

В.В. МАРТИНЮК

Д.М. ЧУЛЮК

ФІЗИЧНІ ОСНОВИ ФОТОРЕАЛІСТИЧНОГО РЕНДЕРИНГУ: АНАЛІЗ ТА ПРОГРАМНА ІМПЛЕМЕНТАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЇ ТРАСУВАННЯ ПРОМЕНІВ

Вінницький національний технічний університет

Анотація:

У роботі розглядаються фізичні принципи геометричної оптики, що лежать в основі алгоритмів фотореалістичного рендерингу, зокрема технології трасування променів. Проаналізовано алгоритмічну реалізацію методу зворотного трасування, використання чисельного методу Монте-Карло для симуляції глобального освітлення, а також проблеми оптимізації обчислень за допомогою структур даних BVH та алгоритмів знешумлення.

Ключові слова: трасування променів, рендеринг, геометрична оптика, глобальне освітлення, метод Монте-Карло, структури даних BVH.

Abstract:

The paper examines the physical principles of geometric optics underlying photorealistic rendering algorithms, specifically ray tracing technology. The algorithmic implementation of backward ray tracing, the use of the Monte Carlo numerical method for simulating global illumination, and the challenges of computational optimization using BVH data structures and denoising algorithms are analyzed.

Keywords: ray tracing, rendering, geometric optics, global illumination, Monte Carlo method, BVH data structures.

Вступ

Еволюція комп'ютерної графіки протягом останніх десятиліть характеризувалася переходом від методів емпіричної апроксимації (растеризації) до фізично коректної симуляції світла. Ключовою технологією цього переходу стало трасування променів (Ray Tracing). Актуальність теми зумовлена впровадженням апаратного прискорення (RT-ядер) у споживчі графічні процесори, що уможливило використання алгоритмів глобального освітлення (Global Illumination) у реальному часі. Метою роботи є аналіз фізичних принципів геометричної оптики, що лежать в основі алгоритмів рендерингу.

Фізична модель: Геометрична оптика та зворотне трасування

В основі методу лежить симуляція поведінки світла як потоку частинок (фотонів), що поширюються прямолінійно у однорідному середовищі. Традиційна фізична модель передбачає поширення світла від джерела до спостерігача (Forward Ray Tracing). Однак, з обчислювальної точки зору, цей підхід є неефективним, оскільки більшість променів не потрапляє в площину проекції (камеру).

У сучасній комп'ютерній графіці застосовується метод зворотного трасування (Backward Ray Tracing). Алгоритм передбачає випускання первинних променів (primary rays) з центру проекції через кожен піксель екрану в сцену (рис. 1).

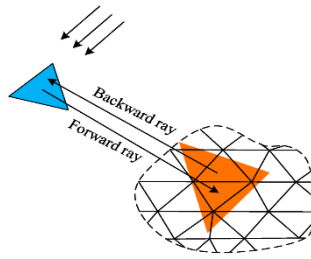


Рис. 1. Схема прямого та зворотного трасування променів.

З точки зору програмної архітектури, промінь світла описується параметричним рівнянням прямої:

$$P(t) = O + tD$$

де O (Origin) - координати точки початку променя (камери), D (Direction) - нормалізований вектор напрямку, а t - відстань, яку пройшов промінь. Завданням алгоритму є знаходження найменшого додатного значення t, при якому відбувається перетин з об'єктом.

При перетині променя з геометричним примітивом (полігоном) відбувається розрахунок взаємодії світла з поверхнею згідно із законами геометричної оптики:

Закон відбивання: для дзеркальних поверхонь кут падіння дорівнює куту відбивання відносно нормалі поверхні. Це дозволяє реалізувати фізично коректні відображення об'єктів, що знаходяться поза полем зору камери. Математично напрямок відбитого променя обчислюється через векторні операції за формулою:

$$R = I - 2(I \times N)N$$

де I - вектор падаючого променя, N - нормаль до поверхні (перпендикуляр), а R - результуючий вектор відбиття. У програмному коді ця операція виконується за допомогою скалярного добутку векторів.

Закон заломлення (Закон Снеліуса): при проходженні світла через межу двох прозорих середовищ (наприклад, повітря-скло) відбувається зміна напрямку вектора променя (рис. 2). Це явище є критичним для рендерингу рідин та скляних поверхонь.

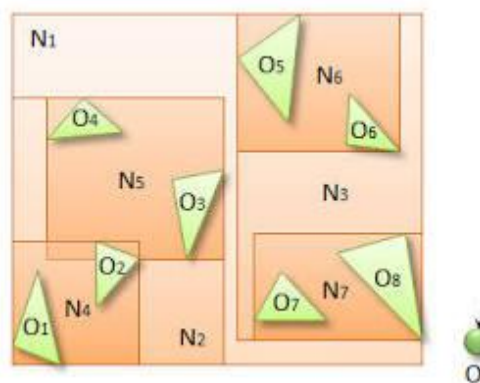


Рис. 2. Взаємодія світлового променя з межею середовищ (заломлення та відбивання).

Ефект Френеля: описує залежність інтенсивності відбитого світла від кута падіння. Це важливий аспект для реалістичного відтворення діелектриків (води, пластику, лакованих поверхонь), де відбивна здатність зростає при ковзних кутах огляду.

Алгоритмічна реалізація та стохастичні методи

Замість розв'язання складних інтегральних рівнянь аналітичним шляхом, у програмуванні використовується чисельний метод Монте-Карло. Суть методу полягає у стохастичному (випадковому) відборі проб. Оскільки світло у природі розсіюється хаотично (дифузне відбиття), алгоритм випускає безліч випадкових променів з точки падіння, щоб оцінити середню освітленість.

Цей підхід дозволяє програмно реалізувати складні оптичні ефекти. Наприклад, м'які тіні (Soft Shadows) виникають, коли джерело світла має фізичний розмір, а не є точковим. Алгоритм пускає промені до різних точок поверхні джерела світла, визначаючи ступінь затінення. Глобальне освітлення (Global Illumination) забезпечує врахування вторинного відбиття світла від поверхонь (наприклад, коли червона стіна "підфарбовує" білу підлогу) (рис. 3).



Рис. 3. Порівняння сцени без та з використанням технології глобального освітлення (Global Illumination).

Проблематика оптимізації та структури даних

Головним викликом імплементації Ray Tracing є висока обчислювальна складність для наївного підходу, де необхідно обчислити перетин з кожним полігоном у сцені. Перевірка перетину кожного променя з кожним трикутником сцени у реальному часі є неможливою навіть для потужних систем.

Для оптимізації застосовуються просторові структури даних, зокрема ієрархія обмежуючих об'ємів (BVH — Bounding Volume Hierarchy). BVH дозволяє організувати геометрію сцени у деревоподібну структуру. Алгоритм перевіряє перетин променя не з окремими трикутниками, а з великими "коробками" (об'ємами), що їх містять. Це дозволяє відсікати цілі групи об'єктів, які промінь гарантовано не перетинає, знижуючи складність пошуку до логарифмічної.

Іншим сучасним рішенням є використання алгоритмів Denoising (знешумлення). Оскільки метод Монте-Карло дає "зернисте" зображення при малій кількості променів, застосовуються нейронні мережі для реконструкції фінального зображення, що дозволяє отримати високу якість картинки при менших витратах ресурсів.

Висновок

Технологія трасування променів є конвергенцією фізичної теорії та комп'ютерних наук. Вона базується на програмній імплементації законів поширення світла, перетворюючи фізичні явища (відбиття, заломлення, розсіювання) на алгоритмічні процедури. Подальший розвиток галузі пов'язаний з вдосконаленням структур даних (BVH) та методів штучного інтелекту для обробки зображень, що наближає комп'ютерну графіку до повної фотореалістичності.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Kajiya J. T. The Rendering Equation // SIGGRAPH Computer Graphics. – 1986. – Vol. 20, No. 4. – P. 143-150.

2. Whitted T. An Improved Illumination Model for Shaded Display // Communications of the ACM. – 1980. – Vol. 23, No. 6. – P. 343-349.
3. Pharr M., Jakob W., Humphreys G. Physically Based Rendering: From Theory to Implementation. – 3rd ed. – Morgan Kaufmann, 2016. – 1266 p.
4. Akenine-Möller T., Haines E., Hoffman N. Real-Time Rendering. – 4th ed. – A K Peters/CRC Press, 2018. – 1198 p.
5. Ray Tracing Essentials [Електронний ресурс] // NVIDIA Developer Documentation. – Режим доступу до ресурсу: <https://developer.nvidia.com/rtx/ray-tracing>

Дмитро Миколайович Чулюк, студент групи ЗПІ-25Б, факультет інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: waterwull88@gmail.com.

Науковий керівник: **Володимир Валерійович Мартинюк** – доцент кафедри загальної фізики Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: martynyuk.v.v@vntu.edu.ua

Dmytro Mykolayovich Chuliuk, student of group ЗПІ-25Б, Faculty of Information Technology and Computer Engineering.

Academic supervisor: **Volodymyr Valeriiovych Martyniuk** — Associate Professor of the Department of General Physics, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: martynyuk.v.v@vntu.edu.ua