

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу **Дудника Олександра Олександровича** «Методи та засоби підвищення реалістичності та продуктивності текстуровання у системах комп'ютерної графіки», яку подано на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти

АКТУАЛЬНІСТЬ ТЕМИ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Тривимірна графіка започаткувала новий напрям у технології створення систем людино-машинної взаємодії. Ефективність взаємодії людини та ЕОМ у такій системі визначається часом і реалістичністю формування тривимірної візуальної інформації про реальні об'єкти та процеси. Завдяки високій реалістичності тривимірна графіка набула широкого поширення практично в усіх сферах діяльності людини.

При синтезі графічних сцен необхідно вирішувати двоєдину задачу – забезпечення високої реалістичності графічних об'єктів і досягнення прийнятної для конкретної задачі часу формування графічних сцен.

Через багатоетапність і складність методів формування тривимірних зображень кінцева візуалізація (рендеринг) є надзвичайно трудомістким процесом, що передбачає необхідність розробки високопродуктивних нових методів і засобів. При цьому вимоги до реалістичності зображень постійно зростають, що, зрештою, передбачає використання більш складних моделей об'єктів реального світу та методів рендерингу, збільшення рівня деталізації поверхонь для коректної апроксимації об'єктів реального світу. Сьогодні темпи зростання геометричної складності тривимірних зображень перевищують темпи зростання продуктивності графічних засобів.

Як показує практика, робота з реалістичними зображеннями у реальному часі можлива тільки за наявності графічних засобів високої про-

дуктивності.

Найбільший вплив на реалістичність вихідного зображення має точність визначення кольорів пікселів на етапі накладання текстур. Цей етап вважається одним із найбільш трудомістким.

Процедурне текстуровання, яке використовує функціональні залежності для формування зображення мікрорельєфу, є трудомістким і вузькоспеціалізованим, і, як наслідок, має обмежені сфери застосування.

Класичні методи текстуровання (з використанням білінійної, трилінійної фільтрації) не забезпечують належної реалістичності формування графічних сцен, оскільки не враховують позицію користувача та перспективу сцени.

Існуючі методи, які забезпечують відносно реалістичне накладання текстур, вимагають значних обчислювальних ресурсів, а тому непридатні для динамічної графіки. Для ілюзії присутності користувача в змодельованому комп'ютером середовищі визначальну роль грає реалістичність руху об'єктів, а також реагування на різні типи взаємодій. Задачі динамічної 3D-візуалізації є надзвичайно складними в обчислювальному плані, оскільки зображення повинне будуватися в реальному часі, з комфортною для користувача частотою зміни кадрів. При цьому зображення на екрані повинно мінятися під управлінням користувача, а сам користувач, у свою чергу, повинен бачити актуальний на даний момент стан віртуального світу, щоб встигнути вчасно на нього зреагувати.

Для багатьох існуючих методів текстуровання притаманні деякі артефакти візуалізації: артефакти аліайзингу, розмиття ділянок зображення, викривлення перспективи тощо.

Тому важливими є питання підвищення продуктивності і реалістичності методів і засобів текстуровання.

У зв'язку з цим тема дисертаційної роботи Дудника О. О. є актуаль-

ною, оскільки направлена на підвищення продуктивності формування зображень та їх реалістичності у системах комп'ютерної графіки за рахунок розробки нових методів текстурування

СТРУКТУРА ДИСЕРТАЦІЇ ТА ЗМІСТ ЇЇ РОЗДІЛІВ

Дисертаційна робота складається із вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Загальний обсяг роботи становить 202 сторінки, у тому числі 127 сторінок основного тексту (на 1 сторінці розміщено рисунок, що повністю займає площу сторінки). Бібліографія включає 138 джерел. У додатках наведено результати експериментальних досліджень, вихідні коди розроблених програмних засобів і акти впровадження результатів роботи.

У вступі обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету, основні задачі досліджень, визначено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, наведено відомості про їхню апробацію та впровадження.

У першому розділі розглянуто особливості формування тривимірних графічних зображень. Проаналізовано основні етапи графічного конвеєра з виділенням етапу текстурування. Показано його визначальну роль у формуванні тривимірних зображень.

Проведено аналіз базових процедур накладання текстур, зокрема, визначення текстурних координат, фільтрація текстур, імітація нерівностей поверхонь.

Розглянуто особливості функціонально-архітектурної побудови систем формування тривимірних зображень. Проаналізовано найпоширеніші архітектури графічних систем, основні підходи їх реалізації. Визначено основні вимоги до побудови засобів кінцевої візуалізації.

Показано, що традиційні методи та засоби текстурування не задо-

вольняють вимогам по продуктивності та реалістичності для багатьох галузей застосування тривимірної комп'ютерної графіки, особливо при формуванні динамічних реалістичних сцен у реальному часі.

У другому розділі запропоновано методи підвищення реалістичності текстурування в системах комп'ютерної графіки.

Запропоновано метод анізотропної фільтрації з використання вагових функцій на основі моделі пікселя, яка враховує форму проекції пікселя на площину текстури. Метод забезпечує підвищення точності визначення вагових коефіцієнтів при усередненні кольорів текселів і, що сприяє підвищенню реалістичності формування графічних зображень.

Запропоновано нові формули визначення об'єму відсікання тіла обертання кривої Гаусса. Нові формули дають можливість виконання суб-текселної анізотропної фільтрації з урахуванням форми пікселя, що забезпечує підвищення точності визначення кольорів пікселів.

Запропоновано модифікацію методу Фонга, адаптовану для розрахунку освітлення під час анізотропної фільтрації текстур, що дало можливість точнішого обчислення інтенсивності кольорів з урахуванням перспективи простору.

У третьому розділі запропоновано методи підвищення продуктивності текстурування.

Для підвищення продуктивності запропоновано використання спеціальних текстурних карт вагових коефіцієнтів при виконанні анізотропної фільтрації. Підвищення продуктивності досягається за рахунок вибірки з текстурної пам'яті завчасно розрахованих вагових коефіцієнтів замість їх розрахунку в процесі рендерингу зображення.

Запропоновано нові ітераційні формули для визначення текстурних координат і параметрів рівняння еліпса для анізотропної фільтрації текстур. Використання нових формул дає можливість підвищити продук-

тивність перспективно-коректного текстурювання з застосуванням анізотропної фільтрації текстур. Підвищення продуктивності досягається за рахунок повторного використання проміжних результатів обчислень.

Запропоновано метод текстурювання із виконанням процедур rasterизації в об'єктному просторі з подальшим проєкціюванням фрагментів на площину екрана. Метод не потребує застосування складних процедур фільтрації текстур і, при цьому, його продуктивність не залежить від роздільності екрану та кута нахилу полігона, а лише від сумарної площі полігонів.

У четвертому розділі розроблено методи підвищення реалістичності та продуктивності рельєфного текстурювання.

Запропоновано метод виконання рельєфного текстурювання з використанням технології *parallax mapping* та анізотропної фільтрації, що дає можливість усунути артефакти, притаманні для зображень, сформованих шляхом поєднання цих технологій (розмиття окремих ділянок, зниження деталізації), за рахунок вилучення з процесу анізотропної фільтрації операцій над текселями, які невидимі для користувача через рельєф поверхні.

Запропоновано модифікацію методу Донеллі, суть якої полягає в уточненні карти відстаней до поверхні. Використання уточненої карти відстаней до поверхні забезпечує зменшення ітерацій трасування видового вектору для рельєфних поверхонь, що характеризуються частими різкими перепадами висот.

Запропоновано метод *parallax mapping* із використанням модифікованої MIP-піраміди для зберігання карти висот при трасуванні видового вектору. Трасування вектору на вищих MIP-рівнях дозволяє підвищити продуктивність за рахунок вилучення з обчислювального процесу частин поверхні об'єкта.

У п'ятому розділі дисертаційної роботи розглянуто практичну реалізацію розроблених методів текстурування для систем комп'ютерної графіки.

Для реалізації методу текстурування з виконанням процедурних операцій в об'єктному просторі розроблено альтернативний конвеєр рендерингу на основі обчислювальних рейдерів OpenGL.

Розроблено шейдерні програми, що реалізують запропоновані методи анізотропної фільтрації текстур та рельєфного текстурування для рендерингу зображень з використанням GPU.

Розроблено структури систем кінцевої візуалізації на основі запропонованих методів.

Проведено порівняльний аналіз реалістичності та продуктивності запропонованих методів накладання текстур.

У висновках сформульовано основні результати дисертаційної роботи.

Додатки містять результати експериментальних досліджень і акти впровадження результатів роботи.

СТУПІНЬ ОБҐРУНТОВАНOSTІ НАУКОВИХ ПОЛОЖЕНЬ І ВИСНОВКІВ

Усі наукові положення, висновки та практичні рекомендації, представлені в дисертації, аргументовані, строго обґрунтовані і достовірні. Висновки дисертації закономірно витікають з основних наукових положень, що захищаються автором, сформульовані коротко, мають безперечне наукове і практичне значення.

Достовірність наукових положень, висновків, сформульованих у дисертаційній роботі, підтверджуються збігом результатів, отриманих запропонованими методами, з результатами експериментальних досліджень та підтверджуються успішним впровадженням результатів у про-

НАУКОВА НОВИЗНА ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Серед отриманих автором результатів у розвитку теорії кінцевої візуалізації тривимірних об'єктів найбільший науковий інтерес, на наш погляд, привертають наступні .

1. Вперше запропоновано метод текстурювання з виконанням операцій растеризації в об'єктному просторі та фільтрації в площині екрана, який не потребує виконання анізотропної фільтрації текстур, що дає можливість підвищити продуктивність формування графічних сцен.
2. Уперше запропоновано математичну модель проєкції екранного пікселя в текстурний простір, яка враховує зміну форми пікселя у перспективно-коректних сценах для визначення вагових коефіцієнтів при анізотропній фільтрації текстур, що дозволило підвищити точність визначення кольорів пікселів.
3. Уперше запропоновано комбінований метод виконання рельєфного текстурювання з використанням технології parallax mapping та анізотропної фільтрації, що дозволяє зменшити кількість візуальних артефактів за рахунок урахування рельєфу поверхні та видимості текселів при анізотропній фільтрації.
4. Запропоновано модифікацію методу Хекберта, у якому використано ітераційні формули для визначення координат текселів, які потребують виконання меншої кількості арифметичних операцій для визначення текстурних координат пікселя, що дало можливість підвищити продуктивність формування графічних сцен.
5. Подальшого розвитку отримав метод анізотропної фільтрації текстур, в якому використано нові формули для прискореного обчислення параметрів рівняння еліпса при перспективно-коректному текстурюван-

ні, що дозволяє підвищити продуктивність анізотропної фільтрації текстур за рахунок зменшення кількості арифметичних операцій.

6. Подальшого розвитку отримав метод Донеллі, в якому, при формуванні карти відстаней до поверхні враховуються умови видимості текстур, що дозволило зменшити кількість ітерацій трасування видового вектору та підвищити продуктивність рендерингу.

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

- розроблено програмні засоби для тестування методів накладання текстур;
- розроблено діючі програмні засоби кінцевої візуалізації, які дозволяють підвищити продуктивність формування тривимірних зображень і їх реалістичність;
- сформульовано рекомендації щодо проектування засобів текстурування.
- впроваджено програмні засоби на підприємствах, що підтверджується відповідними актами.

ПУБЛІКАЦІ ПО РОБОТІ ТА АПРОБАЦІЯ

Результати наукових досліджень досить повно відображено в 33 наукових працях, з яких 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 збірниках матеріалів конференцій, 8 авторських свідоцтв про реєстрацію авторського права на комп'ютерну програму.

ВІДПОВІДНІСТЬ АВТОРЕФЕРАТУ ЗМІСТУ ДИСЕРТАЦІЇ

Структурно автореферат складається із загальної характеристики

роботи, основного змісту, висновків, списку опублікованих автором праць за темою дисертації та анотацій українською, російською та англійською мовами. Суть автореферату відповідає змісту дисертації і дає повне уявлення про наукову цінність і практичну значущість дисертації. Автореферату притаманна методична і концептуальна цілісність, гармонійність викладення матеріалу.

ЗАУВАЖЕННЯ ДО РОБОТИ

Зауваження до роботи загального характеру

- Метою роботи є підвищення продуктивності текстурування ... , а також реалістичності Якщо для методів підвищення продуктивності автор навів результати багатьох експериментальних досліджень, то питанням оцінки реалістичності запропонованих методів приділено значно меншу увагу. У розділі 1.4 автор наводить огляд критеріїв оцінки продуктивності та реалістичності систем візуалізації. На жаль, не визначено для яких методів доцільно використати той чи інший критерій оцінки реалістичності. Дисертант не конкретизував, для яких методів взагалі не потрібно проводити оцінювання реалістичності, оскільки точність обчислень не змінювалась.
- Для запропонованих методів анізотропної фільтрації текстур із використанням вагових коефіцієнтів автор навів тестові зображення для порівняння, що є недостатнім. Доцільно було б навести результати методу експертних оцінок, який автор навів у розділі 1.4.
- У роботі наведені результати багатьох обчислювальних експериментів, що підтверджують ефективність запропонованих алгоритмів. Однак, у роботі немає даних про характеристиках типових сцен, на базі яких виконуватися ці експерименти і, головне - кількість оброблюва-

них полігонів і текстур.

- У роботі широко використовується кругова модель пікселя і гаусівський розподіл інтенсивності випромінювання по площі пікселя. При цьому підкреслюється, що така модель дозволяє більш точно розраховувати колір "текстурованого" пікселя. Однак, існують випадки, коли реальний піксел відрізняється від цієї моделі. У них інтенсивність випромінювання колірних компонент розподіляється по іншому.

Конкретні зауваження до роботи

- У підрозділі (стор. 65) використовується критерій "1% від максимального рівня інтенсивності", та відзначається, що: «Таку похибку людське око при нормальних умовах розрізнити не в змозі», але ця теза ніяк не обґрунтовано в роботі.
- На сторінці 83 дисертації наведено висновок за підрозділом 3.2 «Запропонована модифікація методу Хекберта, в якій використано ітераційні формули для визначення координат текселів, дозволяє зменшити кількість операцій додавання та множення і, як наслідок, підвищити продуктивність в 0,26 рази. Це означає що продуктивність зменшилась у 4 рази?
- На сторінці 87 (підрозділ 3.4) дається теза: «Як правило, еліпси частково накладаються один на одного, що призводить до неодноразових обчислень над одними і тими ж текселями». На жаль, це не обґрунтовано.
- На сторінці 89 формулюється послідовність перетворень полігону для текстурування в просторі об'єкта. Однак залишається абсолютно незрозумілим в якій системі координат це виконується. І, найголовніше, як при цьому враховується відстань від спостерігача до оброблювано-

го полігону об'єкту.

- При розгляді комбінованого методу виконання анізотропної фільтрації текстур (підрозділ 4.1) передбачається як умова «низька вірогідність умови ...». Однак, як перевіряти цю умову, не пояснюється.
- У додатку В наведені графіки залежності продуктивності анізотропної фільтрації від роздільної здатності екрану. Самі графіки показують залежність від площі екрану. Ніде не пояснюється, як площа (відносна?) екрану залежить від роздільної здатності.

Наведені зауваження суттєво не знижують високу оцінку рівня дисертаційної роботи, основні положення якої є науково вагомими і обґрунтованими.

ВИСНОВКИ

Тема дисертаційної роботи, проведені дослідження та одержані результати відповідають паспорту спеціальності 05.13.05 – Комп'ютерні системи та компоненти.

Автореферат об'єктивно відображає зміст дисертації .

Дисертація Дудника О. О. є завершеною науковою роботою, в якій отримані нові науково обґрунтовані результати, що в сукупності дозволяють розв'язати важливу науково-технічну задачу підвищення продуктивності та реалістичності текстуровання в системах комп'ютерної графіки.

У цілому дисертація відповідає вимогам п. 9, 11, 12 „Порядку присудження наукових ступенів”, що висуваються до робіт на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук. Автор дисертації **Дудник Олександр Олександрович** заслуговує на присудження наукового ступеня кандида-

та технічних наук за спеціальністю 05.13.05 – комп'ютерні системи та КОМПОНЕНТИ.

Офіційний опонент,
лауреат Державної премії України в галузі
науки і техніки, Заслужений діяч науки і техніки України
проректор з наукової роботи
Донецького національного технічного університету
д.т.н., професор



С.О. Башков