

ФОРМУВАННЯ ЗОБРАЖЕНЬ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДІВ RAY TRACING НА GPU

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У роботі розглянуто особливості формування зображень із використанням методів трасування променів (Ray Tracing) на графічних процесорах. Проаналізовано принципи побудови алгоритмів трасування променів, архітектурні особливості сучасних GPU, апаратні засоби прискорення обчислень та структури даних для швидкого пошуку перетинів променів з геометричними об'єктами сцени. Значну увагу приділено технологіям NVIDIA RTX, DirectX Raytracing (DXR), Vulkan Ray Tracing та сучасним підходам до реалізації глобального освітлення, віддзеркалень і тіней у режимі реального часу. Розглянуто переваги використання спеціалізованих RT-ядер, методів побудови ієрархій обмежувальних об'ємів (BVH), а також перспективи розвитку гібридних графічних конвейерів, що поєднують растеризацію та трасування променів. Проведений аналіз свідчить про те, що сучасні графічні процесори забезпечують можливість інтерактивного синтезу фотореалістичних зображень із високим ступенем фізичної достовірності.

Ключові слова: Ray Tracing, GPU, трасування променів, графічний процесор, RT-ядра, DXR, Vulkan Ray Tracing, BVH, глобальне освітлення, фотореалістичний рендеринг.

Abstract

The publication examines the features of image generation using ray tracing methods on graphics processing units (GPUs). It analyzes the principles of constructing ray tracing algorithms, architectural features of modern GPUs, hardware computation accelerators, and data structures for rapid search of ray-geometry intersections in a scene. Significant attention is paid to NVIDIA RTX technologies, DirectX Raytracing (DXR), Vulkan Ray Tracing, and modern approaches to implementing real-time global illumination, reflections, and shadows. The advantages of using specialized RT cores, methods for constructing Bounding Volume Hierarchies (BVH), and the prospects for developing hybrid graphics pipelines that combine rasterization and ray tracing are reviewed. The conducted analysis demonstrates that modern GPUs enable the interactive synthesis of photorealistic images with a high degree of physical accuracy.

Keywords: Ray Tracing, GPU, graphics processing unit, RT cores, DXR, Vulkan Ray Tracing, BVH, bounding volume hierarchy, global illumination, photorealistic rendering.

Метод Ray Tracing базується на геометричній моделі поширення світла. Для кожного пікселя екрану формується первинний промінь, який проходить через центр проєкції та відповідний піксель площини зображення. Після визначення найближчої точки перетину променя з поверхнею сцени виконуються обчислення локального освітлення, а також генеруються вторинні промені відбиття, заломлення або затінення. Результуючий колір пікселя визначається як сукупність внесків усіх променів, що беруть участь у процесі рендерингу [1].

Основною проблемою використання трасування променів тривалий час залишалася висока обчислювальна складність. Для кожного променя необхідно виконувати перевірки перетину з великою кількістю геометричних примітивів. Якщо сцена містить мільйони трикутників, то кількість операцій швидко зростає до неприйняттого рівня. Саме тому протягом багатьох років методи Ray Tracing використовувалися переважно у системах офлайн-рендерингу для створення кінофільмів, рекламних матеріалів та архітектурної візуалізації.

Ситуація кардинально змінилася після появи високопродуктивних графічних процесорів із підтримкою апаратного трасування променів. Сучасні GPU містять тисячі обчислювальних ядер, здатних паралельно обробляти великі масиви даних. Завдяки архітектурі масового паралелізму графічні процесори виявилися ефективною платформою для реалізації алгоритмів трасування променів [2].

Особливістю GPU є використання моделі SIMD або SIMT, за якої одна інструкція одночасно виконується над великою кількістю потоків. При трасуванні променів кожний промінь може оброблятися окремим потоком, що забезпечує високу ступінь паралелізму. Разом із тим виникають специфічні проблеми, пов'язані з дивергенцією потоків, коли різні промені проходять різні шляхи обчислень. Для підвищення ефективності використовуються спеціальні методи групування променів та оптимізації порядку їх обробки [3].

Основним елементом сучасних систем Ray Tracing є використання структур просторового прискорення. Найбільш поширеною структурою є ієрархія обмежувальних об'ємів BVH (Bounding Volume Hierarchy). У такій структурі геометричні об'єкти групуються в дерево, вузли якого містять прості геометричні оболонки. Під час трасування виконується перевірка перетину променя спочатку з обмежувальними об'ємами, а лише потім з окремими трикутниками. Це дозволяє суттєво зменшити кількість необхідних тестів перетину та підвищити продуктивність системи.

Важливим етапом розвитку технологій трасування променів стала поява архітектури NVIDIA RTX. У графічних процесорах серій RTX реалізовано спеціалізовані RT-ядра, призначені для прискорення операцій обходу BVH та пошуку перетинів променів із трикутниками. Завдяки апаратній реалізації цих операцій вдалося досягти багаторазового підвищення швидкодії порівняно з програмними реалізаціями. RT-ядра функціонують паралельно з традиційними обчислювальними блоками GPU, забезпечуючи ефективне використання ресурсів графічної системи.

Подальший розвиток технологій привів до появи стандартів DirectX Raytracing (DXR) та Vulkan Ray Tracing, які забезпечують універсальний програмний інтерфейс для роботи з апаратними засобами трасування променів. DXR інтегровано до складу DirectX 12 і надає програмістам можливість створювати графічні застосунки з підтримкою трасування променів без необхідності враховувати особливості конкретної архітектури GPU. Аналогічні можливості забезпечує Vulkan Ray Tracing, орієнтований на кросплатформні рішення [4].

Одним із головних напрямів застосування трасування променів є формування реалістичних віддзеркалень. Традиційні методи растеризації використовують технології Screen Space Reflections, які дозволяють відображати лише об'єкти, присутні на екрані. У випадку Ray Tracing промені можуть взаємодіяти з усією геометрією сцени незалежно від її положення відносно камери. Це забезпечує значно вищу фізичну достовірність формування віддзеркалень.

Іншим важливим застосуванням є генерація тіней. У растеризаційних системах широко використовуються карти тіней, які можуть містити артефакти дискретизації та проблеми самозатінення. Трасування променів дозволяє моделювати фізичний процес поширення світла, формуючи м'які тіні з плавними переходами між освітленими та затіненими областями. При цьому якість тіней визначається кількістю трасованих променів та параметрами джерел освітлення.

Особливе значення має використання трасування променів для моделювання глобального освітлення. У реальному світі світло багаторазово відбивається від поверхонь, утворюючи складні світлові взаємодії. Методи глобального освітлення враховують ці процеси, забезпечуючи природний розподіл яскравості та кольорів у сцені. Реалізація таких алгоритмів на GPU дозволила вперше використовувати глобальне освітлення у режимі реального часу [5].

Одним із найбільш точних підходів до моделювання світлових процесів є Path Tracing. У цьому випадку для кожного пікселя генерується велика кількість випадкових променів, що моделюють різні траєкторії поширення світла. Метод забезпечує високу якість зображень, але потребує значних обчислювальних ресурсів. Сучасні GPU з RT-ядрами та тензорними процесорами дозволяють реалізовувати спрощені варіанти Path Tracing навіть у реальному часі.

Важливою складовою сучасних систем рендерингу є використання методів шумозаглушення. Через обмежену кількість променів на піксель результати трасування часто містять статистичний шум. Для його усунення застосовуються алгоритми просторової та часової фільтрації, а також нейромережеві методи денойзингу. Використання тензорних ядер дозволяє виконувати такі операції без значного зниження продуктивності.

Сучасні графічні конвеєри дедалі частіше використовують гібридний підхід, який поєднує переваги растеризації та трасування променів. Основна геометрія сцени формується за допомогою растеризації, тоді як складні світлові ефекти обчислюються із застосуванням Ray Tracing. Такий підхід дозволяє досягти балансу між якістю зображення та швидкістю системи.

Перспективи розвитку GPU-орієнтованих методів трасування променів пов'язані з подальшим удосконаленням архітектури графічних процесорів, впровадженням нових структур прискорення та

використанням технологій штучного інтелекту. Сучасні дослідження спрямовані на зменшення кількості променів, необхідних для отримання високоякісного результату, а також на підвищення ефективності роботи з великими динамічними сценами. Очікується, що в найближчі роки повноцінне трасування променів стане стандартним компонентом більшості графічних застосунків реального часу.

Отже, використання методів Ray Tracing на GPU є одним із найважливіших напрямів розвитку сучасної комп'ютерної графіки. Поєднання апаратного прискорення, ефективних структур даних та новітніх алгоритмів рендерингу дозволяє формувати високоякісні фотореалістичні зображення в інтерактивному режимі. Подальший розвиток цієї технології сприятиме створенню більш реалістичних віртуальних середовищ, комп'ютерних ігор, систем візуалізації та наукового моделювання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Pharr M., Jakob W., Humphreys G. Physically Based Rendering: From Theory to Implementation. 4th ed. Morgan Kaufmann, 2023. 1224 p.
2. Haines E., Akenine-Möller T. Ray Tracing Gems II: Next Generation Real-Time Rendering with DXR, Vulkan, and OptiX. Apress, 2021. 535 p.
3. Akenine-Möller T., Haines E., Hoffman N. Real-Time Rendering. 4th ed. CRC Press, 2018. 1198 p.
4. Vulkan Ray Tracing Specification [Електронний ресурс] – URL: <https://registry.khronos.org/vulkan/>
5. Wald I., Woop S., Benthin C., Johnson G. S., Shirley P. Embree: A Kernel Framework for Efficient CPU Ray Tracing. ACM Transactions on Graphics (TOG). 2014. Vol. 33, No. 4. P. 1–8.

Юрій О. Суліма – студент групи 5ПІ-236, факультет інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: yurij.sulima876@gmail.com

Ангеліна В. Костенко – студентка групи 1ПІ-256, факультет інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: angellkostenko@gmail.com

Науковий керівник: **Олександр Н. Романюк** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри програмного забезпечення, Вінницький національний технічний університет, Вінниця.