

## Технологии рендеринга изображений

Быковских Дмитрий Александрович

14.12.2024

Технологии рендеринга изображений представляют собой разнообразные модели, методы, алгоритмы, подходы и инструменты для построения (или создания) изображений из трёхмерных (или двумерных) сцен.  
Технологии построения изображений включают:

- модели освещения;
- методы визуализации;
- техники освещения и алгоритмы;
- аппаратно-программные средства.

## └ Введение

# Введение

Технологии рендеринга изображений представляют собой разнообразные модели, методы, алгоритмы, подходы и инструменты для построения (или создания) изображений из трёхмерных (или двумерных) сцен.

Технологии построения изображений включают:

- модели освещения;
- методы визуализации;
- техники освещения и алгоритмы;
- аппаратно-программные средства.



Рис. 1 Классификация моделей освещения

## Image Rendering Technologies

2024-12-16

### └ Модели освещения

Модели освещения описывают физические процессы излучения, отражения (рассеяния), преломления и поглощения света.

Фактически модели освещения определяют, как свет влияет на внешний (визуальный) вид объектов.

Модели освещения можно разделить на:

- эмпирические;
- физически обоснованные (Physically-Based Rendering или PBR);
- специализированные.

# Модели освещения

Модель освещения — математическое представление процесса взаимодействия света с поверхностями объектов в сцене.

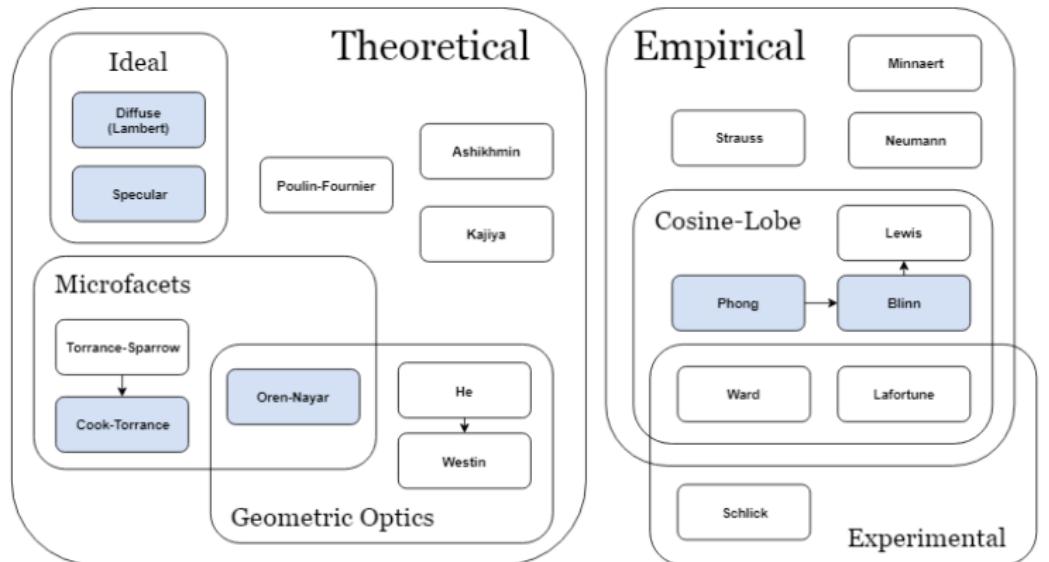


Рис. 1: Классификация моделей освещения

## └ Эмпирические модели освещения

### • Ламбертово освещение (Lambertian Reflectance, 1760-е, И. Г. Ламберт)

Модель для диффузного отражения, где интенсивность света зависит от угла между нормалью поверхности и направлением света.

Источник: «Photometria», J. H. Lambert, 1760.

### • Фонг (Phong Shading, 1975 г., Б. Т. Фонг)

Диффузное и спекулярное освещение.

Использует эмпирическую формулу для блеска.

*Illumination for computer-generated pictures*, B. T. Phong, 1975.

### • Блинн-Фонг (Blinn-Phong, 1977 г., Д. Ф. Блинн)

Упрощение модели Фонга с использованием полувектора для расчёта бликов.

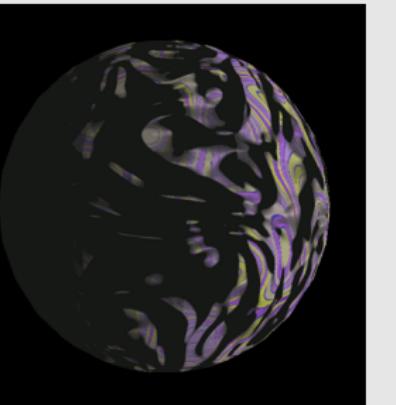
Источник: «Models of Light Reflection for Computer Synthesized Pictures», J. F. Blinn, 1977.

### • Льюис (Lewis Model, 1983 г., Д. Льюис)

Упрощённая модель освещения для интерактивных приложений. Стала популярна благодаря производительности и гибкости.

Источник: Распространена в материалах индустрии компьютерной графики.

Рис. 2: Модель освещения Блинна-Фонга и растеризатор



- Ламбертово освещение (Lambertian Reflectance, 1760-е, И. Г. Ламберт)  
Модель для диффузного отражения, где интенсивность света зависит от угла между нормалью поверхности и направлением света.  
Источник: «Photometria», J. H. Lambert, 1760.
- Фонг (Phong Shading, 1975 г., Б. Т. Фонг)  
Диффузное и спекулярное освещение.  
Использование полувектора для блеска.  
*Illumination for computer-generated pictures*, B. T. Phong, 1975.
- Блинн-Фонг (Blinn-Phong, 1977 г., Д. Ф. Блинн)  
Упрощение модели Фонга с использованием полувектора для расчёта бликов.  
*Models of Light Reflection for Computer Synthesized Pictures*, J. F. Blinn, 1977.
- Льюис (Lewis Model, 1983 г., Д. Льюис)  
Упрощённая модель освещения для интерактивных приложений. Стала популярна благодаря производительности и гибкости.  
Источник: Распространена в материалах индустрии компьютерной графики.

# Физически обоснованные модели освещения (Physically-Based Rendering Technique или PBRT)

- Кук-Торранс (Cook-Torrance, 1982 г., Р. Кук и К. Торранс)

Учитывает микрофасетки поверхности, описывая отражение с помощью BRDF.

Включает микрофасетную нормаль (модель GGX или Бекмана).

Источник: «A Reflectance Model for Computer Graphics»,  
Cook Torrance, 1982

- Орен-Наяр (Oren-Nayar, 1994 г., М. Орен и Ш. Наяр)

Расширение ламбертовой модели для шероховатых поверхностей.

Источник: «Generalization of Lambert's Reflectance Model»,  
Oren and Nayar, 1994

- Шлик (Schlick Approximation, 1994 г., К. Шлик)

Апроксимация уравнения Френеля для отражения света.

Источник: «An Inexpensive BRDF Model for Physically-based  
Rendering», Christophe Schlick, 1994

## Image Rendering Technologies

2024-12-16

### Физически обоснованные модели освещения (Physically-Based Rendering Technique или PBRT)

Пример модели освещения, использующей PBRT

$$L_o(x, \omega_o) = L_e(x, \omega_o) + \int_{\Omega} \frac{D(h)F(h, \omega_o)G(x, \omega_o, \omega_i)}{4(\omega_o \cdot n)(\omega_i \cdot n)} L_i(x, \omega_i) \max(0, n \cdot \omega_i) d\omega_i$$

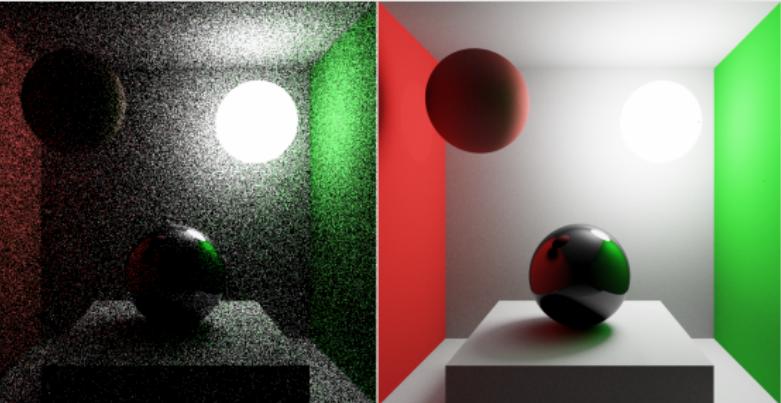


Рис. 3: Модель освещения, использующая PBRT, и метод трассировки пути

Физически обоснованные модели освещения  
(Physically-Based Rendering Technique или PBRT)

- Кук-Торранс (Cook-Torrance, 1982 г., Р. Кук и К. Торранс)  
Учитывает микрофасетки поверхности, описывая отражение с помощью BRDF.  
Включает микрофасетную нормаль (модель GGX или Бекмана).  
Источник: «A Reflectance Model for Computer Graphics»,  
Cook Torrance, 1982
- Орен-Наяр (Oren-Nayar, 1994 г., М. Орен и Ш. Наяр)  
Расширение ламбертовой модели для шероховатых поверхностей.  
Источник: «Generalization of Lambert's Reflectance Model»,  
Oren and Nayar, 1994
- Шлик (Schlick Approximation, 1994 г., К. Шлик)  
Апроксимация уравнения Френеля для отражения света.  
Источник: «An Inexpensive BRDF Model for Physically-based  
Rendering», Christophe Schlick, 1994

# Современные модели освещения, основанные на PBRT

- Дисней (Disney BRDF, 2012 г., Walt Disney Animation Studios)  
Обобщённая модель PBR, разработанная в Walt Disney Animation Studios.  
Источник: Physically Based Shading at Disney, Brent Burley, 2012.
- Autodesk Standard Surface  
Универсальная модель поверхностей, используемая в индустрии для физически корректного рендеринга.  
Источник: Документация Autodesk Standard Surface, I. Georgiev et al., 2019 г.
- Принципиальный BSDF (Principled BSDF) в Blender  
Шейдер для удобного использования PBR-материалов в Blender, основанный на Disney BRDF.  
Источник: Документация Blender, Principled BSDF.

## Image Rendering Technologies

2024-12-16

### Современные модели освещения, основанные на PBRT

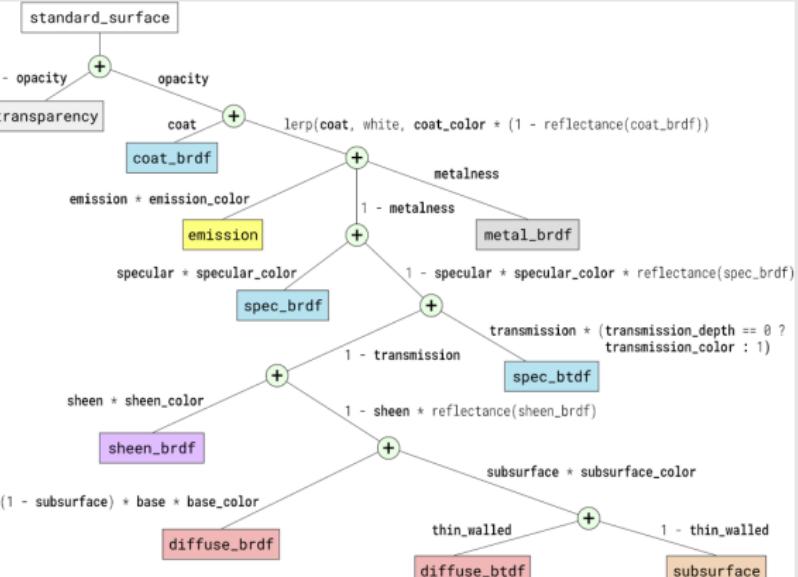


Рис. 4: Иерархическое дерево коэффициентов универсальной модели освещения (Autodesk Standard Surface)

- Дисней (Disney BRDF, 2012 г., Walt Disney Animation Studios)  
Обобщённая модель PBR, разработанная в Walt Disney Animation Studios.  
Источник: Physically Based Shading at Disney, Brent Burley, 2012.
- Autodesk Standard Surface  
Универсальная модель поверхностей, используемая в индустрии для физически корректного рендеринга.  
Источник: Документация Autodesk Standard Surface, I. Georgiev et al., 2019 г.
- Принципиальный BSDF (Principled BSDF) в Blender  
Шейдер для удобного использования PBR-материалов в Blender, основанный на Disney BRDF.  
Источник: Документация Blender, Principled BSDF.

- Шейдеры NPR (Non-Photorealistic Rendering, 1990-е)  
Для стилизованных эффектов, таких как Toon Shading.  
Источник: Основы заложены в 1990-х для мультфильмов и графики.
- SSS (Subsurface Scattering, 2001 г., Хенрик Ванке)  
Освещение полупрозрачных материалов.  
Источник: «A Practical Model for Subsurface Light Transport», Jensen, 2001.
- Объёмное освещение (Volumetric Lighting, 1990-е)  
Имитация взаимодействия света с объёмными средами.  
Источник: Применение в движках RenderMan.
- Рендеринг волос (Hair Rendering, 2003 г., Маркос Фажардо)  
Специфические модели освещения и самозатенения для реалистичной симуляции волос.  
Источник: «Rendering Hair Using a Photon Mapping Approach», Marschner et al., 2003.

## Image Rendering Technologies

2024-12-16

### Специализированные модели



path traced



Рис. 5: Изображения, полученные с помощью Toon Shading (слева) и Hair Rendering (справа)

# Специализированные модели

## Методы визуализации

С одной стороны, методы часто используют те или иные модели освещения для получения итогового результата. С другой стороны, метод может включать несколько техник и алгоритмов для вычисления освещения на сцене.

Техника освещения — конкретный способ применения модели и/или метода освещения в практике.

Техники освещения могут включать дополнительные механизмы, которые ускоряют процесс рендеринга или помогают достичь определенных визуальных эффектов. Техники обычно привязаны к специфическим алгоритмам и инструментам.

Алгоритм — последовательность шагов, предназначенная для решения определенной задачи.

В графике алгоритм описывает процесс, с помощью которого методы или техники реализуются на практике, в виде математических формул и операций, используя вычислительные системы.

# Методы визуализации

Метод (в контексте компьютерной графики) — способ вычисления или приближенного вычисления освещения, используя различные математические подходы.

## Виды

- Ray Casting (Метод «бросания лучей»)
- Rasterization (Растеризация)
- Ray Tracing (Трассировка лучей)
- Path Tracing (Трассировка путей)
- Photon Mapping (Метод фотонных карт)
- Radiosity

## Примечание.

Растеризация — лучший выбор для построения изображений в реальном времени, где важна скорость.

Трассировка лучей — промежуточный вариант, баланс между реализмом и производительностью.

Трассировка путей — идеальный выбор для фотorealистичных визуализаций, но практически непригоден для построения изображений в реальном времени.

Ray Casting (или метод «бросания лучей») — технология, которая преобразует ограниченный набор данных (упрощенная двумерная карта) в 3D проекцию путем «бросания лучей» из точки обзора по всей области видимости.

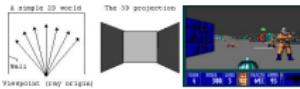


Рис. 6: Схема построения изображения с помощью Ray Casting (слева); кадр игры Wolfenstein 3D (1992 г.) (справа)

## Image Rendering Technologies

2024-12-16

### └ Метод «бросания лучей» (Ray Casting)

#### Особенности

- В 1968 г. Артур Аппель (A. Appel) из IBM описал первую версию Ray Casting в своей статье о генерации скрытых линий и поверхностей (*A Technique for Determining Paths and Visibility in Realistic Images*).
- Высокая скорость построения изображений, поэтому использовался в ранних трехмерных играх.
- Отсутствие отражений, теней и глобального освещения.

# Метод «бросания лучей» (Ray Casting)

Ray Casting (или метод «бросания лучей») — технология, которая преобразует ограниченный набор данных (упрощенная двумерная карта) в 3D проекцию путем «бросания лучей» из точки обзора по всей области видимости.

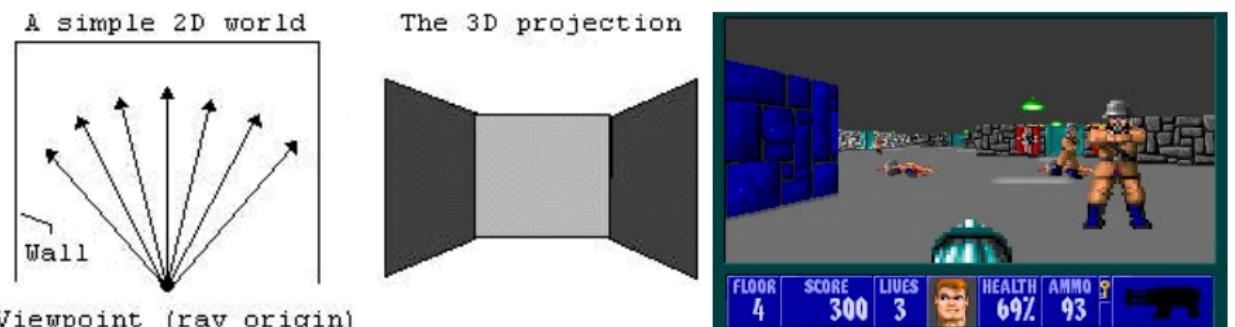


Рис. 6: Схема построения изображения с помощью Ray Casting (слева); кадр игры Wolfenstein 3D (1992 г.) (справа)

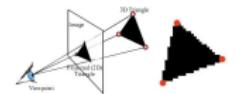


Рис. 7: Схема построения изображения с помощью rasterization

## Image Rendering Technologies

2024-12-16

### └ Растеризация (Rasterization)

Растер (Raster, 1934) — сканирующее поле.

В 1980 году T. Whitted расширил концепцию Ray Casting, добавив расчет вторичных лучей для отражений и теней.

«An improved illumination model for shaded display», T. Whitted, 1980.

Недостаток такого метода рендеринга заключается в том, что необходимо использовать дополнительно методы для создания теней и отражений.

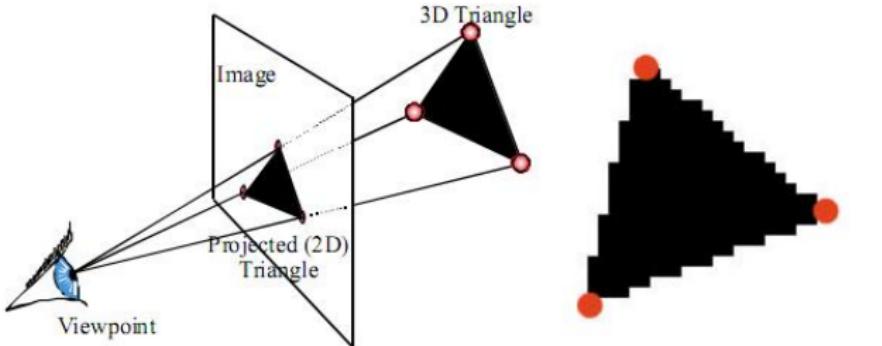


Рис. 7: Схема построения изображения с помощью rasterization



## Трассировка лучей (Ray Tracing)

### Шаги процесса

- Генерация первичных лучей (primary rays).  
Лучи отправляются из точки зрения камеры через каждый пиксель экрана.
- Определение точек пересечения.  
Для каждого такого луча проверяется, с какими объектами пересекается его траектория движения, и выбирается ближайшая точка пересечения, которая принадлежит поверхности объекта.
- Генерация дополнительных лучей...
  - если поверхность отражающая и/или преломляющая (прямое освещение, shadow rays).
  - к источникам света для определения степени затенения (косвенное освещение, secondary rays).  
Луч перестает отслеживаться, после: его поглощения, выхода за границу сцены или при достижении заданного числа шагов.  
т.о. цвет пикселя вычисляется на основе модели освещения, параметров источников света и свойств материалов поверхностей объектов, с которыми столкнулся луч.

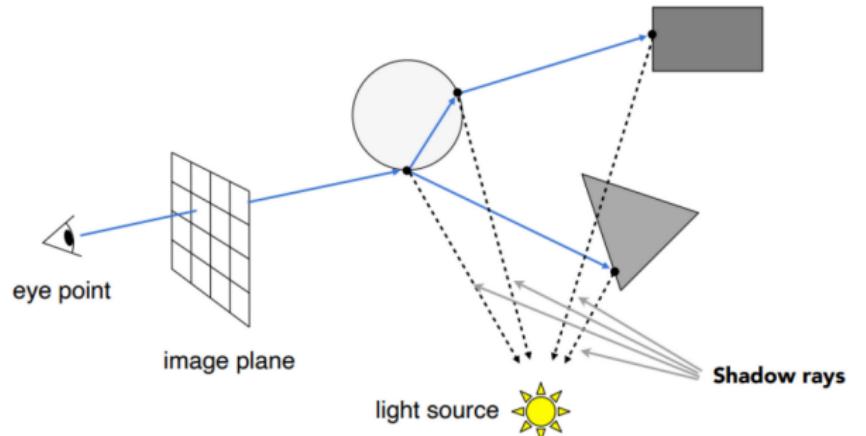


Рис. 8: Схема траектории движения луча в методе трассировки лучей

## └ Особенности трассировки лучей

### Техники оптимизации:

- Структуры данных.  
KD-деревья, BVH (Bounding Volume Hierarchy) — для ускорения поиска пересечений.
- Русская рулетка (Russian Roulette).  
Метод стохастического завершения трассировки для управления глубиной рекурсии.
- Семплирование (Sampling).  
Уменьшение количества лучей при сохранении качества.

• Трассировка лучей (Ray Tracing, 1980 г., Т. Уиттед)  
Расширение метода для расчёта глобального освещения, включая отражения, преломления и индиректное освещение.  
Источник: «An Improved Illumination Model for Shaded Display», T. Whitted, 1980 г.

• Технологии NVIDIA RTX (начиная с 20 серии GeForce RTX, 2018 г.) и AMD RDNA (начиная с серии Radeon RX 6000, 2020 г.) поддерживают аппаратное ускорение трассировки лучей.

# Особенности трассировки лучей

- Трассировка лучей (Ray Tracing, 1980 г., Т. Уиттед)  
Расширение метода для расчёта глобального освещения, включая отражения, преломления и индиректное освещение.  
Источник: «An Improved Illumination Model for Shaded Display», T. Whitted, 1980 г.
- Технологии NVIDIA RTX (начиная с 20 серии GeForce RTX, 2018 г.) и AMD RDNA (начиная с серии Radeon RX 6000, 2020 г.) поддерживают аппаратное ускорение трассировки лучей.

Метод трассировки лучей моделирует распространение света от камеры (наблюдателя) к объектам в сцене и далее к источникам света. Лучи отправляются от камеры (наблюдателя) через каждый пиксель экрана в сцену и продолжают отслеживаться после взаимодействия с объектами, моделируя, как свет распространяется и изменяется.



Рис. 9: Схема траекторий движений лучей в методе трассировки путей

# Трассировка пути (Path Tracing)

Метод трассировки лучей моделирует распространение света от камеры (наблюдателя) к объектам в сцене и далее к источникам света. Лучи отправляются от камеры (наблюдателя) через каждый пиксель экрана в сцену и продолжают отслеживаться после взаимодействия с объектами, моделируя, как свет распространяется и изменяется.

Направления новых лучей выбираются случайным образом.

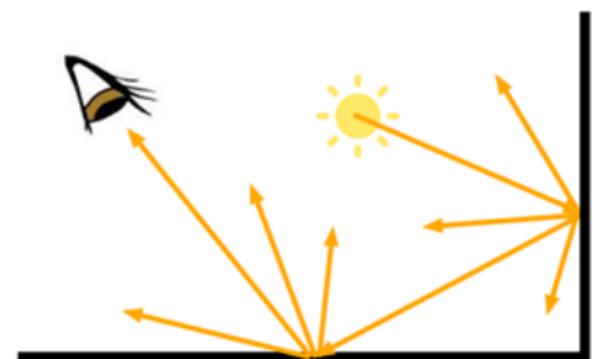


Рис. 9: Схема траекторий движений лучей в методе трассировки путей

## Трассировка пути (Path Tracing)

### Шаги процесса

1. Генерация первичных лучей.
2. Определение точек пересечения.
3. Генерация дополнительных лучей.

При этом используется случайное сэмплирование (Monte Carlo) для определения пути лучей, что позволяет учесть как прямое, так и косвенное освещение.

т.о. цвет пикселя вычисляется на основе модели освещения, параметров источников света и свойств материала поверхности.

4. Сборка итогового изображения

Шаги с 1 по 3 повторяются, а результаты расчётов цветовых вкладов всех лучей усредняются по каждому пикслю.

Чем больше лучей отправлено через пиксль, тем точнее и чище становится изображение (меньше шума).

- Метод Монте-Карло (Monte Carlo, 1949 г., Н. Метрополис и С. Улам) Семейство методов случайных выборок, разработанных для решения задач интеграции многомерных функций. Подходит для моделирования освещения в сложных сценах.
- Трассировка путей (Path Tracing, 1986 г., Джеймс Кадзия) Расширение трассировки лучей для симуляции глобального освещения. Впервые описано в статье «The Rendering Equation».
- Реалистичные изображения в кинематографе (Path Tracing, 2000-е годы) Path Tracing активно использовался в анимационных фильмах, таких как «Скуби-Ду» и «В поисках Немо». Компания Pixar внесла значительный вклад в популяризацию технологии.
- Path Tracing в реальном времени (Real-Time Path Tracing, 2020-е годы) Современные достижения позволили внедрить Path Tracing в игры. Реализация: Quake II RTX (2019), Portal RTX (2022), Cyberpunk 2077: Ray Tracing Overdrive (2023), Alan Wake 2 (2023) с DLSS 3.5 и другие проекты.

Источник: NVIDIA RTX, разработчики игр и технологий, 2020-е годы.

## Image Rendering Technologies

2024-12-16

### Трассировка пути (Path Tracing)

Главным недостатком является его вычислительная стоимость, поскольку необходимости трассировать множество путей для каждого пикселя, особенно в сложных сценах, и поэтому также применяются оптимизации:

- Снижение шума (Denoising). Шум возникает при малом числе лучей. Алгоритмы denoising (снижения шума) используют машинное обучение или другие статистические методы для удаления шума из промежуточных изображений.
- Использование ускоряющих структур (Acceleration Structures). BVH (Bounding Volume Hierarchy) и KD-деревья — это методы для ускорения поиска пересечений лучей с объектами в сцене, за счет уменьшения проверки пересечений.
- Выборка по значимости (Importance Sampling). Метод, при котором пути лучей выбираются с учетом их вероятности столкновения со значимыми источниками света.
- Адаптивное сэмплирование (Adaptive Sampling). Метод, при котором количество сэмплов изменяется в зависимости от сложности сцены.

# Трассировка пути (Path Tracing)

- Метод Монте-Карло (Monte Carlo, 1949 г., Н. Метрополис и С. Улам) Семейство методов случайных выборок, разработанных для решения задач интеграции многомерных функций. Подходит для моделирования освещения в сложных сценах.
- Источник: The Monte Carlo method, N. Metropolis и S. Ulam, 1949 г.
- Трассировка путей (Path Tracing, 1986 г., Джеймс Кадзия) Расширение трассировки лучей для симуляции глобального освещения. Впервые описано в статье «The Rendering Equation».
- Источник: «The Rendering Equation», J. Kajiya, 1986 г.
- Реалистичные изображения в кинематографе (Path Tracing, 2000-е годы) Path Tracing активно использовался в анимационных фильмах, таких как «Скуби-Ду» и «В поисках Немо». Компания Pixar внесла значительный вклад в популяризацию технологии.
- Источник: Использование Path Tracing в индустрии анимации, 2000-е годы.
- Path Tracing в реальном времени (Real-Time Path Tracing, 2020-е годы) Современные достижения позволили внедрить Path Tracing в игры. Реализация: Quake II RTX (2019), Portal RTX (2022), Cyberpunk 2077: Ray Tracing Overdrive (2023), Alan Wake 2 (2023) с DLSS 3.5 и другие проекты.
- Источник: NVIDIA RTX, разработчики игр и технологий, 2020-е годы.