

Физически-корректный рендеринг Physically-Based Rendering

Быковских Дмитрий Александрович

23.12.2023

2023-12-27

Физически-корректный рендеринг

Физически-корректный рендеринг
Physically-Based Rendering

Быковских Дмитрий Александрович

23.12.2023

Физически-корректный рендеринг (Physically-Based Rendering, PBR) — это метод рендеринга, основанный на физических принципах взаимодействия света с материалами.

Цель PBR — создание более реалистичных и физически правильных изображений, учитывая разнообразные характеристики материалов и их взаимодействие со светом.

Эти принципы позволяют PBR создавать более реалистичные материалы, которые лучше соответствуют поведению света в реальном мире.

Популярные движки для 3D-графики, такие как Unreal Engine и Unity, включают поддержку PBR, что позволяет художникам и разработчикам создавать более реалистичные и красочные сцены.

Основные принципы PBR включают:

- Сохранение энергии: Суммарная энергия света, падающего на поверхность, должна быть больше или равной суммарной энергии, излучаемой, отраженной и преломленной этой поверхностью.
- Микрогеометрия поверхности: Учет микроструктуры поверхности материала, включая микрограницы, которые влияют на отражение света.
- Многолучевое преломление и отражение: Учет нескольких путей, которые может пройти свет через материал, включая преломление (прохождение света сквозь материал) и отражение.
- Консистентность Френеля: Учет того, как интенсивность отражения меняется в зависимости от угла зрения и материала (металл, неметалл).
- Глобальное освещение: Интеграция различных источников света, включая прямое освещение от источников света и косвенное освещение от отраженного света.

Теория переноса света

Закон сохранения энергии

Закон сохранения энергии — основной принцип, утверждающий, что в изолированной системе полная энергия остается постоянной.

Это означает, что энергия не может быть создана или уничтожена, она может только изменять свою форму.

Этот закон особенно важен при рассмотрении взаимодействия света с различными поверхностями и средами.

Применительно к свету упрощенный закон сохранения энергии может быть выражен следующим образом (\geq заменяется на \approx):

$$E_{\text{вх}} \geq E_{\text{отр}} + E_{\text{пр}} + E_{\text{погл}},$$

где $E_{\text{вх}}$ — энергия падающего света (входящая энергия); $E_{\text{отр}}$ — энергия отраженного света; $E_{\text{пр}}$ — энергия преломленного света (если свет проходит через среду с изменением показателя преломления); $E_{\text{погл}}$ — энергия поглощенного света.

Физически-корректный рендеринг

Теория переноса света

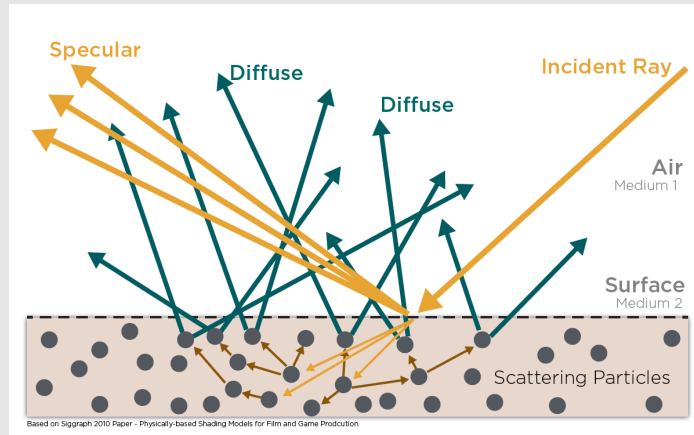


Рис. 1: Взаимодействие света с поверхностью

Теория переноса света

Закон сохранения энергии

Закон сохранения энергии — основной принцип, утверждающий, что в изолированной системе полная энергия остается постоянной. Это означает, что энергия не может быть создана или уничтожена, она может только изменять свою форму. Этот закон особенно важен при рассмотрении взаимодействия света с различными поверхностями и средами. Применительно к свету упрощенный закон сохранения энергии может быть выражен следующим образом (\geq заменяется на \approx):

$$E_{\text{вх}} \geq E_{\text{отр}} + E_{\text{пр}} + E_{\text{погл}},$$

где $E_{\text{вх}}$ — энергия падающего света (входящая энергия); $E_{\text{отр}}$ — энергия отраженного света; $E_{\text{пр}}$ — энергия преломленного света (если свет проходит через среду с изменением показателя преломления); $E_{\text{погл}}$ — энергия поглощенного света.

2023-12-27

Подповерхностное рассеивание

Подповерхностное рассеяние света происходит, когда свет поглощается и рассеивается внутри материала под его поверхностью.

Этот процесс часто встречается в различных средах, таких как вода, молекулярные газы, стекло, биологические ткани и другие.

Рассеивание света внутри материала может зависеть от длины волны, что может создавать эффекты цветного рассеяния.

Основные аспекты подповерхностного рассеяния:

- Рассеивание света внутри материала: Поглощенный свет может рассеиваться внутри материала, из-за чего часть его энергии может вернуться на поверхность.
- Изменение направления света: Свет, попадающий в материал, может изменять свое направление из-за взаимодействия с молекулами или частицами внутри.
- Эффекты мутности и мягких краев: Подповерхностное рассеяние может создавать эффекты мутности в материалах, а также способствовать формированию мягких краев и более плавных переходов между освещенными и теневыми областями.

└─Подповерхностное рассеивание

Подповерхностное рассеивание

Подповерхностное рассеяние света происходит, когда свет поглощается и рассеивается внутри материала под его поверхностью. Этот процесс часто встречается в различных средах, таких как вода, молекулярные газы, стекло, биологические ткани и другие. Рассеивание света внутри материала может зависеть от длины волны, что может создавать эффекты цветного рассеяния. Основные аспекты подповерхностного рассеяния:

- Рассеивание света внутри материала: Поглощенный свет может рассеиваться внутри материала, из-за чего часть его энергии может вернуться на поверхность.
- Изменение направления света: Свет, поглощенный в материал, может изменить свое направление из-за взаимодействия с молекулами или частицами внутри.
- Эффекты мутности и затенения: Полупрозрачное рассеивание может создавать эффекты мутности в материалах, а также способствовать формированию мутных краев и более плавным переходам между освещенными и теневыми областями.



Рис. 2: Подповерхностное рассеяние лучше всего заметно на тонкой геометрии, как кожа между пальцами

Шероховатость поверхности

Модель отражающих микрограней тесно связана с шероховатостью. Вот несколько способов, которыми шероховатость связана с поверхностью:

- Рассеивание света: Шероховатость поверхности приводит к созданию более мягких теней и более реалистичному освещению.
- Отражение и преломление: Зеркальные поверхности будут отражать свет более точно, в то время как шероховатые поверхности могут создавать более размытые отражения.
- Текстуры: Более шероховатые поверхности могут иметь более сложные текстурные паттерны, которые влияют на визуальное восприятие (карты высот, карты нормалей).
- Моделирование материалов: В создании материалов для компьютерной графики учитывается шероховатость для реалистичного воссоздания различных типов поверхностей, таких как дерево, кожа, металл и т.д.

Физически-корректный рендеринг

Шероховатость поверхности

Шероховатость поверхности

Модель отражающих микрограней тесно связана с шероховатостью. Вот несколько способов, которыми шероховатость связана с поверхностью:

- Рассеивание света: Шероховатость поверхности приводит к созданию более мягких теней и более реалистичному освещению.
- Отражение и преломление: Зеркальные поверхности будут отражать свет более точно, в то время как шероховатые поверхности могут создавать более размытые отражения.
- Текстуры: Более шероховатые поверхности могут иметь более сложные текстурные паттерны, которые влияют на визуальное восприятие (карты высот, карты нормалей).
- Моделирование материалов: В создании материалов для компьютерной графики учитывается шероховатость для реалистичного воссоздания различных типов поверхностей, таких как дерево, кожа, металл и т.д.

Шероховатость поверхности определяет степень неровности или нерегулярности поверхности. Она описывает, насколько мелкие детали, бугры или выемки присутствуют на поверхности объекта. Она влияет на то, как свет взаимодействует с поверхностью и какие эффекты она создает. Таким образом, шероховатость поверхности тесно связана с тем, как свет взаимодействует с объектом, и она играет важную роль в создании реалистичных изображений в компьютерной графике.



Рис. 3: Сравнение поверхностей с разной степенью шероховатости

Медианный вектор

halfway vector

Для расчета отраженной компоненты требуется выполнить довольно громоздкие вычисления. Существует модель Блинна-Фонга, представляющая собой модель Фонга с упрощенным расчетом зеркального отражения. Вычислим в каждой точке медианный вектор H (halfway vector):

$$H = \frac{L + V}{|L + V|},$$

который показывает ориентацию площадки, на которой будет максимальное отражение.

Физически-корректный рендеринг

2023-12-27

└ Медианный вектор

Медианный вектор
halfway vector

Для расчета отраженной компоненты требуется выполнить довольно громоздкие вычисления. Существует модель Блинна-Фонга, представляющая собой модель Фонга с упрощенным расчетом зеркального отражения. Вычислим в каждой точке медианный вектор H (halfway vector):

$$H = \frac{L + V}{|L + V|},$$

который показывает ориентацию площадки, на которой будет максимальное отражение.

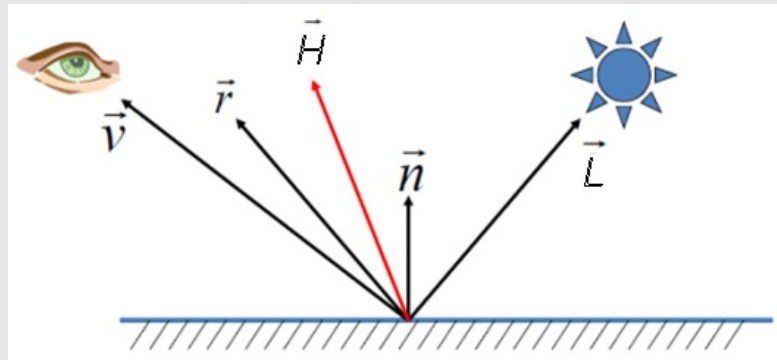


Рис. 4: Пример расположения векторов

Физически-корректный рендеринг

Physically-Based Rendering

Физически-корректный рендеринг (Physically Based Rendering, PBR) — это подход к генерации изображений, который стремится моделировать физические свойства света и материалов для достижения более реалистичных результатов.

Излученность в направлении наблюдения при условии всех входящих световых потоков.

$$L(x, \theta_o, \phi_o) = \int_{\Omega} f_r(\theta_o, \phi_o, \theta_i, \phi_i) L(x, \theta_i, \phi_i) \cos \theta_i d\omega$$

где $f_r(\theta_o, \phi_o, \theta_i, \phi_i) = \frac{dL(\theta_o, \phi_o)}{dE(\theta_i, \phi_i)}$ — двулучевая функция отражательной способности (Bidirectional Reflectance Distribution Function, BRDF).

Физически-корректный рендеринг

Физически-корректный рендеринг

Физически-корректный рендеринг
Physically-Based Rendering

Физически-корректный рендеринг (Physically Based Rendering, PBR) — это подход к генерации изображений, который стремится моделировать физические свойства света и материалов для достижения более реалистичных результатов. Излученность в направлении наблюдения при условии всех входящих световых потоков.

$$L(x, \theta_o, \phi_o) = \int_{\Omega} f_r(\theta_o, \phi_o, \theta_i, \phi_i) L(x, \theta_i, \phi_i) \cos \theta_i d\omega$$

где $f_r(\theta_o, \phi_o, \theta_i, \phi_i) = \frac{dL(\theta_o, \phi_o)}{dE(\theta_i, \phi_i)}$ — двулучевая функция отражательной способности (Bidirectional Reflectance Distribution Function, BRDF).

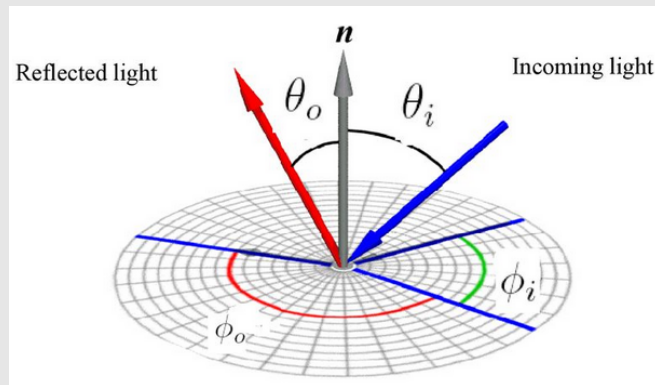


Рис. 5: Двулучевая функция отражательной способности

Существует несколько физически-корректных BRDF для аппроксимации реакции поверхности на освещение. Тем не менее, почти все графические конвейеры реального времени используют BRDF, известную как BRDF Кука-Торренса (Cook-Torrance).

$$L_o(p, \omega_0) = \int_{\Omega} \left(k_d \frac{c}{\pi} + k_s \frac{DFG}{4(\omega_0 \cdot n)(\omega_i \cdot n)} \right) L_i(p, \omega_i) (n \cdot \omega_i) d\omega_i$$

Физически-корректный рендеринг

Physically-Based Rendering

Существует несколько физически-корректных BRDF для аппроксимации реакции поверхности на освещение. Тем не менее, почти все графические конвейеры реального времени используют BRDF, известную как BRDF Кука-Торренса (Cook-Torrance).

$$L_o(p, \omega_0) = \int_{\Omega} \left(k_d \frac{c}{\pi} + k_s \frac{DFG}{4(\omega_0 \cdot n)(\omega_i \cdot n)} \right) L_i(p, \omega_i) (n \cdot \omega_i) d\omega_i$$

Физически-корректный рендеринг

Основные принципы физически-корректного рендеринга включают в себя:

- Моделирование света: Учет различных источников света, их цветовых температур, направления и интенсивности. Учет закона сохранения энергии в процессе отражения и преломления света.
- Моделирование материалов: Физически-корректные модели отражения, преломления и поглощения света в зависимости от типа материала.
- Моделирование теней и окружающей среды: Учет влияния теней от различных объектов и источников света. Моделирование окружающей среды для более точного воссоздания условий освещения.
- Многоканальные текстуры: Использование текстур с несколькими каналами для более точного представления различных характеристик материалов, таких как шероховатость, металлические свойства и др.
- Моделирование камеры: Учет характеристик камеры, таких как диафрагма и выдержка, для более реалистичного эффекта глубины резкости и затемнения по краям кадра.

Физически-корректный рендеринг

Physically-Based Rendering

Существует несколько физически-корректных моделей BRDF для аппроксимации реакции поверхности на освещение. Самой популярной является модель BRDF Кука-Торренса (Cook-Torrance), которая содержит диффузную и зеркальную составляющие:

$$f_r = k_d f_{\text{lambert}} + k_s f_{\text{cook-torrance}}$$

где k_d — преломленная доля входящей световой энергии; k_s — отраженная доля входящей световой энергии.

$$f_r = k_d \frac{c}{\pi} + k_s \frac{DFG}{4(\omega_o \cdot n)(\omega_i \cdot n)},$$

где c — альбеда или цвет поверхности (диффузная текстура поверхности).

2023-12-27

Физически-корректный рендеринг

└ Физически-корректный рендеринг

Физически-корректный рендеринг
Physically-Based Rendering

Существует несколько физически-корректных моделей BRDF для аппроксимации реакции поверхности на освещение. Самой популярной является модель BRDF Кука-Торренса (Cook-Torrance), которая содержит диффузную и зеркальную составляющие:

$$f_r = k_d f_{\text{lambert}} + k_s f_{\text{cook-torrance}}$$

где k_d — преломленная доля входящей световой энергии; k_s — отраженная доля входящей световой энергии.

$$f_r = k_d \frac{c}{\pi} + k_s \frac{DFG}{4(\omega_o \cdot n)(\omega_i \cdot n)}$$

где c — альбеда или цвет поверхности (диффузная текстура поверхности).

Диффузное рассеивание

Первое слагаемое BRDF описывает диффузную часть уравнения, обозначенную здесь как f_{lambert} . Это есть Ламбертово рассеяние.

$$L_o(p, \omega_o) = k_d \frac{c}{\pi} \int_{\Omega} L_i(p, \omega_i) (n \cdot \omega_i) d\omega_i,$$

где ω_i — входящий вектор направления рассчитывается случайным образом с некоторым законом распределения.

Примечание.

Деление на π нужно, чтобы нормировать рассеянный свет, поскольку ранее обозначенный интеграл, содержащий BRDF, умножается на π .

Физически-корректный рендеринг

└ Диффузное рассеивание

Диффузное рассеивание

Первое слагаемое BRDF описывает диффузную часть уравнения, обозначенную здесь как f_{lambert} . Это есть Ламбертово рассеяние.

$$L_o(p, \omega_o) = k_d \frac{c}{\pi} \int_{\Omega} L_i(p, \omega_i) (n \cdot \omega_i) d\omega_i,$$

где ω_i — входящий вектор направления рассчитывается случайным образом с некоторым законом распределения.
Примечание.
Деление на π нужно, чтобы нормировать рассеянный свет, поскольку ранее обозначенный интеграл, содержащий BRDF, умножается на π .

Зеркальное рассеивание

Второе слагаемое $k_s f_{\text{cook-torrance}}$ выглядит немного сложнее и описывает зеркальную часть уравнения.

$$L_o(p, \omega_o) = k_s \int_{\Omega} \frac{DFG}{4(\omega_o \cdot n)(\omega_i \cdot n)} L_i(p, \omega_i) (n \cdot \omega_i) d\omega_i,$$

где ω_i — входящий вектор направления рассчитывается случайным образом с некоторым законом распределения.

Примечание.

Это слагаемое состоит из трех функций и коэффициента нормирования в знаменателе. Каждая из букв D , F и G представляет собой определенный тип функции, которая аппроксимирует определенную часть отражающих свойств поверхности.

Физически-корректный рендеринг

└ Зеркальное рассеивание

1. Функция нормального распределения (Normal Distribution Function, NDF): аппроксимирует количество микрограней поверхности, ориентированных по медианному вектору, основываясь на шероховатости поверхности; это основная функция, аппроксимирующая микрогрani.
2. Уравнение Френеля (Fresnel Equation): описывает коэффициент поверхностного отражения при разных углах.
3. Функция геометрии (Geometry Function): описывает свойство самозатенения микрограней. Когда поверхность довольно шероховатая, одни микрогрani поверхности могут перекрывать другие, тем самым уменьшая количество света, отражаемого поверхностью.

Каждая из этих функций имеет различные реализации, направленные на приближенное описание заданной физической модели.

Второе слагаемое $k_e f_{\text{cool-transport}}$ выглядит немного сложнее и описывает зеркальную часть уравнения.

$$L_0(\rho, \omega_0) = k_0 \int \frac{DFG}{4(\omega_0 - \omega)(\omega_0 + \omega)} L_1(\rho, \omega) (\mathbf{n} \cdot \boldsymbol{\omega}) d\boldsymbol{\omega},$$

где ω_i — входящий вектор направления рассчитывается случайным образом с некоторым законом распределения.

Примечание.

Это слагаемое состоит из трех функций и коэффициента нормирования в знаменателе. Каждая из букв D , F и G представляет собой определенный тип функции, которая аппроксимирует определенную часть отражающих свойств поверхности.

2023-12-27

Физически-корректный рендеринг

└ Функция нормального распределения (D)

$$D(n, h, \alpha) = \frac{\alpha^2}{\pi((h \cdot n)^2(\alpha^2 - 1) + 1)^2},$$

где D - функция распределения вероятности микрограней; n - нормаль к поверхности; h - медианный вектор; α - параметр шероховатости (roughness) поверхности.

Функция нормального распределения (D)

В физически-корректном рендеринге (PBR), модель микрограней используется для описания микроструктуры поверхности материала и его влияния на отражение света. Одной из широко используемых моделей микрограней является GGX (англ. Generalized Trowbridge-Reitz Geometric optics reflectance model). Функция нормального распределения D статистически аппроксимирует относительную площадь поверхности микрограней, точно ориентированных по заданному вектору \hat{h} .

$$D(n, \hbar, \alpha) = \frac{\alpha^2}{\pi((\hbar \cdot n)^2(\alpha^2 - 1) + 1)^2}$$

где D – функция распределения вероятности микрограней; n – нормаль поверхности; \vec{n} – медианный вектор; α – параметр шероховатости (roughness) поверхности.

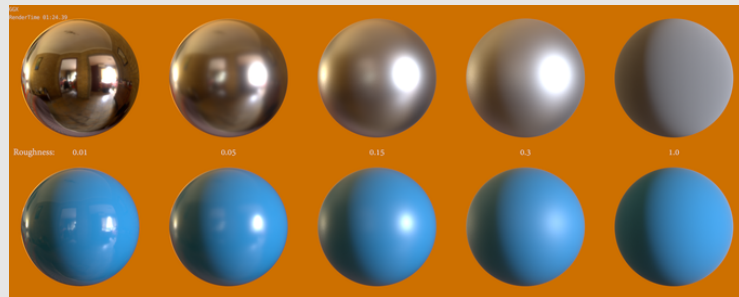


Рис. 6: Функция нормального распределения GGX при различных значениях шероховатости

Примечание: способствует созданию более реалистичных изображений, особенно в отношении материалов с разной степенью шероховатости.

$$F(\theta) = F_0 + (1 - F_0)(1 - \cos \theta)^5,$$

где $F(\theta)$ — коэффициент отражения света при угле падения θ ; F_0 — коэффициент отражения при нормальном угле падения ($\theta = 0$); $\cos \theta$ — косинус угла падения света. Показатель преломления F_0 или IOR (indices of refraction) вычисляется с использованием формулы:

$$F_0 = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2,$$

где n_1 — показатель преломления первой среды (например, воздуха); n_2 — показатель преломления второй среды (например, материала).

└ Уравнение Френеля-Шлика (F)

Уравнение Френеля-Шлика (F)

Schlick's approximation of the Fresnel equation

Уравнение Френеля-Шлика (упрощенное уравнение Ференеля) выглядит следующим образом:

$$F(\theta) = F_0 + (1 - F_0)(1 - \cos \theta)^5,$$

где $F(\theta)$ — коэффициент отражения света при угле падения θ ; F_0 — коэффициент отражения при нормальном угле падения ($\theta = 0$); $\cos \theta$ — косинус угла падения света.

Показатель преломления F_0 или IOR (indices of refraction) вычисляется с использованием формулы:

$$F_0 = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2,$$

где n_1 — показатель преломления первой среды (например, воздуха); n_2 — показатель преломления второй среды (например, материала).



Рис. 7: Телецкое озеро, Республика Алтай

Функция геометрии (G)

Функция геометрии статистически аппроксимирует относительную площадь поверхности, где ее микроскопические неровности перекрывают друг друга, что не дает проникать световым лучам. Функция геометрии представляет собой комбинацию приближения GGX и Шлика-Бекмана (Schlick-Beckmann), и известна как Schlick-GGX:

$$G_{SchlickGGX}(n, v, k) = \frac{n \cdot v}{(n \cdot v)(1 - k) + k}$$

Чтобы эффективно аппроксимировать геометрию, нам необходимо учитывать как направление обзора (перекрывание геометрии), так и вектор направления света (самозатенение геометрии). Мы можем учитывать оба случая с помощью метода Смита:

$$G(n, v, l, k) = G_{sub}(n, v, k)G_{sub}(n, l, k)$$

Физически-корректный рендеринг

2023-12-27

Функция геометрии (G)

Функция геометрии (G)
Функция геометрии статистически аппроксимирует относительную площадь поверхности, где ее микроскопические неровности перекрывают друг друга, что не дает проникать световым лучам. Функция геометрии представляет собой комбинацию приближения GGX и Шлика-Бекмана (Schlick-Beckmann), и известна как Schlick-GGX:
$$G_{SchlickGGX}(n, v, k) = \frac{n \cdot v}{(n \cdot v)(1 - k) + k}$$

Чтобы эффективно аппроксимировать геометрию, нам необходимо учитывать как направление обзора (перекрывание геометрии), так и вектор направления света (самозатенение геометрии). Мы можем учитывать оба случая с помощью метода Смита:
$$G(n, v, l, k) = G_{sub}(n, v, k)G_{sub}(n, l, k)$$

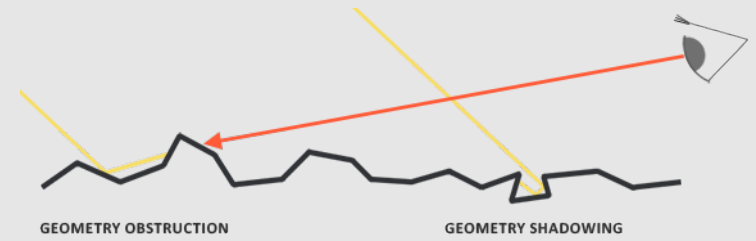


Рис. 8: Пример перекрывания и самозатенения геометрии

Здесь k является переобозначением α в зависимости от того, используем ли мы функцию геометрии для прямого освещения или освещения IBL:
 $k_{direct} = \frac{(\alpha+1)^2}{8}; k_{IBL} = \frac{\alpha^2}{2}.$

Текстурирование и материалы

В контексте PBR для определения характеристик материала используется два подхода, различающиеся следующими наборами параметров:

- 1 Color-Metal-Roughness:
Metallic (Металличность). Значение 0 обозначает неметаллический материал, а значение 1 - металлический.
Roughness (Шероховатость). Чем выше значение, тем более рассеянным и размытым будет отраженный свет.
- 2 Diffuse-Specular-Glossiness:
Specular (Зеркальность): Высокое значение соответствует более зеркальному отражению.
Glossiness (Глянцевитость): Глянцевитость определяет, насколько материал гладкий. Значение 0 соответствует абсолютно гладкой поверхности, а 1 - максимальной шероховатости.

Оба формата широко применяются в PBR-системах, и выбор между ними зависит от конкретных требований и удобства в работе с конкретным движком или программой для 3D-графики.

В целом, выбор между этими форматами зависит от конкретных требований проекта, предпочтений художников и уровня поддержки в используемом движке.

2023-12-27

Физически-корректный рендеринг

Текстурирование и материалы

Текстурирование и материалы

В контексте PBR для определения характеристик материала используется два подхода, различающиеся следующими наборами параметров:

- 1 Color-Metal-Roughness:
Metallic (Металличность): Значение 0 обозначает неметаллический материал, а значение 1 - металлический.
Roughness (Шероховатость): Чем выше значение, тем более рассеянным и размытым будет отраженный свет.
- 2 Diffuse-Specular-Glossiness:
Specular (Зеркальность): Высокое значение соответствует более зеркальному отражению.
Glossiness (Глянцевитость): Глянцевитость определяет, насколько материал гладкий. Значение 0 соответствует абсолютно гладкой поверхности, а 1 - максимальной шероховатости.

Оба формата широко применяются в PBR-системах, и выбор между ними зависит от конкретных требований и удобства в работе с конкретным движком или программой для 3D-графики.

В целом, выбор между этими форматами зависит от конкретных требований проекта, предпочтений художников и уровня поддержки в используемом движке.

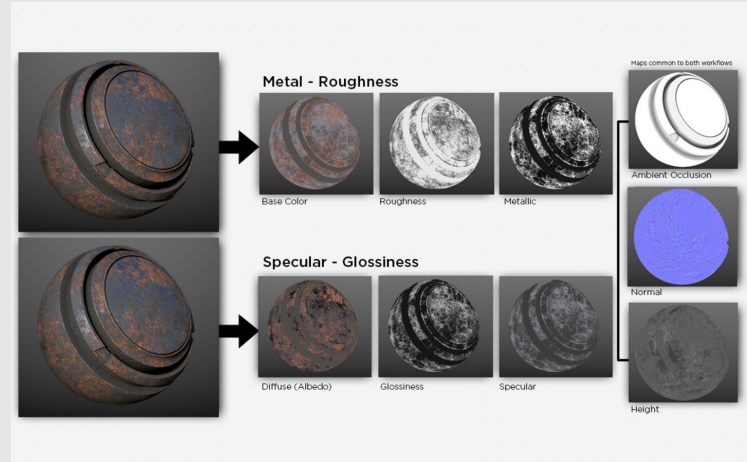


Рис. 9: Сравнение Color-Metal-Roughness и Diffuse-Specular-Glossiness

Создание материалов для PBR

Виды материалов

- 1 Albedo (цвет или базовый цвет без учета теней и отражений).
- 2 Карта нормалей (Normal Map). Используется для добавления деталей к поверхности, не увеличивая сложности ее геометрию.
- 3 Металличность (Metallic).
- 4 Шероховатость (Roughness).
- 5 Карта подсветки (Ambient Occlusion Map). Используется для задания затененных областей.
- 6 Карта окружающей среды (Environment Map). Используется или текстура, отображающая окружающий мир, или использование динамической карты окружения.
- 7 Карта высот (Height Map). Используется для создания эффекта рельефа (высоты) или выпуклости на поверхности материала.
- 8 Карта микроповерхностей (Microfacet Map): Обычно используется вместе с GGX-моделью для распределения микроповерхностей.
- 9 Функции отражения и преломления (Fresnel): Определяют, как свет взаимодействует с материалом при отражении и преломлении, могут использоваться в модели Френеля в уравнении отражения.

Физически-корректный рендеринг

Создание материалов для PBR

Создание материалов для PBR

Виды материалов:

- 1 Albedo (цвет или базовый цвет без учета теней и отражений).
- 2 Карта нормалей (Normal Map). Используется для добавления деталей к поверхности, не увеличивая сложности ее геометрию.
- 3 Металличность (Metallic).
- 4 Шероховатость (Roughness).
- 5 Карта подсветки (Ambient Occlusion Map). Используется для задания затененных областей.
- 6 Карта окружающей среды (Environment Map). Используется или текстура, отображающая окружающий мир, или использование динамической карты окружения.
- 7 Карта высот (Height Map). Используется для создания эффекта рельефа (высоты) или выпуклости на поверхности материала.
- 8 Карта микроповерхностей (Microfacet Map): Обычно используется вместе с GGX-моделью для распределения микроповерхностей.
- 9 Функции отражения и преломления (Fresnel): Определяют, как свет взаимодействует с материалом при отражении и преломлении, могут использоваться в модели Френеля в уравнении отражения.

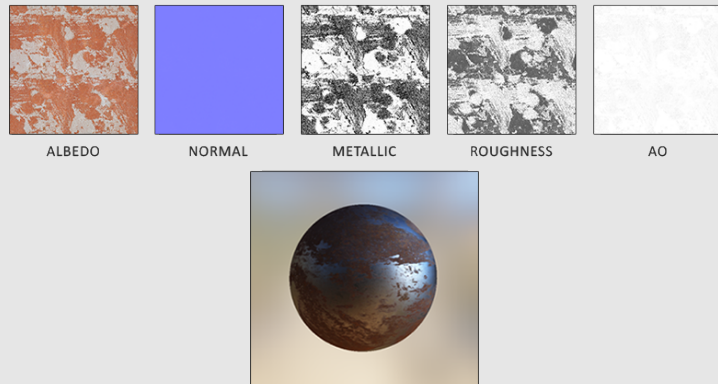


Рис. 10: Примеры текстур

Литература

- 1 Чистяков А.В. Особенности алгоритмов физически корректного рендеринга для интерактивной архитектурной визуализации
- 2 Technical – GGX vs Beckham
- 3 Самые чистые озера России
- 4 Fresnel Reflection and Fresnel Reflection Modes Explained
- 5 PBR: Физически корректный рендеринг — сравнение Metallic Roughness и Specular Glossiness
- 6 Кузнецов Д. Текстурирование. Часть 3. PBR и материалы

Заключение