

МАТЕМАТИЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВИСОКОПРОДУКТИВНОГО РЕНДЕРИНГУ РЕАЛІСТИЧНИХ СЦЕН

Вінницький національний технічний університет;

Анотація

Розглянуто математичне забезпечення сучасних високопродуктивних систем рендерингу реалістичних тривимірних сцен. Проаналізовано основні математичні моделі формування зображень, зокрема рівняння рендерингу, моделі локального та глобального освітлення, методи трасування променів і стохастичні алгоритми. Особливу увагу приділено сучасним підходам до підвищення продуктивності рендерингу шляхом використання просторових структур даних, паралельних обчислень, нейронного рендерингу та алгоритмів штучного інтелекту. Показано, що поєднання математичних методів моделювання освітлення з апаратним прискоренням графічних обчислень забезпечує формування фотореалістичних зображень у режимі реального часу. Визначено перспективні напрями розвитку математичного забезпечення систем високопродуктивного рендерингу.

Ключові слова: комп'ютерна графіка, рендеринг, математична модель, рендеринг, трасування променів, глобальне освітлення, нейронний рендеринг, високопродуктивні обчислення.

Abstract

The mathematical support of modern high-performance rendering systems for realistic three-dimensional scenes is considered. The main mathematical models of image formation are analyzed, in particular, rendering equations, local and global lighting models, ray tracing methods and stochastic algorithms. Special attention is paid to modern approaches to increasing rendering performance by using spatial data structures, parallel computing, neural rendering and artificial intelligence algorithms. It is shown that the combination of mathematical methods of lighting modeling with hardware acceleration of graphic calculations provides the formation of photorealistic images in real time. Promising directions for the development of mathematical support for high-performance rendering systems are identified.

Keywords: computer graphics, rendering, mathematical model, rendering, ray tracing, global illumination, neural rendering, high-performance computing.

Вступ

Високопродуктивний рендеринг [1-3] є складовою систем віртуальної та доповненої реальності, комп'ютерних ігор, інженерного проектування та наукової візуалізації. Досягнення фотореалістичної якості зображень потребує застосування складних математичних моделей освітлення, геометричних перетворень і методів чисельного інтегрування. Тому дослідження математичного забезпечення високопродуктивного рендерингу реалістичних сцен є актуальним науковим завданням, спрямованим на підвищення ефективності сучасних графічних систем.

Результати дослідження

Теоретичною основою сучасного рендерингу є рівняння рендерингу, запропоноване Джеймсом Каджією. Воно описує процес перенесення світлової енергії у сцені та визначає яскравість точки поверхні як суму власного випромінювання та відбитого світла. Розв'язання цього інтегрального рівняння дозволяє моделювати складні світлові ефекти, включаючи відбиття, заломлення, розсіювання та глобальне освітлення. Незважаючи на те, що точний розв'язок рівняння рендерингу є надзвичайно складним, саме воно лежить в основі більшості сучасних алгоритмів формування реалістичних зображень.

Одним із напрямів розвитку математичного забезпечення рендерингу є використання фізично

коректних моделей освітлення (Physically Based Rendering, PBR). Такі моделі базуються на законах збереження енергії та властивостях двонапрямних функцій розподілу відбиття (BRDF). Використання PBR дозволяє отримувати реалістичне відтворення матеріалів незалежно від умов освітлення. Сучасні системи рендерингу широко застосовують мікрофасетні моделі поверхонь, що забезпечують адекватне відображення металевих, діелектричних та комбінованих матеріалів.

Для наближеного розв'язання рівняння рендерингу широко використовуються стохастичні методи Монте-Карло. Їх математична сутність полягає у статистичному оцінюванні інтегралів за допомогою випадкової вибірки напрямків поширення світла. Основною перевагою методів Монте-Карло є можливість моделювання складних світлових явищ, однак зі збільшенням реалістичності суттєво зростають обчислювальні витрати. Саме тому сучасні дослідження спрямовані на розроблення адаптивних схем вибірки, методів зменшення шумів та прискорення збіжності обчислень.

Найбільш реалістичні результати забезпечує трасування променів. Даний метод базується на геометричних моделях поширення світла та передбачає побудову траєкторій променів від камери до джерел освітлення. З математичної точки зору базовими задачами є знаходження перетинів променів з геометричними примітивами та обчислення характеристик взаємодії світла з поверхнями. Для прискорення цих обчислень використовуються спеціалізовані просторові структури даних, зокрема дерева обмежувальних об'ємів (BVH), kd-дерева та октодерева. Застосування таких структур дозволяє істотно скоротити кількість перевірок перетину та підвищити швидкодію алгоритмів.

Важливим напрямом удосконалення математичного забезпечення є використання моделей глобального освітлення. На відміну від локальних моделей, вони враховують багаторазові відбиття світла між об'єктами сцени. У сучасних дослідженнях активно застосовуються методи кешування радіансу, фотонного трасування та гібридні алгоритми глобального освітлення. Такі підходи дозволяють досягати високої реалістичності зображень навіть для складних сцен із великою кількістю джерел світла та матеріалів.

Стрімкий розвиток графічних процесорів зумовив активне використання паралельних обчислень. Сучасні графічні процесори містять тисячі обчислювальних ядер, що дозволяє виконувати одночасне опрацювання великої кількості пікселів та променів. Математичне забезпечення високопродуктивного рендерингу повинно враховувати особливості архітектури GPU, забезпечувати ефективний розподіл задач та мінімізувати витрати на доступ до пам'яті. Особливого значення набувають алгоритми паралельного трасування променів, адаптивного семплювання та багаторівневого кешування даних.

Перспективним напрямом розвитку є нейронний рендеринг, який поєднує методи комп'ютерної графіки та штучного інтелекту. У таких системах нейронні мережі використовуються для апроксимації складних функцій освітлення, реконструкції сцен та усунення шумів. Застосування нейронних моделей дозволяє значно скоротити кількість необхідних обчислень без помітної втрати якості зображення. Сучасні дослідження демонструють ефективність нейронного рендерингу для задач трасування променів, відтворення матеріалів та побудови радіаційних полів.

Важливу роль у високопродуктивному рендерингу відіграють також методи адаптивної деталізації та фовеального рендерингу. Вони базуються на математичних моделях людського зору та дозволяють виконувати більш точні обчислення лише для областей сцени, які перебувають у центрі уваги користувача. Використання таких підходів забезпечує суттєве підвищення продуктивності без погіршення суб'єктивної якості зображення.

Висновки

Таким чином, математичне забезпечення сучасного високопродуктивного рендерингу являє собою комплекс моделей, методів та алгоритмів, спрямованих на ефективне розв'язання задач перенесення світла у тривимірних сценах. Поєднання фізично коректних моделей освітлення, методів Монте-Карло, трасування променів, паралельних обчислень та нейронного рендерингу дозволяє формувати фотореалістичні зображення в режимі реального часу. Подальший розвиток даного напрямку пов'язаний із впровадженням штучного інтелекту, нових математичних моделей глобального освітлення та вдосконаленням алгоритмів апаратного прискорення графічних обчислень.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Романюк О. Н., Романюк О. В., Чехмestрук Р. Ю. Комп'ютерна графіка : електронний навч. посіб. Вінниця : ВНТУ, 2023. 147 с.

2. Romanyuk O., Zavalniuk Y., Pavlov S., Chekhmestruk R., Bondarenko Z., Koval T., Kalizhanova A., Iskakova A. New Surface Reflectance Model with the Combination of Two Cubic Functions Usage. *Informatyka, Automatyka, Pomiary w Gospodarce i Ochronie Środowiska*. 2023. Vol. 13, No. 3. P. 101–106. DOI: 10.35784/iapgos.5327
3. Romanyuk O., Zavalniuk Y., Romanyuk O., Snigur A., Titova N., Maidaniuk V. The Development of Physically Correct Reflectance Model Based on Logarithm Function. In: 2023 13th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT). Wrocław, Poland, 2023. DOI: 10.1109/ACIT58437.2023.10275589.

Романюк Олександр Никифорович - д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри програмного забезпечення, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: rom8591@gmail.com.

Майданюк Володимир Павлович - канд. техн. наук, доцент кафедри програмного забезпечення, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: maidaniuk2000@gmail.com.

Романюк Оксана Володимирівна – доцент кафедри програмного забезпечення, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: romaniukoksanav@gmail.com.

Romanyuk Oleksandr Nikiforovych- Dr. of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Software, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: rom8591@gmail.com.

Maidaniuk Volodymyr Pavlovych - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Software, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: maidaniuk2000@gmail.com.

Romaniuk Oksana Volodymyrivna – Associate Professor of the Software Department, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: romaniukoksanav@gmail.com.