

КЛАСИФІКАЦІЯ, ОСОБЛИВОСТІ ТА ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ АЛГОРИТМІВ РЕНДЕРИНГУ

Дмитро Єлісєєв, Тетяна Гришанович

CLASSIFICATION, FEATURES, AND DEVELOPMENT TRENDS OF RENDERING ALGORITHMS

Dmytro Yelisieiev Tetiana Hryshanovych

*Волинський національний університет імені Лесі Українки, просп. Волі, 13, Луцьк,
43025, Україна*

Abstract. *The paper examines modern rendering algorithms that underlie image generation in computer graphics. Classical and modern approaches are analyzed, including rasterization algorithms, ray tracing, global illumination, and hybrid methods. The directions of development of realistic rendering in the context of Web3D, real-time visualization, and hardware acceleration are outlined.*

Рендеринг — це процес генерування зображення зі сцени, що описана у тривимірному просторі, за допомогою алгоритмів обробки геометрії, матеріалів, освітлення та перспективи. Алгоритми рендерингу є фундаментом комп'ютерної графіки в таких галузях, як геймдизайн, САД-системи, симулятори, віртуальна та доповнена реальність.

Еволюція апаратного забезпечення та поява WebGPU, Vulkan, Metal сприяли розвитку високоефективних та фізично достовірних алгоритмів рендерингу, здатних працювати в реальному часі. Розглянемо основні алгоритми рендерингу, їх принципи, переваги та обмеження.

Алгоритми рендерингу умовно поділяються на такі категорії:

Растрезація (Rasterization) — це підхід до генерування зображень у реальному часі, зокрема в ігровій індустрії. Основна ідея полягає у проекції геометрії на екран, після чого відбувається відбір пікселів та заповнення фреймбуфера. Алгоритми растрезації є швидкими, добре підтримуються GPU, але мають низьку фізичну достовірність та обмежену підтримку складних оптичних ефектів. Растрезація — це найшвидший і наймасовіший метод рендерингу, який чудово працює в реальному часі завдяки апаратній підтримці. Однак вона не забезпечує фотореалізму самостійно, тому сучасні системи комбінують її з трасуванням променів або попередньо розрахованим освітленням.

Трасування променів (Ray Tracing) - це метод створення фотореалістичних зображень, де промені світла відстежуються з точки спостереження до джерела світла, враховуючи заломлення, відбиття та тіні. Такі алгоритми забезпечують високу якість зображення, реалістичні ефекти (дзеркальність, заломлення, розсіяне світло, тощо), але мають високу обчислювальну складність та не підходить для інтерактивних систем без апаратного прискорення. Трасування променів є основою фотореалістичної візуалізації. Завдяки сучасним GPU та денойзингу цей метод все частіше застосовується в реальному часі, включаючи ігри, архітектуру, Web3D та AR/VR.

Глобальне освітлення (Global Illumination) — група алгоритмів, які враховують усі джерела світла, прямі та непрямі відбиття. Вони використовуються у візуалізаціях архітектури, фільмах, наукових симуляціях. Алгоритми глобального освітлення забезпечують фотореалістичність, фізичну достовірність, підтримку складних оптичних ефектів та є універсальними застосуванні, але в той же час вимагають значних витрат пам'яті та часу

виконання, довгої підготовки сцен, є складними для масштабування в хмарі/мережі, чутливими до параметрів (радіус пошуку фотонів, глибина відстеження променів) та слабо піддаються оптимізації в реальному часі. Алгоритми глобального освітлення — це ключ до досягнення фотореалізму в комп'ютерній графіці. Вони дозволяють створити освітлення, яке максимально наближене до реального світу. Проте висока вартість у плані обчислень та ресурсоемність обмежують їхнє застосування в реальному часі.

Гібридні методи (підходи) — це група методів, що поєднують елементи двох або більше класичних підходів (зокрема растеризації, трасування променів та/або глобального освітлення) з метою досягнення компромісу між якістю зображення та продуктивністю. Ці методи гнучкі у налаштуваннях, добре масштабуються, сумісні із існуючими пайплайнами та завдяки RT-ядрам ефективно реалізуються на сучасних GPU. Разом з тим інтеграція різних технік вимагає складної архітектури, синхронізації ресурсів, перемикання режимів і ця група алгоритмів не завжди забезпечує однакову якість, має обмежену точність для складних явищ, залежить від апаратного забезпечення та є складною у тестуванні та налагодженні. Гібридні методи є «золотою серединою» між швидкістю та якістю. Вони дозволяють досягти реалістичного візуального результату без непомірних обчислювальних витрат. Хоча вони складні у впровадженні, саме гібридні підходи є основою сучасного реального часу в іграх, VR/AR, Web3D та хмарній візуалізації.

Алгоритми в реальному часі (Real-time rendering) — це методи та техніки обробки графічних даних, які дозволяють швидко генерувати зображення або відео безпосередньо під час виконання програми, забезпечуючи відображення змін сцени або взаємодії користувача з мінімальною затримкою. Метою таких алгоритмів є отримання візуального результату з високою частотою кадрів, що дозволяє створювати плавну та інтерактивну графіку, наприклад, у відеоіграх, симуляторах або візуалізації віртуальної та доповненої реальності. Алгоритми рендерингу в реальному часі є ключовими для інтерактивних застосунків. Вони поєднують продуктивність, масштабованість і широкий функціонал. Але вони жертвують фізичною точністю на користь швидкості, саме тому з'являються гібридні системи, які комбінують растеризацію з частковим трасуванням променів або запеченим освітленням.

Алгоритми рендерингу еволюціонували від простих методів растеризації до складних фізично обґрунтованих моделей освітлення, від графічних процесорів до хмарних та гібридних середовищ. Вибір алгоритму залежить від потреб користувача — чи це фотореалістичне зображення, чи інтерактивна VR-сцена. Зі зростанням можливостей Web3D та WebGPU, межа між офлайн та реальним часом поступово стирається. Усі розглянуті методи рендерингу мають свої переваги та обмеження залежно від цілей застосування. Традиційні підходи забезпечують високу продуктивність і гнучкість, але потребують потужного апаратного забезпечення. Гібридні методи намагаються поєднати обидва підходи, балансує між якістю зображення та швидкістю. Крім того, розвиток API та фреймворків, таких як Three.js і Babylon.js, значно спростило створення складних 3D-сцен у браузері. В цілому, вибір методу залежить від вимог проєкту: швидкості, якості, взаємодії та сумісності з різними пристроями. З розвитком WebGPU, WebAssembly і XR-інтерфейсів (WebXR), майбутнє рендерингу полягає в симбіозі локального і віддаленого обчислення. Очікується подальше впровадження AI-методів (наприклад, Denoising на основі нейронних мереж), автоматичного адаптування до пристрою та контексту використання. Також важливою тенденцією є edge rendering — виконання обчислень на серверах, географічно близьких до користувача, що зменшує затримки.

Бібліографія

1. Pharr M., Jakob W., Humphreys G. (2016). *Physically Based Rendering: From Theory to Implementation*. Morgan Kaufmann.
2. Geng Yu et al. (2023). *A Survey of Real-Time Rendering on Web3D Application*. Virtual Reality & Intelligent Hardware, 5(5), 379–394. <https://doi.org/10.1016/j.vrih.2022.04.002>
3. Akenine-Möller T., Haines E., Hoffman N. (2019). *Real-Time Rendering* (4th ed.). CRC Press.