продуктивності як на апаратному, так і програмному рівнях.

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що на основі проведених теоретичних досліджень:

- розроблено структурні схеми підсистем і пристроїв для прискореної нормалізації векторів та перспективно-коректного накладання текстур;
- розроблено структурні схеми підсистем і пристроїв для формування зображень рельєфних поверхонь для виготовлення конкурентоспроможних зразків цієї продукції;
- створено діючі програмні засоби для імітації нерівностей на зображеннях поверхонь графічних об'єктів у системах комп'ютерної графіки;
- розроблено програмний модуль для тестування запропонованих методів формування зображень рельєфних поверхонь з метою отримання порівняльних оцінок;
- отримано експериментальні дані з використання розроблених засобів у складі професійного графічного конвеєра RenderMonkey компанії ATI Technologies.

Достовірність теоретичних досліджень, наукових положень і висновків, викладених у дисертаційній роботі, підтверджується результатами моделювання.

Наукові результати, отримані під час виконання дисертаційної роботи, впроваджено на науково-виробничому підприємстві “УкрАвіаЗаказ” (м. Київ, акт від 15.08.2011 р.), на державному науково-виробничому підприємстві “Геосистема” (м. Вінниця, акт від 12.09.2011 р.), у ТОВ “АТЗТ Компанія “Сатурн Дейта Інтернешнл” (м. Київ, акт від 08.06.2011 р.), на підприємстві “Сайткор Україна” (м. Дніпропетровськ, акт від 22.07.2011 р.), а також у навчальний процес у Вінницькому національному технічному університеті (акт від 03.09.2011 р.).

Особистий внесок здобувача. Особистий внесок здобувача у працях, виконаних у співавторстві, полягає в тому, що: [4] – розроблено метод визначення векторів у довільній точці трикутника; [5] – запропоновано апаратну реалізацію блоків нормалізації векторів; [6] – доведено властивість про сталість приростів ортогональних складових векторів нормалей при їх лінійній інтерполяції; [7] – проведено аналіз основних методів нормалізації векторів нормалей; [8] – проведено аналіз основних методів формування зображень шорстких поверхонь; [9] – запропоновано модифікацію методів паралакс-меппінгу; [10] – запропоновано варіант апаратної реалізації бамп-меппінгу; [11, 12] – запропоновано для відтворення рельєфу використовувати скалярні функції збурення; [13] – запропоновано алгоритм відображення контурної текстури; [14] – запропоновано використати принцип дихотомії для визначення векторів нормалей; [15] – проведено аналіз особливостей архітектурної побудови систем формування зображень; [21] – запропоновано адитивний метод перспективно-коректного текстурування; [22] – запропоновано використовувати шум Перліна для створення рельєфних поверхонь; [23] – запропоновано метод підвищення продуктивності визначення векторів; [24] – запропоновано модифікацію методу перспективно-коректного накладання текстур; [25] – запропоновано адаптивний підхід до управління якістю формування зображень; [26] – проаналізовано технології бамп-меппінгу; [27] – охарактеризовано етапи графічних конвексів; [28] – проаналізовано методи визначення нормалізованих векторів; [29] – запропоновано формули для визначення текстурних координат; [30] – сформульовано основні вимоги до побудови систем кінцевої візуалізації; [31] – розглянуто особливості формування мікро-рельєфу з використанням багаторівневих карт висот; [32-36] – запропоновано структурні схеми пристроїв; [39] – розроблено програмний модуль для формування зображень рельєфних поверхонь із використанням сферично-кутової інтерполяції.

Усі дослідження, результати яких використано у дисертаційній роботі, проводилися у Вінницькому національному технічному університеті.

Апробація результатів дисертації. Основні теоретичні положення й найвагоміші практичні результати виконаного дослідження було обговорено на: VI і VII Міжнародних науково-технічних конференціях (НТК) “Інтернет–Освіта–Наука”, м. Вінниця (2008 р., 2010 р.); IV Міжнародній НТК з оптоелектронних інформаційних технологій “Фотоніка – ODS”, м. Вінниця (2008 р.); IX і X Міжнародних конференціях “Контроль і управління в складних системах”, м. Вінниця (2008 р., 2010 р.); IV Міжнародній НТК “Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування-2009”, м. Вінниця, (2009 р.); Міжнародній науково-практичній конференції (НПК) “Транс-формаційні реформи та антикризовий потенціал економіки в постсоціалістичних країнах”, м. Вінниця (2009 р.); III Всеукраїнській НПК молодих учених та студентів “Ін-формаційні процеси і технології “Інформатика – 2010”, м. Севастополь (2010 р.); II Международной конференции “Трехмерная визуализация научной, технической и социальной реальности. Технологии высокополигонального моделирования”, г. Ижевск (2010 г.); IV Всеукраїнській НПК “Сучасні тенденції розвитку інформаційних технологій в науці, освіті та економіці”, м. Луганськ (2010 р.); Міжнародній науковій конференції студентів та молодих вчених “Політ-2011”, м. Київ (2011 р.); IV Міжнародній НТК “Моделювання та комп’ютерна графіка”, м. Донецьк (2011 р.); Міжнародній НПК “Сучасні напрямки теоретичних і прикладних досліджень”, м. Одеса (2011 р.); Міжнародній науково-практичній Інтернет-конференції “Електронні ресурси та технології: створення, використання, доступ”, м. Вінниця (2011 р.); VIII Міжнародній НПК “Простір і час – система координат розвитку людства”, м. Одеса (2011 р.); 10th International Conference on Development and Application Systems, Suceava – Romania, (2010).

Публікації. За результатами виконаних досліджень опубліковано 39 наукових праць, з яких 15 статей у фахових наукових виданнях, 12 статей у збірниках матеріалів

міжнародних і всеукраїнських конференцій, 4 публікації у вигляді тез доповідей, 5 патентів на корисну модель і 3 свідоцтва на реєстрацію авторського права на комп'ютерну програму.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел, що містить 163 найменування, 12 додатків. Загальний обсяг роботи становить 210 сторінок, з яких основний зміст викладено на 159 сторінках друкованого тексту (на 20 сторінках розміщено рисунки та таблиці, які повністю займають площу сторінки). Робота містить 63 рисунка і 5 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми досліджень, сформульовано мету й задачі дисертаційної роботи, визначені об'єкт, предмет і методи дослідження, охарактеризовано наукову новизну та практичну цінність одержаних результатів, наведено відомості про їхню апробацію та реалізацію.

У **першому розділі** наведено аналіз методів і засобів формування зображень рельєфних поверхонь. Розглянуто особливості формування реалістичних зображень тривимірних об'єктів, проаналізовано основні етапи графічного конвеєра, серед яких виділено ті, які відповідають за формування зображень рельєфних поверхонь.

Запропоновано класифікацію методів формування зображень рельєфних поверхонь. Показано, що сьогодні найпоширенішими є методи, що імітують нерівності на зображеннях поверхні. Методи формування шорстких поверхонь з подальшим їх рендерингом характеризуються значними обчислювальними витратами, що обмежує їх використання, особливо при формуванні зображень у динамічному режимі.

Охарактеризовано методи імітації рельєфу на зображеннях поверхонь тривимірних об'єктів. Виділено їх складові процедури. Показано, що для забезпечення високої реалістичності доцільно виконувати перспективно-коректне текстурування, згідно з яким встановлюється відповідність кольору точок поверхонь в об'єктній та екранній системах координат.

Проаналізовано основні методи визначення нормалізованих векторів. Проведено аналіз методів розрахунку дистрибутивних функцій відбивальної здатності, розглянуто можливість їх застосування для задач формування зображень рельєфних поверхонь та особливості апаратної реалізації. Розглянуто питання функціонування засобів формування зображень рельєфних поверхонь у комп'ютерних системах генерації реалістичних зображень.

На основі проведеного аналізу сформульовано мету й задачі досліджень.

У **другому розділі** дисертаційної роботи розроблено методи прискореного розрахунку векторів.

Проведений аналіз методів формування зображень рельєфних поверхонь показав, що для формування реалістичних зображень необхідно розраховувати одиничні вектори до джерела світла \vec{L} , до спостерігача \vec{V} , а також вектори нормалі \vec{N} , які визначають локальну кривизну поверхні об'єкта. Процедура нормалізації має відносно велику обчислювальну складність, оскільки передбачає виконання операцій ділення та знаходження квадратного кореня. У зв'язку з цим актуальною задачею є розробка нових методів спрощеного визначення нормалізованих векторів.

Доведено властивість про сталість приростів ортогональних координатних складових (ОКС) векторів при їх лінійному інтерполюванні вздовж горизонтальних (вертикальних) рядків растеризації (РР) трикутника, що дозволило зменшити обчислювальні витрати на визначення векторів, оскільки прирости координатних складових векторів розраховуються для всього трикутника, а не для кожного РР.

Формули для розрахунку приростів ОКС векторів уздовж горизонтальних $\Delta_r \vec{N}$ і вертикальних $\Delta_b \vec{N}$ рядків растеризації мають такий вигляд:

$$\Delta_G \vec{N} = \frac{\Delta \vec{N}_{31}(y_2 - y_1) - \Delta \vec{N}_{21}(y_3 - y_1)}{(x_3 - x_1)(y_2 - y_1) - (x_2 - x_1)(y_3 - y_1)}, \quad \Delta_B \vec{N} = \frac{\Delta \vec{N}_{21}(x_3 - x_1) - \Delta \vec{N}_{31}(x_2 - x_1)}{(x_3 - x_1)(y_2 - y_1) - (x_2 - x_1)(y_3 - y_1)},$$

де (x_1, y_1) , (x_2, y_2) і (x_3, y_3) – екранні координати вершин трикутника; \vec{N}_1 , \vec{N}_2 і \vec{N}_3 – нормалізовані вектори, задані у відповідних вершинах трикутника; $\Delta \vec{N}_{31} = \vec{N}_3 - \vec{N}_1$, $\Delta \vec{N}_{21} = \vec{N}_2 - \vec{N}_1$. Діагональний крок еквівалентний одночасному виконанню горизонтального і вертикального кроків, тому $\Delta_D \vec{N} = \Delta_B \vec{N} + \Delta_G \vec{N}$. Розрахунок приростів $\Delta_G \vec{N}$, $\Delta_B \vec{N}$ або $\Delta_D \vec{N}$ доцільно виконувати на програмному рівні, а векторів уздовж PP – на апаратному, шляхом додавання до вектора в попередній точці одного з приростів $\Delta_G \vec{N}$, $\Delta_B \vec{N}$, $\Delta_D \vec{N}$ залежно від типу крокового приросту.

Для подальшого використання векторів при формуванні реалістичних зображень рельєфних поверхонь необхідно виконати їх нормалізацію. Для прискореної нормалізації вектора $\vec{N}(x, y, z)$, яка не передбачає виконання операцій ділення та знаходження квадратного кореня, і, як наслідок, має просту апаратну реалізацію, запропоновано таку формулу

$$\vec{N}' = \vec{N} / \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} = \vec{N} / \sqrt{K} \approx \vec{N} \cdot (0,822K^2 - 2,046K + 2,227). \quad (1)$$

Доведено, що при лінійному інтерполюванні векторів уздовж рядка растеризації за умови, що кут між нормалізованими векторами в початковій та кінцевій точках рядка растеризації не перевищує 90° , $K \in [0,499; 1]$. При цьому максимальна відносна похибка визначення одиничного вектора \vec{N}' за формулою (1) не перевищує 0,36%, що майже у 8 разів менше, ніж за поширеною формулою Ліона.

Для вилучення операцій множення з циклу розрахунку K запропоновано таку рекурентну формулу

$$K_{i+1} = K_i + 2\alpha + \beta_{i+1},$$

де $\alpha = (x_0 \Delta_G x + y_0 \Delta_G y + z_0 \Delta_G z)$, $\Delta_G x$, $\Delta_G y$, $\Delta_G z$ – прирости ОКС векторів при їх лінійному інтерполюванні уздовж горизонтальних PP, (x_0, y_0, z_0) – координати початкової точки PP, $\beta_{i+1} = \beta_i + 2\beta$, $\beta = (\Delta_G x)^2 + (\Delta_G y)^2 + (\Delta_G z)^2$, $\beta_0 = 1$, K_0 – квадрат довжини вектора в початковій точці PP, i -та точка PP. Значення K_0 , α і β можуть бути обчислені на підготовчому етапі, причому K_0 і α розраховуються один раз для PP, а параметр β , завдяки доведеній властивості про сталість приростів, обчислюється один раз для всього трикутника.

При формуванні зображень рельєфних поверхонь часто необхідно проводити додаткову триангуляцію, що передбачає необхідність визначення векторів у довільній точці поверхні, обмеженої трикутником. У роботі запропоновано визначати нормалізовані вектори в довільній точці поверхні, обмеженої трикутником, з використанням барицентричних координат за формулою

$$\vec{N}(c_1, c_2, c_3) = \vec{N}_1 c_1 (2c_1 - 1) + \vec{N}_2 c_2 (2c_2 - 1) + \vec{N}_3 c_3 (2c_3 - 1) + \vec{M}_{12} c_1 c_2 + \vec{M}_{23} c_2 c_3 + \vec{M}_{31} c_3 c_1, \\ \vec{M}_{ij} \approx 4(\vec{N}_i + \vec{N}_j) (0,103 \cdot (\vec{N}_i \cdot \vec{N}_j)^2 - 0,306 \cdot \vec{N}_i \cdot \vec{N}_j + 0,705),$$

де $c_1 = s_1 / \sum_{i=1}^3 s_i$, $c_2 = s_2 / \sum_{i=1}^3 s_i$, $c_3 = s_3 / \sum_{i=1}^3 s_i$ – барицентричні координати точки C ; \vec{N}_1 , \vec{N}_2 ,

\vec{N}_3 – вектори у вершинах трикутника; s_1 , s_2 і s_3 – площі складових трикутників (рис. 1).

Розрахунок площі s_i за формулою Герона передбачає 4 операції визначення квадратного кореня. Для зменшення кількості таких операцій при розрахунку барицентричних координат

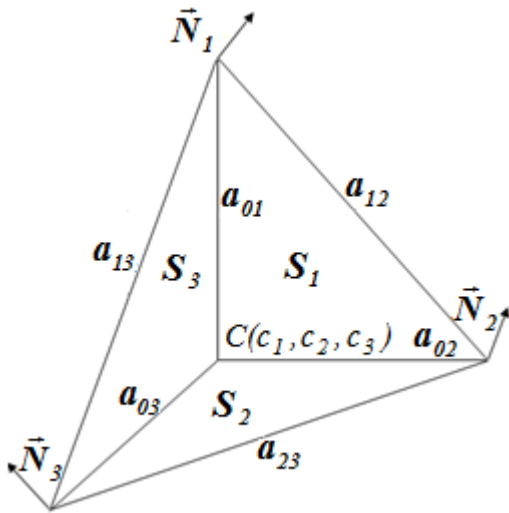


Рисунок 1 – Розбиття вихідного трикутника на складові

запропоновано формули

$$c_1 = \sqrt{\left(a_{12}^2 a_{02}^2 - \frac{(a_{23}^2 + a_{02}^2 - a_{01}^2)^2}{4} \right) \tau},$$

$$c_2 = \sqrt{\left(a_{23}^2 a_{03}^2 - \frac{(a_{23}^2 + a_{03}^2 - a_{02}^2)^2}{4} \right) \tau},$$

$c_3 = 1 - c_1 - c_2$, де $\tau = 1/a_{12}^2 h_{12}^2$ – розраховується один раз для усього трикутника, h_{12} – висота вихідного трикутника, опущена на сторону a_{12} . У запропонованих формулах для розрахунку барицентричних координат операції ділення можна замінити на мікрооперації зсуву.

Визначення векторів у довільній точці поверхні, обмеженої трикутником, дозволяє селективно визначити

параметри для рендерингу заданої точки поверхні, обмеженої трикутником, і, при необхідності, виконати додаткову триангуляцію, зокрема, для розпаралелення обчислювального процесу.

Запропоновано метод прискореного розрахунку нормалізованих векторів до точок рядка растеризації, особливість якого полягає у визначенні векторів до непарних точок рядка растеризації з використанням лінійного інтерполювання, а векторів, що розташовані між ними, – з використанням принципу дихотомії.

Нехай PP містить m точок. Позначимо позиції непарних точок PP через μ , а парних – через η . ОКС векторів у непарних точках PP можна визначити за формулою $\vec{N}_{\mu+2} = \vec{N}_{\mu} + 2\Delta N$, де ΔN – приріст ОКС векторів, який є сталим для всього трикутника. У подальшому отриманий вектор нормалізують. Якщо \vec{N}_{η} є наступним за вектором \vec{N}_{μ} , то його можна розрахувати згідно з принципом дихотомії за формулою

$$\vec{N}_{\eta} = (\vec{N}_{\mu+2} + \vec{N}_{\mu}) / \sqrt{2(1 + \cos \varphi_i)} \approx (\vec{N}_{\mu} + \vec{N}_{\mu+2}) (0,103 \cdot \cos \varphi_i^2 - 0,306 \cdot \cos \varphi_i + 0,705),$$

де φ_i – кут між векторами \vec{N}_{μ} і $\vec{N}_{\mu+2}$. Вектор \vec{N}_{η} є нормалізованим. Максимальна відносна похибка визначення вектора за наведеною формулою не перевищує 0,36%.

Доведено, що при лінійному інтерполюванні векторів уздовж рядків растеризації трикутника кути між парами векторів, що симетричні відносно крайніх точок рядка растеризації, є рівними. Це дозволило підвищити продуктивність визначення векторів за рахунок зменшення до 2 разів кількості розрахунку виразу $\cos \varphi_i$.

Процедуру визначення векторів можна ще спростити, якщо вектор \vec{N}_{η} знаходити за формулою: $\vec{N}_{\eta} = (\vec{N}_{\mu} + \vec{N}_{\mu+2}) / 2$. При такому підході нормалізовані вектори у непарних точках PP визначаються точно, а в парних – наближено. За умови, що кут $\varphi_i \leq 23^\circ$, максимальна відносна похибка не перевищує 2%. Підвищення продуктивності розрахунку одиничних векторів досягається за рахунок того, що до 2 разів зменшується кількість виконання процедур нормалізації векторів.

У **третьому розділі** дисертаційної роботи розроблено методи підвищення продуктивності перспективно-коректного текстурування (ПКТ).

Запропоновано для підвищення продуктивності розрахунку текстурних координат (ТК) використати нові рекурентні співвідношення для визначення ТК поточної точки у PP, що дозволило вилучити з циклу текстурування операції ділення.

Формула для розрахунку текстурної координати має вигляд:

$$u_{n+1} = u_n + \sum_q \Delta u,$$

де $\Delta u = u_{max}/p$ – приріст координати u , u_{max} – максимальне значення координати u , p – кількість точок текстури на осі u , q – кількість ітерацій накопичення Δu (рис. 2), яке здійснюють до тих пір, поки не буде справджуватися така система нерівностей

$$\begin{cases} W(x, y, u) = uE(x, y) - x(2a - \Delta ug) - y(2b - \Delta uh) - (2c - \Delta ui) \geq 0; \\ Q(x, y, u) = uE(x, y) - x(2a + \Delta ug) - y(2b + \Delta uh) - (2c + \Delta ui) < 0, \end{cases}$$

де (x, y) – екранні координати поточної точки РР, a, b, c, g, h, i – коефіцієнти ПКТ, $E(x, y) = 2(gx + hy + i)$. Коли знайдено значення координати u , що задовольняє наведені умови, здійснюють перехід до наступної точки РР.

Для зменшення розрахунків при визначенні умов запропоновано такі рекурентні формули:

– при збільшенні координати x на 1:

$$E(x+1, y) = E(x, y) + 2g,$$

$$W(x+1, y, u) = W(x, y, u) + 2gu - (2a - \Delta ug),$$

$$Q(x+1, y, u) = Q(x, y, u) + 2gu - (2a + \Delta ug);$$

– при збільшенні координати y на 1:

$$E(x, y+1) = E(x, y) + 2h,$$

$$W(x, y+1, u) = W(x, y, u) + 2hu - (2b - \Delta uh),$$

$$Q(x, y+1, u) = Q(x, y, u) + 2hu - (2b + \Delta uh);$$

– при зміні координати u на Δu :

$$W(x, y, u \pm \Delta u) = W(x, y, u) \pm \Delta u \cdot E(x, y), \quad Q(x, y, u \pm \Delta u) = Q(x, y, u) \pm \Delta u \cdot E(x, y).$$

Вирази $(2a - \Delta ug)$, $(2a + \Delta ug)$, $(2b - \Delta uh)$ і $(2b + \Delta uh)$ достатньо розрахувати один раз для всього полігона. Тоді для знаходження умов W і Q для наступної точки РР потрібно виконати лише 2 операції множення та 4 операції додавання.

Якщо поточне значення u не задовольняє наведені умови, то до нього необхідно додавати приріст Δu , якщо $W(x, y, u) < 0$, і віднімати – при $Q(x, y, u) \geq 0$.

Підвищення продуктивності розрахунку ТК досягається за рахунок вилучення операцій ділення. Запропонований метод дозволяє знайти точні значення ТК і є універсальним, оскільки може бути застосованим як для цілочислового, так і для дробового представлення ТК, що задовольняє вимоги стандартів OpenGL і DirectX.

Запропоновано метод ПКТ, який використовує квадратичне рівняння виду $u = A_1 x^2 + A_2 x + A_3$ для розрахунку ТК уздовж j -го РР, для якого $y_j = const$.

Формули для розрахунку коефіцієнтів A_1 , A_2 і A_3 мають вигляд:

$$A_1 = \rho(u_0(x_1 - x_2) + u_1(x_2 - x_0) + u_2(x_0 - x_1)), \quad A_2 = \rho(x_0^2(u_1 - u_2) + x_1^2(u_2 - u_0) + x_2^2(u_0 - u_1)),$$

$$A_3 = \rho(x_0^2(x_1 u_2 - x_2 u_1) + x_1^2(x_2 u_0 - x_0 u_2) + x_2^2(x_0 u_1 - x_1 u_0)),$$

де x_0, x_2, x_1 – значення координати x відповідно у крайніх і внутрішній точках РР, u_0, u_2, u_1 – значення текстурної координати u відповідно у крайніх і внутрішній точках РР, $\rho = 1/(x_0^2(x_1 - x_2) + x_1^2(x_2 - x_0) + x_2^2(x_0 - x_1))$ – розраховується 1 раз для РР.

Запропоновані формули не вимагають нормалізації значень екранних координат, що дозволяє прискорити процес розрахунку текстурних координат.

Запропоновано метод прискореного визначення ТК, у якому використано параметричне

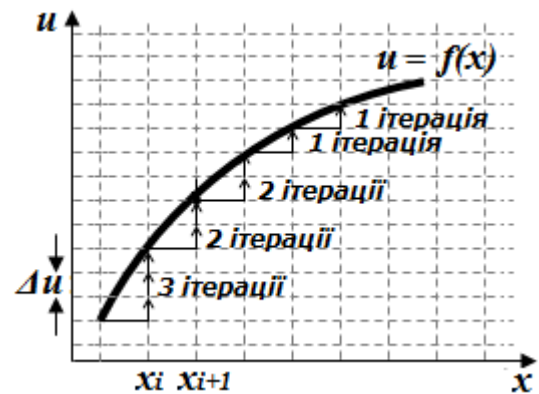


Рисунок 2 – Адитивне визначення ТК

рівняння кривої Безье другого порядку. Для j -го РР, для якого $y_j = const$,

$$x(t) = (1-t)^2 x_0 + 2t(1-t)x_1 + t^2 x_2, \quad u(t) = (1-t)^2 u_0 + 2t(1-t)u_1 + t^2 u_2,$$

де $t \in [0,1]$, x_0, x_2 і u_0, u_2 – значення відповідно координати x і текстурної координати u у кінцевих точках РР. Формули для розрахунку x_1 і u_1 мають такий вигляд:

$$x_1 = \frac{(u_0 - u_2)C_0 C_2 - A(x_0 C_2 - x_2 C_0)}{A(C_0 - C_2)}, \quad u_1 = u_0 + \frac{A}{C_0}(x_1 - x_0),$$

де $C_0 = (gx_0 + B)^2$, $C_2 = (gx_2 + B)^2$, $A = aB - g(by + c)$, $B = (hy + i)$.

Коефіцієнти A і B для наступного РР можна визначити за формулами

$$A(y+1) = (y) + (ah - gb) = (y) + D, \quad B(y+1) = B(y) + h.$$

Для прискорення розрахунку $x(t)$ запропоновано рекурентну формулу

$$x(t+dt) = x(t) + \Delta_x(t+dt), \quad \Delta_x(t+dt) = \Delta_x(t) + d_x,$$

де $\Delta_x(0) = 2dt(x_1 - x_0) + dt^2 S_x$, $d_x = 2dt^2 S_x$, $S_x = x_0 - 2x_1 + x_2$, dt – приріст параметра t .

Аналогічний вигляд мають формули для розрахунку $u(t)$ і $v(t)$.

Підвищення продуктивності визначення ТК згідно із запропонованим методом досягається за рахунок використання рекурентних формул, що містять у циклі текстурування лише операції додавання. При цьому досягається підвищення точності розрахунку ТК до 7 разів порівняно з методом, що використовує квадратичне рівняння.

Четвертий розділ дисертаційної роботи присвячено розробці та удосконаленню методів підвищення продуктивності формування зображень рельєфних поверхонь.

Метод бамп-меппінгу передбачає збурення векторів нормалей \vec{N} у кожній точці поверхні з метою імітації нерівностей. Внаслідок збурення вектора \vec{N} кут γ між ним і вектором $\vec{H} = (\vec{L} + \vec{V}) / |\vec{L} + \vec{V}|$ змінюється, що дозволяє імітувати нерівності шляхом зміни кута γ на величину $d\gamma$ з подальшим обчисленням дистрибутивної функції відбивальної здатності (ДФВЗ) поверхні виду $\cos^n \gamma$

$$\cos(\gamma \pm d\gamma)^n = (\cos(\gamma)\cos(d\gamma) \mp \sin(\gamma)\sin(d\gamma))^n, \quad (2)$$

де $n = \overline{1, 1000}$ – коефіцієнт спекулярності поверхні.

У формулі (2) використовуються не значення кутів, обчислення яких є достатньо трудомістким, а тригонометричні функції.

Для обчислення дифузної складової кольору виконують збурення функції $\cos \phi$, яку отримують шляхом визначення скалярного добутку векторів \vec{N} і \vec{L} .

На відміну від класичної реалізації бамп-меппінгу запропонований метод імітації нерівностей, оснований на збуренні ДФВЗ, дозволяє вилучити процедуру збурення вихідного вектора нормалі до поверхні та подальшу його нормалізацію, які є найтрудомісткішими у процесі імітації нерівностей. Це дає можливість підвищити продуктивність формування зображень рельєфних поверхонь.

Дистрибутивна функція відбивальної здатності $\cos^n \gamma$ використовується при формуванні рельєфних поверхонь для визначення інтенсивностей спекулярної складової кольору, при цьому коефіцієнт n спекулярності поверхні змінюється від 1 до 1000. Оскільки ДФВЗ має високий степінь і обчислюються для кожної точки поверхні, то продуктивність формування графічних сцен значною мірою визначається саме часом розрахунку ДФВЗ.

Для апроксимації функції $\cos^n \gamma$ запропоновано використати функцію виду

$W(n, \gamma) = \left(\left(\frac{n+1}{k+1} \right) \cdot (\cos \gamma - 1) + 1 \right)^k$, де $k \ll n$. Для вилучення операцій ділення при

обчисленні $W(n, \gamma)$ доцільно вибирати k , яке дорівнює 3, 7 або 15, оскільки у таких випадках операцію ділення можна замінити операцією зсуву. Проте, для зменшення обчислювальної складності, операцію піднесення до степеня простіше виконувати, коли степінь є кратним степеню двійки. Використання $k=4$, $k=8$ і $k=16$ у запропонованій ДФВЗ призведе до необхідності виконання операції ділення, тому для зменшення обчислювальної складності було запропоновано апроксимаційні формули, які просто реалізувати апаратно, оскільки в них мікрооперації ділення можна замінити мікроопераціями зсуву та додавання:

$$\frac{n+1}{4+1} \approx \frac{n+1}{4} - \frac{n+1}{8} + \frac{n+1}{64} - \frac{n+1}{256}, \quad \frac{n+1}{8+1} \approx \frac{n+1}{8} - \frac{n+1}{64} + \frac{n+1}{512}, \quad \frac{n+1}{16+1} \approx \frac{n+1}{16} - \frac{n+1}{256}.$$

Показано, що зі збільшенням k , точність відтворення відблисків зростає. При $k=16$ забезпечується висока точність відтворення як епіцентра відблиску, так і його блюмінгу.

Запропоновано метод підвищення продуктивності нормал-меппінгу, у якому використано нові формули прискореної трансформації векторів \vec{L} і \vec{H} у дотичний простір, що дозволило підвищити продуктивність за рахунок спрощення обчислювального процесу. Трансформацію векторів \vec{L} і \vec{H} у дотичний простір виконують шляхом їх подвійного повороту з використанням значень координат лише вектора нормалі, що не потребує визначення векторів дотичної та бінормалі.

Формули трансформації вектора \vec{L} у дотичний простір за умови, що всі вектори задані в декартових координатах, мають вигляд

$$L'_x = (L_x N_z - L_z N_x) N_{RSR}, \quad L'_y = (L_y - L_{xyz} N_y) N_{RSR}, \quad L'_z = L_{xyz},$$

де $L_{xyz} = L_y N_y + L_x N_x + L_z N_z$, $N_{RSR} = 1 / \sqrt{1 - N_y^2}$.

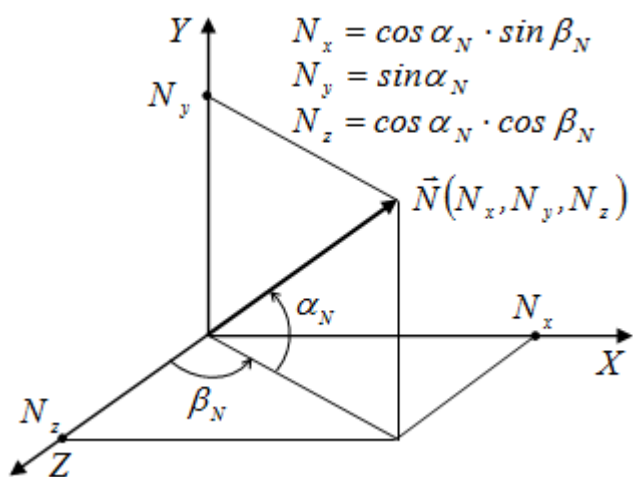


Рисунок 3 – Зображення одиничного вектора у полярній системі координат

розрахунку дифузної та спекулярної складових кольору з використанням нормалі \vec{N}' , яка зчитується з карти нормалей.

Зменшити розміри карт нормалей можна за рахунок подання збурених векторів нормалей у полярних координатах. У випадку, коли вектори \vec{N}' і \vec{L}' задані у полярних координатах, формула для визначення скалярного добутку $\vec{N}' \cdot \vec{L}'$, який використовується для розрахунку дифузної складової освітлення, має вигляд

Формули трансформації вектора \vec{L} у дотичний простір за умови, що всі вектори задані у полярних координатах (рис.3), такі:

$$L'_x = \cos \alpha_L \sin(\beta_L - \beta_N),$$

$$L'_y = \sin \alpha_L \cos \alpha_N - L_{yz} \sin \alpha_N,$$

$$L'_z = \sin \alpha_L \sin \alpha_N + L_{yz} \cos \alpha_N,$$

де $L_{yz} = \cos(\beta_L - \beta_N) \cos \alpha_L$.

Вектори, трансформовані з використанням запропонованих формул, є нормалізованими, що дозволяє при формуванні зображень рельєфних поверхонь вилучити трудомістку процедуру нормалізації векторів.

Після трансформації у дотичний простір вектори \vec{L} і \vec{H} використовуються для

$$\vec{N}' \cdot \vec{L}' = \frac{1}{2} \left((\cos(\alpha_{N'} - \alpha_{L'}) + G_1) (\cos(\beta_{N'} - \beta_{L'}) + 1) \right) - G_1, \text{ де } G_1 = \cos(\alpha_{N'} + \alpha_{L'}).$$

На відміну від розрахунку значення $\vec{N}' \cdot \vec{L}'$ за умови, коли вектори задано у декартових координатах, розрахунок за наведеною формулою вимагає виконання не трьох, а лише однієї операції множення.

Запропоновано ітераційний метод підвищення точності паралакс-меппінгу (рис. 4), у якому

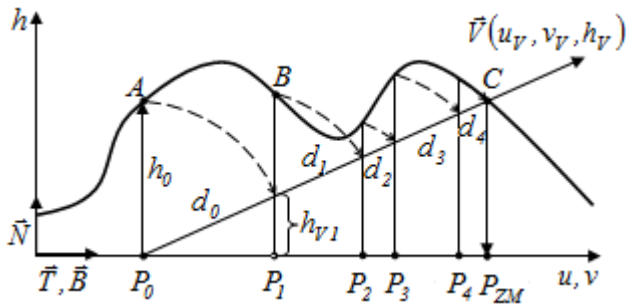


Рисунок 4 – Вибір кроку трасування вектора \vec{V}

вперше для вибору кроку трасування вектора \vec{V} використано нові параметри, які залежать від значення висоти поверхні, що імітується, та z -координати вектора \vec{V} у поточній точці.

$$P_1(u_1, v_1) = P_0(u_0, v_0) + h_0 \cdot \vec{V}(u_V, v_V),$$

$$P_2(u_2, v_2) = P_1(u_1, v_1) + (h_1 - h_{V1}) \cdot \vec{V}(u_V, v_V),$$

$$P_{i+1}(u_{i+1}, v_{i+1}) = P_i(u_i, v_i) + d_i \cdot \vec{V}(u_V, v_V),$$

де $d_i = h_i - h_{V_i}$, $h_{V_i} = h_{V_{i-1}} + d_{i-1} h_V$.

Для виконання розрахунків використовуються лише операції множення та додавання, що спрощує апаратну реалізацію.

У **п'ятому розділі** дисертаційної роботи розглянуто особливості програмної та апаратної реалізації розроблених методів формування зображень рельєфних поверхонь, а також наведено результати експериментальних досліджень.

Програмне моделювання розроблених методів і засобів рендерингу виконувалося з метою перевірки їх достовірності та отримання порівняльних оцінок, а також для впровадження в пакети прикладних програм.

Для моделювання методів перспективно-коректного накладання текстур було розроблено комп'ютерну програму (Свідоцтво на реєстрацію авторського права на комп'ютерну програму № 39738 у Державному департаменті інтелектуальної власності України), яка дозволяє формувати зображення у статичному режимі згідно з обраним методом текстурування.

Для отримання комплексних оцінок розроблено на основі бібліотеки `idx3d` комп'ютерну програму для моделювання та тестування запропонованих методів формування зображень рельєфних поверхонь у статичному та динамічному режимах. При цьому використано всі стадії графічного конвеєра. Встановлено візуальну відмінність між сформованим та еталонним зображеннями за нормованою середньо-квадратичною похибкою $NMSE$ та визначено динамічні характеристики зображень.

Для перевірки працездатності розроблених методів формування зображень рельєфних поверхонь у складі професійного графічного конвеєра `Render Monkey 1.80` компанії `ATI Technologies` було створено вершинні та піксельні шейдери, які передбачені специфікаціями `OpenGL` і `DirectX 11`.

Комп'ютерне моделювання показало, що запропоновані методи визначення одиничних векторів при формуванні графічних зображень забезпечують візуальну ідентичність сформованих зображень відносно еталонного ($NMSE \leq 0,0001$). У ви-падку використання формули $\vec{N}_\eta = (\vec{N}_\mu + \vec{N}_{\mu+2})/2$ для об'єктів з низькою щільністю триангуляційної мережі можуть спостерігатися незначні візуальні відмінності ($NMSE \in [0,00025 \div 0,0001]$), що прийнятно для формування динамічних сцен.

Показано, що при програмній реалізації методу визначення векторів \vec{N} , \vec{L} , \vec{H} , який використовує барицентричні координати, досягається підвищення продуктивності в 1,5 раза порівняно з методом, оснований на лінійній інтерполяції. При комбінуванні методів визначення одиничних векторів час розрахунків зменшується в середньому в 2,4 раза. Продуктивність

нормалізації вектора за формулою (1) при програмній реалізації зменшується в 3,2 раза порівняно з класичною реалізацією.

Запропоновані методи перспективно-коректного текстурування забезпечують візуальну ідентичність сформованих зображень відносно еталонних, за винятком використання квадратичної апроксимації, де мають місце незначні візуальні відмінності ($NMSE \in [0,00025 \div 0,0001]$) лише для низькополігональних об'єктів.

При програмній реалізації адитивного підходу до ПКТ час текстурування зменшується порівняно з поширеним методом Хекберта в середньому в 1,5 раза, а при реалізації розроблених методів ПКТ, що використовують криві Безьє, – у 3,8 раза.

Запропонована в роботі нова модель відбивальної здатності поверхні на основі ДФВЗ при $k = 16$, порівняно з поширеною функцією Шліка, обчислюється програмно в 1,6 раза швидше. При цьому досягається зменшення максимальної відносної похибки апроксимації епіцентра відблиску в 7 разів, а блюмінгу – у 13 разів.

Метод формування зображень рельєфних поверхонь шляхом збурення ДФВЗ для розрахунку спекулярної складової кольору дозволяє при програмній реалізації підвищити швидкість формування зображень рельєфних поверхонь до 7 разів при $NMSE$, яка не перевищує 0,0002.

Використання формул прискореної трансформації векторів у дотичний простір не погіршує якість формування зображень. При цьому розроблені програмні засоби забезпечили підвищення продуктивності виконання процедури трансформації векторів у дотичний простір у середньому в 6 разів.

При комплексному використанні розроблених методів (метод нормал-мепінгу; метод ПКТ, що використовує криві Безьє; комбінований метод визначення нормалізованих векторів; нова ДФВЗ) при програмній реалізації досягається підвищення продуктивності формування зображень рельєфних поверхонь у середньому в 2,5–4 рази порівняно з базовим методом нормал-мепінгу. При цьому збережено візуальну ідентичність з еталонними зображеннями. На рис. 5 наведено приклади зображень рельєфних поверхонь об'єктів з використанням розроблених методів.



Рисунок 5 – Приклади синтезованих зображень

У дисертаційній роботі розглянуто питання апаратної реалізації пристроїв для формування зображень рельєфних поверхонь у системах комп'ютерної графіки. Запропоновано структурні схеми підсистеми визначення векторів у довільній точці та підсистем імітації нерівностей на зображенні поверхні, що базуються на: а) збуренні ДФВЗ, б) використанні нових формул прискореної трансформації векторів у дотичний простір. Розроблено структурні схеми: а) блока для нормалізації векторів за формулою (1); б) блока спрощеного визначення підкореневого виразу у формулі нормалізації векторів; в) блока визначення синуса на основі кусково-кубічної апроксимації; г) блока визначення текстурної координати з використанням квадратичної апроксимації; д) блока обчислення коефіцієнтів a_{12}^2, a_{23}^2, τ ; е) блоків трансформації вектора у дотичний простір за значеннями декартових і полярних координат вектора нормалі.

Запропоновано апаратні засоби для обчислення спекулярної складової кольору.

На рис. 6 зображено запропоновану структурну схему підсистеми імітації нерівностей на зображенні поверхні шляхом збурення ДФВЗ. Підсистема містить такі блоки: БВНВ – блок визначення нормалізованих векторів $\vec{N}_i, \vec{L}_i, \vec{H}_i$; БВ $\cos\gamma_{1i}$ і БВ $\cos\gamma_{2i}$ – блоки визначення $(\vec{N}_i \cdot \vec{H}_i)$ і $(\vec{N}_i \cdot \vec{L}_i)$ відповідно; БРЗССК і БРЗДСК – блоки розрахунку відповідно збуреної спекулярної та дифузної складових кольору; БВТК – блок визначення ТК; БВЗО – блок розрахунку загального освітлення, у якому розраховується результуюча інтенсивність кольору точки зображення.

Структурну схему підсистеми інтерполяції векторів у довільній точці поверхні, обмеженої трикутником, наведено на рис. 7. Підсистема містить такі блоки: БВ a_{12}^2, a_{23}^2, τ – блок визначення коефіцієнтів a_{12}^2, a_{23}^2, τ , які розраховуються один раз для поточного трикутника; БВБК – блок визначення барицентричних координат; БВВСТР – блок визначення векторів у середніх точках ребер; БВВ – блок інтерполяції векторів, який розраховує значення вектора до поточної точки РР.

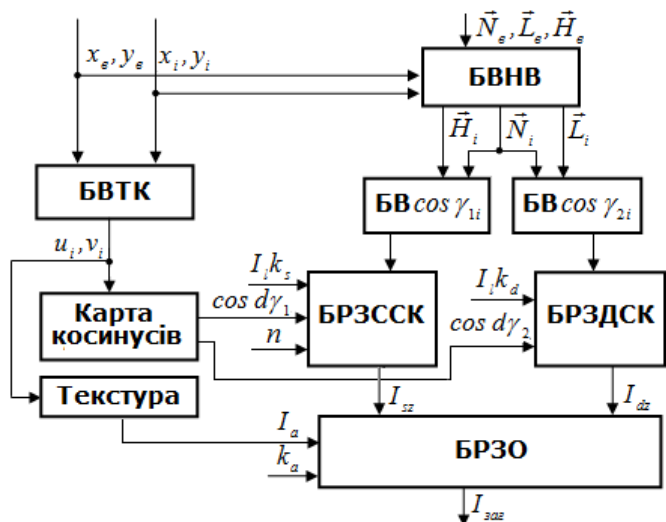


Рисунок 6 – Структурна схема підсистеми імітації нерівностей на зображенні поверхні шляхом збурення ДФВЗ

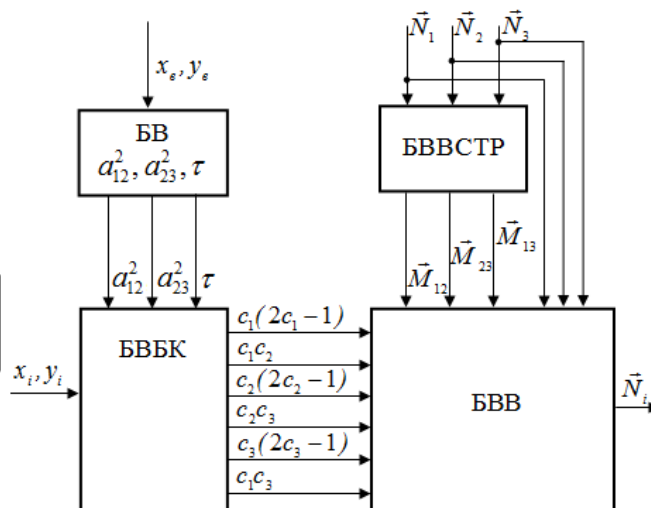


Рисунок 7 – Структурна схема підсистеми визначення векторів у довільній точці

На рис. 8 зображено структурну схему БРЗССК із використанням формули $\left[n/2(\cos\gamma \cdot \cos d\gamma \mp \sin\gamma \cdot \sin d\gamma - 1) + 1 \right]^2$.

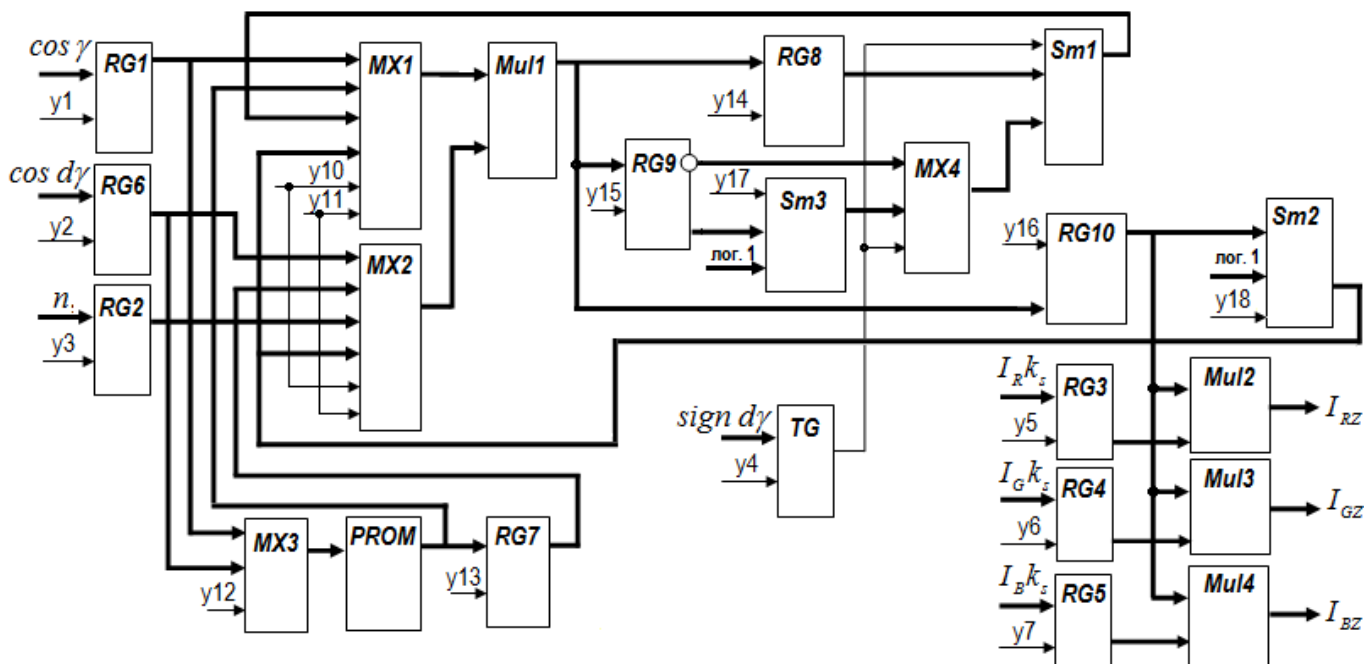


Рисунок 8 – Структурна схема БРЗССК (Патент України №60139)

Блок БРЗССК містить блок постійної пам'яті *PROM*, регістри *RG1 ÷ RG10*, суматори *Sm1 ÷ Sm3*, блоки множення *Mul1 ÷ Mul4*, мультиплектори *MX1 ÷ MX4*, тригер *TG* знаку приросту *dy*. Особливість пристрою полягає в тому, що він не містить блоків розрахунку тригонометричних операцій.

Розроблено структурну схему пристрою (рис. 9) для нормалізації векторів, який містить регістри *RG1 ÷ RG3*, блоки множення *Mul1 ÷ Mul8* і суматори *Sm1 ÷ Sm3*. Особливість пристрою полягає в тому, що він не містить блоків ділення та визначення квадратного кореня.

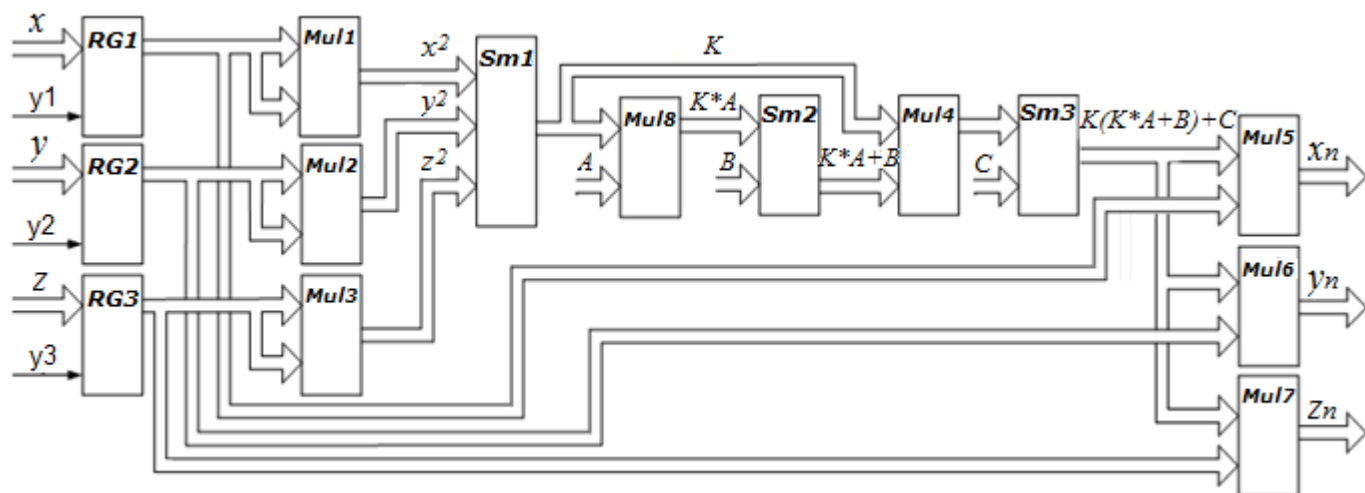


Рисунок 9 – Пристрій для нормалізації вектора (Патент України № 63343)

Розроблені програми для рендерингу захищено 3-ма свідоцтвами на реєстрацію авторських прав на комп'ютерні програми в Державному департаменті інтелектуальної власності, а структури апаратних засобів – 5-ма патентами України.

У додатках наведено лістинг основних програмних модулів, документи про впровадження результатів наукових досліджень та інші матеріали.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі проведено дослідження, присвячені підвищенню продуктивності формування зображень рельєфних поверхонь у системах комп'ютерної графіки за рахунок зменшення складності обчислювального процесу та програмно-апаратної реалізації.

Основні результати досліджень:

1. Проведено аналіз сучасних методів і засобів формування зображень рельєфних поверхонь у системах комп'ютерної графіки. Показано, що на цьому етапі розвитку комп'ютерної графіки найпоширенішими є методи імітації рельєфу на зображеннях тривимірних об'єктів, оскільки вони забезпечують прийнятний компроміс між продуктивністю та реалістичністю. Розроблено класифікацію методів формування зображень рельєфних поверхонь.

2. Вперше запропоновано апаратно-орієнтований метод імітації нерівностей на зображенні поверхні графічних об'єктів, у якому використано збурення дистрибутивних функцій відбивальної здатності для розрахунку дифузної та спекулярної складових кольору, що дозволило підвищити продуктивність формування зображень до 7 разів за рахунок вилучення з обчислювального процесу процедур трансформації векторів та їх нормалізації.

3. Запропоновано метод підвищення продуктивності перспективно-коректного накладання текстур, у якому вперше використано нові рекурентні співвідношення для визначення текстурних координат поточної точки у рядку растеризації, що дозволило вилучити з циклу текстурування операції ділення та підвищити продуктивність до 4 разів.

4. Запропоновано метод підвищення продуктивності нормал-меппінгу, у якому використано нові формули прискореної трансформації векторів у дотичний простір. Застосування формули трансформації пари векторів у дотичний простір за значеннями декартових координат вектора нормалі дозволило підвищити продуктивність цієї процедури у 6,7 раза, а формули, яка використовує значення полярних координат вектора нормалі, – у 5,95 раза. Зображення, сформовані з використанням цих формул, є візуально ідентичними з еталонними. Метод може бути використаний для побудови як програмних, так і апаратних компонент графічних систем.

5. Удосконалено метод перспективно-коректного текстурування Баренберга, особливість якого полягає у відсутності операцій ділення в циклі текстурування, що дало можливість підвищити продуктивність розрахунку текстурних координат у 1,5 раза. Метод враховує як цілочислові, так і дробові подання текстурних координат, що дозволило розширити сферу його застосування і, як наслідок, задовольнити вимоги специфікацій DirectX і OpenGL.

6. Запропоновано для прискорення формування зображень рельєфних поверхонь нову модель відбивальної здатності поверхні, яка, порівняно з відомими, забезпечує вищу точність відтворення як епіцентра відблиску, так і його блюмінгу, та забезпечує підвищення продуктивності в 1,6 раза порівняно з поширеною моделлю відбивальної здатності Шліка.

7. Удосконалено методи визначення нормалізованих векторів, у яких, на відміну від існуючих, використано нові властивості та апроксимаційні формули, що забезпечило підвищення продуктивності як на апаратному, так і програмному рівнях.

8. Розроблено структурні схеми пристроїв для формування зображень рельєфних поверхонь у системах комп'ютерної графіки.

9. Створено спеціалізовані програмні засоби для моделювання та тестування запропонованих методів формування зображень рельєфних поверхонь, які дозволяють отримати порівняльні оцінки за точністю і продуктивністю.

10. Створено діючі програмні засоби для формування зображень рельєфних поверхонь, які інтегровані в професійний графічний конвеєр.

11. Результати дисертаційної роботи впроваджено на ряді підприємств, а також у навчальний процес у Вінницькому національному технічному університеті.

Отримані характеристики та параметри розроблених апаратних і програмних засобів підтверджують коректність наукових положень та адекватність запропонованих методів.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Романюк О. В. Високопродуктивний метод перспективно-коректного текстурування / О. В. Романюк // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2010. – № 2 (89). – С. 74–77. – ISSN 1997-9266.
2. Романюк О. В. Продуктивний метод формування високореалістичних зображень рельєфних поверхонь на базі нової моделі дистрибутивної функції / О. В. Романюк // Наукові праці ДонНТУ. Серія: Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка. – 2011. – № 14 (188). – С. 221–226. – ISSN 1996-1588.
3. Романюк О. В. Продуктивні методи квадратичної апроксимації перспективно-коректного текстурування / О. В. Романюк // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – 2010. – № 10 (152). – С. 194–198. – ISSN 1998-7927.
4. Романюк О. В. Використання барицентричних координат для розрахунку векторів у довільній точці трикутника / О. В. Романюк, В. В. Войтко // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2009. – № 1. – С. 198–202. – ISSN 2219-9365.
5. Романюк О. В. Один із апаратних підходів до нормалізації векторів у системах комп'ютерної графіки / О. В. Романюк, О. Н. Романюк, Т. М. Павлик // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2010. – Т. 2. – С. 140–144. – ISSN 2219-9365.
6. Романюк О. В. Один із підходів до спрощення процедури визначення векторів нормалей / О. В. Романюк, В. В. Войтко, О. П. Гончарук // Вестник Херсонского национального технического университета. – 2010. – № 3 (39). – С. 404–408. – ISSN 2078-4481.
7. Войтко В. В. Аналіз методів нормалізації векторів нормалей для задач формування тривимірних зображень [Електронний ресурс] / В. В. Войтко, О. В. Романюк // Наукові праці ВНТУ. – 2009. – №1. – С. 1–7. – Режим доступу до журналу: http://www.nbu.gov.ua/e-journals/VNTU/2009-1/2009-1.files/uk/09vvvtdi_ua.pdf.
8. Войтко В. В. Аналіз основних підходів до формування шорстких поверхонь / В. В. Войтко, О. В. Романюк, В. О. Денисюк // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2007. – № 2. – С. 119–124. – ISSN 2219-9365.
9. Войтко В. В. Модифікація методів паралакс меппінгу / В. В. Войтко, О. В. Романюк, О. М. Мельников // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2008. – № 1. – С.122–126. – ISSN 2219-9365.
10. Войтко В. В. Один із підходів до апаратної реалізації бамп-меппінгу / В. В. Войтко, О. В. Романюк // Наукові праці ДонНТУ. Серія: Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка. – 2009. – № 10 (153). – С. 101–104. – ISSN 1996-1588.
11. Вяткин С. И. Базовые операции для формирования рельефа и изменения формы сложных функциональных поверхностей в системах компьютерной визуализации / С. И. Вяткин, А. Н. Романюк, О. В. Романюк // Реєстрація, зберігання та обробка даних. – 2010. – Т. 12, № 3. – С. 16–24. – ISSN 1560-9189.
12. Вяткин С. И. Метод формирования изображений рельефных поверхностей / С. И. Вяткин, О. В. Романюк // Реєстрація, зберігання та обробка даних. – 2009. – Т. 11, № 4. – С. 51–58. – ISSN 1560-9189.
13. Вяткин С. И. Отображение контурной текстуры на произвольно ориентированные плоские и криволинейные поверхности / С. И. Вяткин, О. В. Романюк, Н. С. Костюкова // Наукові праці ДонНТУ. Серія: Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка. – 2010. – № 11 (164). – С. 118–121. – ISSN 1996-1588.
14. Романюк О. Н. Комбінування методів для прискорення зафарбовування / О. Н. Романюк, О. В. Романюк, В. Г. Мальований // Реєстрація, зберігання та обробка даних. – 2010. – Т. 12, № 4. – С. 13–21. – ISSN 1560-9189.
15. Романюк О. Н. Особливості архітектурної побудови систем формування тривимірних зображень / О. Н. Романюк, О. В. Романюк, М. Д. Обідник, Н. С. Костюкова // Наукові праці ДонНТУ. Серія: Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка. – 2010. – № 12 (165). –

С. 87–93. – ISSN 1996-1588.

16. Романюк О. В. Адаптивний метод перспективно-коректного накладання текстур / О. В. Романюк // Електронні ресурси та технології: створення, використання, доступ : міжнар. наук.-практ. Інтернет-конф., м. Вінниця, 10–17 травня 2011 р. : матер. – К. : Кондор, 2011. – С. 145–148.

17. Романюк О. В. Комбінований метод прискореного визначення одиничних векторів / О. В. Романюк // Простір і час – система координат розвитку людства : Міжнар. наук.-практ. конф., 25 серпня – 1 вересня 2011 р. : матер. – Одеса : InPress, 2011. – С. 11–13. – ISBN 978-966-2621-05-1.

18. Романюк О. В. Підходи до квадратичної апроксимації перспективно-коректного текстурування / О. В. Романюк // Сучасні тенденції розвитку інформаційних технологій в науці, освіті та економіці : Всеукр. наук.-практ. конф., 15–17 квітня 2010 р. : матер. – Луганськ : Phoenix, 2010. – С. 90–92.

19. Романюк О. В. Продуктивний метод імітації нерівностей на зображенні поверхні з використанням карт нормалей / О. В. Романюк // Моделювання та комп'ютерна графіка : Міжнар. наук.-техн. конф., 5–8 жовтня 2011 р. : матер. – Донецьк, 2011. – С. 208–212.

20. Романюк О. В. Реалізації вершинного displacement-меппінгу на сучасних графічних процесорах / О. В. Романюк // Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування “СПРТП-2009” : Міжнар. наук.-техн. конф., 8–10 жовтня 2009 р. : матер. – Вінниця, 2009. – С. 61.

21. Романюк О. В. Адитивний підхід до перспективно-коректного текстурування / О. В. Романюк, В. В. Войтко // Інформаційні процеси і технології “Інформатика – 2010” : Всеукр. наук.-практ. конф. молодих учених та студентів, 26–30 квітня 2010 р. : матер. – Севастополь : Вид-во СевНТУ, 2010. – С. 180–182.

22. Романюк О. В. Використання шуму Перліна у задачах комп'ютерної графіки / О. В. Романюк, С. І. Вяткін // Інтернет–Освіта–Наука - 2010 : Міжнар. наук.-практ. конф., 28 вересня – 3 жовтня 2010 р. : матер. – Вінниця : ВНТУ, 2010. – С. 280–282. – ISBN 978-966-641-377-5.

23. Романюк О. В. Зменшення обчислювальної складності процедури нормалізації векторів для задач комп'ютерної графіки / О. В. Романюк, Т. М. Павлик, А. А. Заєць // Політ-2011. Сучасні проблеми науки : Міжнар. наук.-практ. конф. молодих вчених і студентів, 6–7 квітня 2011 р. : тези доповідей. – Київ, 2011. – Т. 1. – С. 62.

24. Романюк О. В. Модифицированный метод перспективно-коректного наложения текстур [Електронний ресурс] / О. В. Романюк, В. В. Войтко // Трехмерная визуализация научной, технической и социальной реальности. Технологии высоко-полигонального моделирования : Междунар. наук.-практ. конф., 3–5 февраля 2010 г. : матер. – Ижевск : УдГУ. – 2010. Режим доступа: http://conf3d.udsu.ru/components/com_participants/docs/166_Romanyuk.pdf.

25. Романюк О. В. Основні підходи до управління якістю формування зображень в системах комп'ютерної графіки [Електронний ресурс] / О. В. Романюк, С. І. Вяткін, В. В. Войтко // Контроль і управління в складних системах (КУСС-2010) : Міжнар. конф., 19–21 жовтня 2010 р. : тези доповідей. – Вінниця, 2010. – С. 162. – Режим доступу: http://www.vstu.vinnica.ua/mccs2010/materials/subsection_2.3.pdf.

26. Войтко В. Аналіз технологій bump-mapping / В. Войтко, О. Романюк // Фотоніка – ODS 2008 : Міжнар. наук.-техн. конф. з оптоелектронних інформаційних технологій, 30 вересня – 2 жовтня 2008 р. : тези доповідей. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2008. – С. 28–29. – ISBN 978-966-641-264-8.

27. Войтко В. В. Аналіз етапів сучасних графічних конвеєрів [Електронний ресурс] / В. В. Войтко, О. В. Романюк, Л. М. Круподьорова // Контроль і управління в складних системах (КУСС-2008) : міжнар. наук. конф., 21–24 жовтня 2008 р. : тези доповідей. – Вінниця, 2008. – Режим доступу до журналу: http://www.vstu.vinnica.ua/mccs2008/materials/subsection_1.2.pdf.

28. Войтко В. Ефективні методи нормалізації векторів нормалей / Вікторія Войтко, Оксана Романюк // Інтернет – Освіта – Наука – 2008 : Міжнар. наук.-практ. конф., 8–11 жовтня 2008 р. : матер. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2008. – Т. 2. – С. 356–359. – ISBN 978-966-

641-268-6.

29. Вяткин С. И. Формирование реалистических изображений с использованием пошагового вычисления текселей / С. И. Вяткин, О. В. Романюк, А. А. Стахов // Сов-ременные направления теоретических и прикладных исследований : Междунар. науч.-практ. Интернет-конф., г. Одесса, 15–28 марта 2011 г. : матер. – Одесса : изд-во Черноморье, 2011. – Т. 3. – С. 65–68. – ISBN 966-555-192-2.

30. Мельников О. М. Основні вимоги до побудови систем кінцевої візуалізації / О. М. Мельников, О. В. Романюк, А. С. Ізидінов // Прогресивні інформаційні технології в науці, освіті та економіці : Міжнар. наук.-практ. конф., 23–24 квітня 2009 р. : матер. – Вінниця : Вінницький кооперативний інститут, 2009. – С. 169–177.

31. Vyatkin S. I. Formation of Microrelief on the Base of Multilevel Elevation Maps / S. I. Vyatkin, O. V. Romaniuk // Development and Application Systems : International Conference, 27–29 of May 2010 : proceedings. – Suceava, Romania, 2010. – P. 386–389. – ISSN 1844-5039.

32. Патент України на корисну модель № 52755, (51) МПК (2009) G06T 15/50. Пристрій для визначення інтенсивності спекулярної складової кольору / О. В. Романюк, В. В. Войтко; заявник і патентовласник Вінницький національний технічний університет. – № 201001933; заявл. 22.02.2010; опубл. 10.09.2010, Бюл. № 17.

33. Патент України на корисну модель № 57784, (51) МПК (2011.01) G06T 15/00. Пристрій для визначення інтенсивності спекулярної складової кольору / О. Н. Романюк, В. В. Войтко, О. В. Романюк; заявник і патентовласник Вінницький національний технічний університет. – № 201010484; заявл. 30.08.2010; опубл. 10.03.2011, Бюл. № 5.

34. Патент України на корисну модель № 60553, (51) МПК (2011.01) G06T 15/00. Пристрій для визначення інтенсивності спекулярної складової кольору / О. Н. Романюк, Ю. Л. Ляшенко, О. В. Романюк; заявник і патентовласник Вінницький національний технічний університет. – № 201013613; заявл. 16.11.2010; опубл. 25.06.2011, Бюл. № 12.

35. Патент України на корисну модель № 60139, (51) МПК (2011.01) G06T 15/00. Пристрій для визначення інтенсивності спекулярної складової кольору при формуванні шорстких поверхонь / О. В. Романюк, О. Н. Романюк, В. В. Войтко; заявник і патентовласник Вінницький національний технічний університет. – № 201014241; заявл. 29.11.2010; опубл. 10.06.2011, Бюл. № 11.

36. Патент України на корисну модель № 63343, (51) МПК (2011.01) G06T 15/00. Пристрій для нормалізації векторів у системах комп'ютерної графіки / О. Н. Романюк, О. В. Романюк, Т. М. Павлик; заявник і патентовласник Вінницький національний технічний університет. – № 201101977; заявл. 21.02.2011 р.; опубл. 10.10.2011, Бюл. № 19.

37. Романюк О. В. Комп'ютерна програма для високореалістичного відтворення тривимірних об'єктів з використанням перспективно-коректного накладання текстур / О. В. Романюк // Свідоцтво на реєстрацію авторського права на твір № 39738. — Київ : Державний департамент інтелектуальної власності України. — Дата реєстрації: 18.08.2011 р.

38. Романюк О. В. Комп'ютерна програма для високопродуктивного текстурування з використанням квадратичної апроксимації / О. В. Романюк // Свідоцтво на реєстрацію авторського права на твір № 39740. — Київ : Державний департамент інтелектуальної власності України. — Дата реєстрації: 18.08.2011 р.

39. Войтко В. В. Комп'ютерна програма формування рельєфних поверхонь з використанням сферично-кутової інтерполяції / В. В. Войтко, О. В. Романюк // Свідоцтво на реєстрацію авторського права на твір № 31818. — Київ : Державний департамент інтелектуальної власності України. — Дата реєстрації: 28.01.2010 р.

АНОТАЦІЯ

Романюк О. В. Методи та засоби формування зображень рельєфних поверхонь у системах комп'ютерної графіки. – 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, 2012.

Дисертаційну роботу присвячено актуальним питанням підвищення продуктивності формування зображень рельєфних поверхонь у системах комп'ютерної графіки за рахунок зменшення складності обчислювального процесу та спрощення програмної та апаратної реалізації.

У роботі запропоновано нову моделі відбивальної здатності поверхні, нові методи прискореного визначення нормалізованих векторів, перспективно-коректного розрахунку текстурних координат та імітації рельєфу на зображеннях поверхонь графічних об'єктів.

На основі розроблених теоретичних засад створено продуктивні програмні та апаратні засоби для систем формування зображень рельєфних поверхонь. Розроблені програмні засоби інтегровано у професійний графічний конвеєр.

Комп'ютерне моделювання підтвердило коректність наукових положень та адекватність запропонованих моделей.

Ключові слова: нормалізація вектора, інтерполяція векторів, текстура, перспективно-коректне накладання текстур, карта нормалей, дистрибутивна функція відбивальної здатності, зображення рельєфних поверхонь.

АННОТАЦИЯ

Романюк О. В. Методы и средства формирования изображений рельефных поверхностей в системах компьютерной графики. – 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, 2012.

Диссертационная работа посвящена актуальным вопросам повышения производительности формирования изображений рельефных поверхностей в системах компьютерной графики за счет уменьшения сложности вычислительного процесса и упрощения программно-аппаратной реализации.

В работе проведен анализ современных методов и средств формирования изображений рельефных поверхностей в системах компьютерной графики. Разработана классификация методов формирования изображений рельефных поверхностей.

Впервые предложен аппаратно-ориентированный метод имитации неровностей на изображении поверхности графических объектов за счет возмущения дистрибутивных функций отражательной способности для расчета диффузной и спекулярной составляющих цвета, который позволяет увеличить производительность за счет исключения наиболее трудоемких в вычислительном процессе процедур возмущения векторов нормалей и последующей их нормализации.

Предложена новая модель отражательной способности поверхности на основе дистрибутивной функции, которая имеет значительно меньшую степень и позволяет реалистично отображать как эпицентр блика, так и зону его затухания. Модель имеет простую аппаратную реализацию.

Разработан метод повышения производительности нормал-мэппинга, в котором использованы новые формулы ускоренной трансформации вектора к источнику света и вектора

полпути в касательное пространство, что позволяет исключить с вычислительного процесса расчет векторов касательной и бинормали. Векторы, трансформированные в касательное пространство, имеют единичную длину, поэтому исключается процедура их нормализации, что в конечном итоге, приводит к повышению производительности. Метод может быть использован для построения как программных, так и аппаратных компонентов графических систем.

Усовершенствован метод повышения производительности перспективно-корректного текстурирования Баренберга, который не содержит в цикле текстурирования операций деления. Метод учитывает как целочисленное, так и дробное задание текстурных координат, что позволяет расширить сферу его применения и удовлетворить требования стандартов DirectX и OpenGL.

Предложен метод повышения производительности перспективно-корректного текстурирования, в котором использовано параметрическое уравнение кривой Безье второй степени. Получены новые рекуррентные соотношения для определения текстурных координат текущей точки строки растеризации. Предложенные рекуррентные формулы содержат в цикле текстурирования только операции сложения.

Получены новые формулы для расчета коэффициентов квадратичной аппроксимации для перспективно-корректного наложения текстур, которые не требуют нормализации значений экранных координат точек изображения, что позволяет ускорить процесс текстурирования.

Разработан метод вычисления нормализованного вектора в любой точке поверхности, ограниченной треугольником, с использованием барицентрических координат, что дает возможность селективного определения параметров для рендеринга точки поверхности и при необходимости выполнить дополнительную триангуляцию, в частности, для распараллеливания вычислительного процесса.

Предложен метод ускоренного вычисления нормализованных векторов, особенность которого состоит в том, что векторы к непарным точкам строки растеризации находятся с использованием линейной интерполяции, а векторы, находящиеся между ними, – с использованием принципа дихотомии. Это позволило уменьшить вычислительные затраты за счет использования новых аппроксимирующих формул.

Предложены структурные схемы устройств для аппаратной реализации формирования изображений рельефных поверхностей в системах компьютерной графики.

Разработаны специализированные программные средства для моделирования и тестирования предложенных методов формирования изображений рельефных поверхностей, которые позволяют получить сравнительные оценки за точностью и производительностью.

Созданы действующие средства для формирования изображений рельефных поверхностей, которые интегрированы в профессиональный графический конвейер.

Полученные характеристики и параметры разработанных аппаратных и программных средств подтверждают корректность научных положений и адекватность предложенных моделей.

Ключевые слова: нормализация вектора, интерполяция векторов, текстура, перспективно-корректное наложение текстур, карта нормалей, дистрибутивная функция отражательной способности, изображения рельефных поверхностей.

ABSTRACT

Romaniuk O. V. Methods and facilities for relief surface image synthesis in the computer graphics systems. – Manuscript.

Thesis for a candidate degree of technical science on the speciality 05.13.05 – computer systems and components. – Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, 2012.

The Thesis is devoted to the actual problems of increasing the efficiency of relief surface image synthesis in computer graphics systems in the way of reducing the complexity of computing process and

simplification of software and hardware realization.

There had been developed a new model of bidirectional reflection distribution function, new methods of accelerated normal vector calculation, perspective-correct texturing, and simulation of relief on images of graphic object surfaces.

On the base of received theoretical background there had been developed the efficient soft and hard ware for systems of relief surfaces image synthesis.

Developed software had been implemented into the professional graphic pipeline.

Computer modelling had proved the correctness of the main theoretical principles and adequacy of the suggested models.

Keywords: vector normalization, vectors interpolation, texture, perspective-correct texturing, normal map, bidirectional reflectance distributive function, relief surface image.

Підписано до друку 08.02.2012 р. Формат 29.7×42 ¼
Наклад 100 прим. Зам. № 2012-017
Віддруковано в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі
Вінницького національного технічного університету
м. Вінниця, вул. Хмельницьке шосе, 95. Тел. 59-81-59