

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ВАСИЛЯ СТУСА

РУДЕНОК АРТЕМ ОЛЕКСАНДРОВИЧ (_____)

Допускається до захисту:
в. о. завідувача кафедри
Прикладної математики,
_____ Трофименко О. Д.
«_____» _____ 2022 р.

ВИКОРИСТАННЯ PHYSICALLY BASED RENDERING (PBR) В

ЗАДАЧАХ КОМП'ЮТЕРНОЇ ГРАФІКИ

Спеціальність 113 Прикладна математика

Кваліфікаційна (бакалаврська) робота

Керівник:

Данильчук О. М., доцент кафедри

прикладної математики

к.пед.н.

(підпис)

Оцінка: _____ / _____ / _____
(бали за шкалою ЄКТС/за національною шкалою)

Голова ЕК: _____
(підпис)

Вінниця - 2022

АННОТАЦІЯ

Руденок А. О. Використання Physically based rendering (PBR) в задачах комп'ютерної графіки. Спеціальність 113 «Прикладна математика». Донецький національний університет імені Василя Стуса, Вінниця, 2022.

У кваліфікаційній (бакалаврській) роботі досліджені сучасні моделі шейдингу, які використовуються в комп'ютерній графіці, зокрема фізично-коректний рендеринг.

Ключові слова: фізично-коректний рендеринг, фізика світла, світло, модель рендерингу.

30 с., 24 рис., 11 посилань.

ABSTRACT

Rudenok A. Using Physically based rendering (PBR) in computer graphics problem. Specialty 113 «Applied mathematics», Vasyl' Stus Donetsk National University, Vinnitsia, 2022.

In the qualification (bachelor's) work, modern shading models used in computer graphics, in particular, physically-based rendering were investigated.

Keywords: physically-based rendering, physics of light, light, rendering model.

ЗМІСТ

Вступ	4
РОЗДІЛ 1. ФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ СВІТЛА	5
1.1 Взаємодія світла та різноманітних матеріалів.....	5
1.2 Розсіювання світла	7
РОЗДІЛ 2. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ.....	11
2.1 Рівняння відбиття променів світла	11
2.2 BRDF функції.....	11
2.3 Модель Кука-Торренса.....	12
2.4 Дифузний BRDF Ламберта.....	18
РОЗДІЛ 3. РЕАЛІЗАЦІЯ PBR	20
3.1 Гама і високо-динамічний діапазон.....	20
3.2 Розв'язання рівняння відбиття.....	21
3.3 Порівняння з моделлю Блінна-Фонга	26
ВИСНОВКИ.....	28
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	29

ВСТУП

Актуальність теми. Фізично-коректний рендеринг(physically-based rendering або PBR) це набір шейдингових моделей, що створені для того, щоб досягти найбільшого рівня реалізму та якості відображення об'єктів у комп'ютерній графіці. PBR рівняння шейдингу впливають із законів взаємодії світла та матеріалів.

Мета роботи. Дослідження різних фізичних властивостей світла, математичних моделей побудованих на їхній базі та прикладне використання для зображення об'єктів у комп'ютерній графіці.

Завдання дослідження. Отримати реалізацію деяких математичних моделей шейдингу та рівняння рендеренгу.

Об'єкт дослідження. Реалізації математичних моделей для шейдингу.

Предмет дослідження.

Теоретичне та/або практичне значення одержаних результатів. Отримані в результаті роботи реалізації математичних моделей можуть бути успішно застосованими для вирішення задач у комп'ютерній графіці і т.д.

Структура кваліфікаційної (бакалаврської) роботи. Основна частина роботи складається з трьох частин. В першій описується закони фізики, що лежать в основі фізично-коректних моделей шейдингу. Друга частина описує математичні моделі для шейдингу. У третьому розділі наведено приклад реалізації математичних моделей, які розглядалися в попередньому розділі; наведені деякі можливі рішення та наближення рівняння рендеренгу. В роботі присутні 24 рисунки, 11 посилань.

РОЗДІЛ 1

ФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ СВІТЛА

1.1 Взаємодія світла та різноманітних матеріалів

Світло це електромагнітна поперечна хвиля, тому його взаємодія з різними матеріалами визначається електромагнітними властивостями цього матеріалу. **Показником заломлення** називають фізичну властивість, яка визначає взаємодію між світлом та матеріалом. Цей показник є комплексним числом, дійсна частина якого дорівнює швидкості світла в даному матеріалі, а комплексна частина кількості світла, яка поглинається під час його поширення крізь матеріал.

Найпростіша форма взаємодії світла з матеріалом – світло, що проходить через однорідне середовище. Такі середовища характеризуються тим, що мають однаковий показник заломлення по всьому своєму об'єму. Якщо комплексна частина показника мала, матеріал буде виглядати прозорим, а якщо велика – середовище буде поглинати хвилі світла деякої довжини, надаючи матеріалу їх колір (рисунок 1.1). Такий тип взаємодії світла з матеріалом називається **поглинанням**.



Рисунок 1.1 - Поглинання світла у прозорих середовищах

У неоднорідних середовищах показник заломлення може різко змінюватися. У цьому випадку світло, потрапляючи в середовище, **розсіюється** у всіх можливих вихідних напрямках. Розподіл розсіяного світла часто нерівномірний, але має скупчення у певних напрямках, залежно від властивостей поверхні. Варто зазначити, що всі середовища розсіюють світло певною мірою на досить великі відстані (рисунок 1.2)



Рисунок 1.2 - Розсіювання світла у повітрі

Випромінювання світла(емісія) – третій тип взаємодії світла з матеріалом.

Випромінюючі матеріали перетворюють інші форми енергії у світло(наприклад вольфрамова лампа) (Рисунок 1.3). Випромінювальні матеріали не особливо актуальні для шейдингу, оскільки джерела світла часто є математично змодельованими.

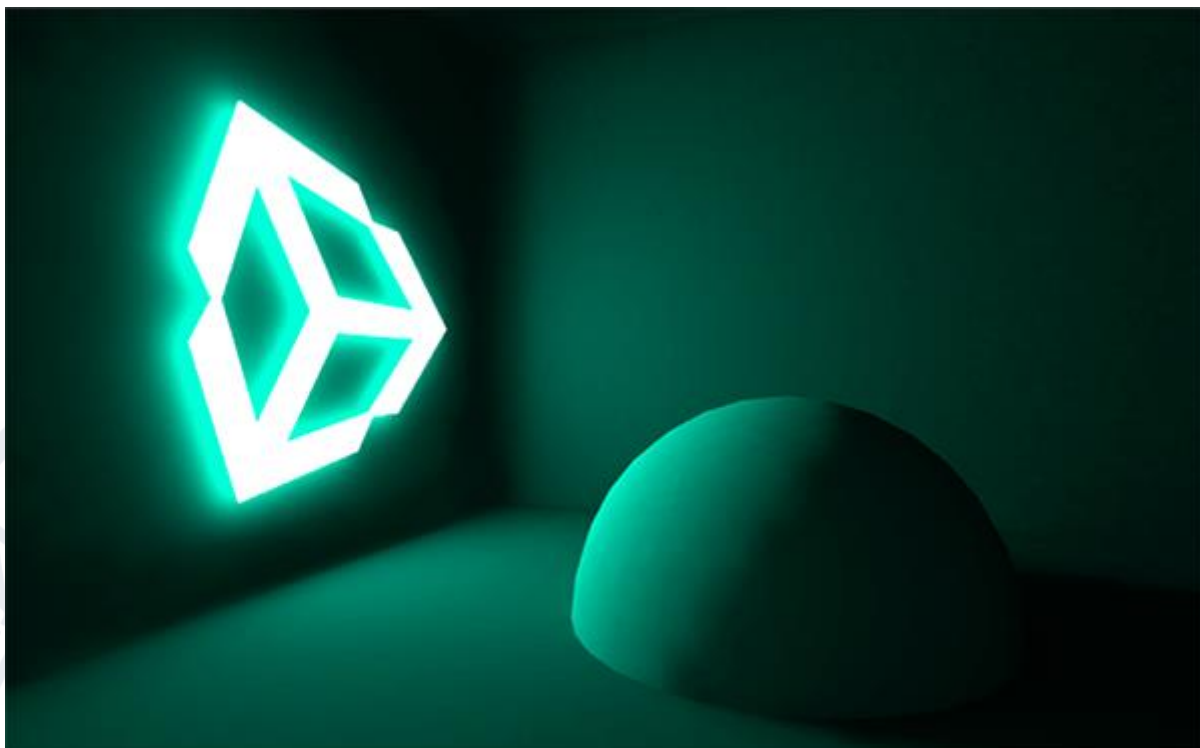


Рисунок 1.3 - Випромінюючі матеріали у UnityEngine

2.2 Розсіювання світла

Розсіювання на плоскій поверхні. РВ моделі шейдингу здебільшого не враховують випромінювання та поглинання, навідміну від розсіювання світла. У більшості випадків поведінка світла при розсіюванні дуже складна і її неможливо розв'язати аналітично. На щастя, для цілей шейдингу єдиним важливим випадком є розсіювання на нескінченній плоскій поверхні. Це тому, що навіть мікроскопічні нерівності на поверхні матеріалу можна розглядати як нескінченні та плоскі відносно довжини хвилі світла. При цьому світло розсіюється не у всіх можливих напрямках, а кожен промінь ділиться рівно на два: відбитий та заломлений (рисунок 1.4).

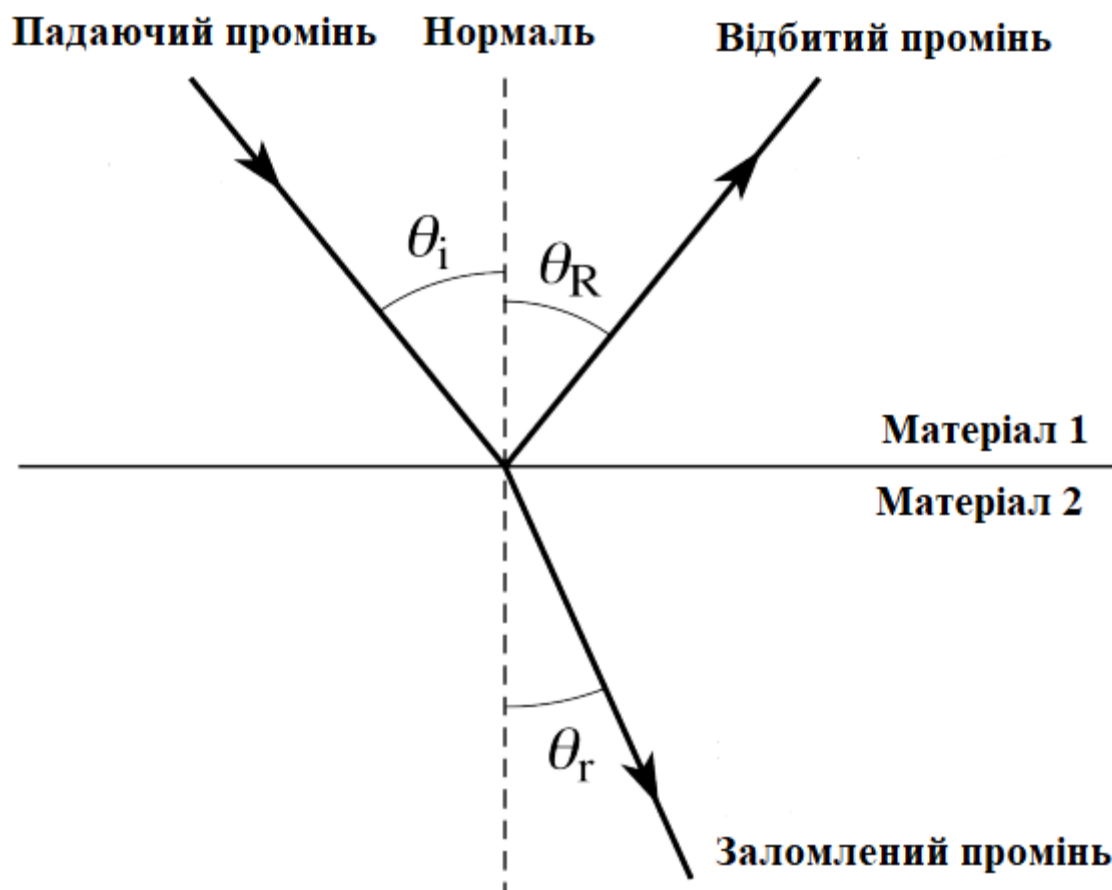


Рисунок 1.4 - Розсіювання світла на плоскій поверхні

Кут між відбитим променем та нормаллю θ_R завжди дорівнює куту падіння світлового променя θ_i . Кут заломлення θ_r визначається законом Снеліуса:

$$\sin \theta_r = \frac{n_1 \sin \theta_i}{n_2} \quad (1.1)$$

де n_1 і n_2 - показники заломлення матеріалу 1 і матеріалу 2 відповідно. При цьому енергія між цими променями зберігається; повна енергія відбитого і заломленого променів дорівнює енергії падаючого променя (частина енергії може витрачатися на інші види випромінювання, але це актуально лише для моделей глобального освітлення, де світлові промені відбиваються багато разів). Відношення енергії між заломленими та відбитими променями визначається формулами Френеля, які будуть розглянуті далі.

Відбиття. У реальному світі не так багато поверхонь відполірованих до дзеркальної гладкості. Більшість з них має мікроскопічні нерівності, які набагато менші за піксель, але набагато більші ніж довжина хвилі світла. Такі поверхні моделюються як великий набір мікроскопічних, оптично плоских поверхонь. Кожна з цих крихітних поверхонь відбиває світло на різний кут (рисунок 1.5).

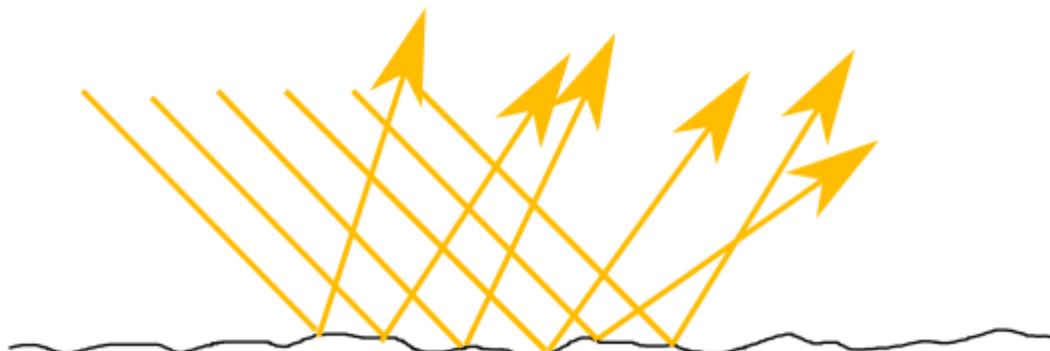


Рисунок 1.5 - Відбиття світла від нерівної поверхні

У RBR моделях ця властивість поверхні параметризована *шорсткістю*. Якщо поверхня є оптично пласкою, значення цього параметра дорівнює 0, тоді як значення 1 відповідає максимальній шорсткості (у цьому випадку відбиті промені розподіляються рівномірно в усіх напрямках).

Заломлення. Те, що відбувається з заломленим променем, визначається властивостями матеріалу та показником поглинання світла. Метали мають дуже високі показники поглинання, тому заломлені промені майже не виходять з матеріалу. З іншого боку, такі матеріали, як скло, мають дуже низький показник поглинання, тому заломлене світло здатне проходити через весь об'єм об'єкта, не поглинаючись.

Між цими двома крайнощами знаходяться *діелектричні* матеріали. Діелектрики поглинають частину світла, але їх склад не дозволяє світлу безперебійно проходити крізь матеріал, як у склі. Замість цього світло розсіюється на частинках під поверхнею об'єкта, і деяка кількість світла знову

випромінюється з під тієї ж поверхні. Це явище називається *підповерхневим розсіюванням* або *дифузією* (рисунок 1.6).

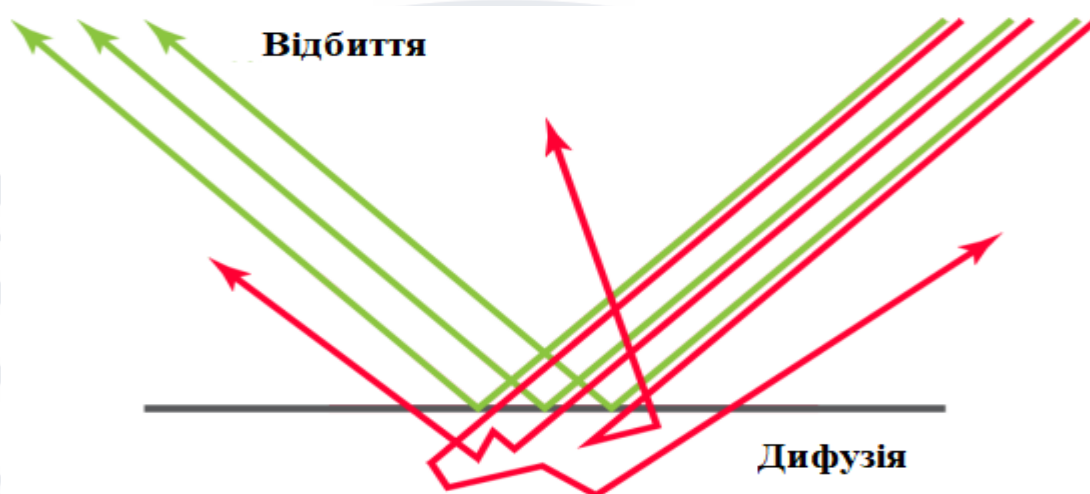


Рисунок 1.6 - Відбиття та дифузія променів світла

Моделювання дифузії у шейдингу залежить від масштабу розсіювання під поверхнею. Якщо відстань між точками входу та виходу у поверхні для всіх променів менша ніж розмір пікселя, вплив дифузії можна обчислити локально. В іншому випадку слід використовувати спеціальні нелокальні методи візуалізації підповерхневого розсіювання [1].

Прикладами таких матеріалів є шкіра людини, віск та будь-який досить тонкий діелектрик (рисунок 1.7).



Рисунок 1.7 - Підповерхнєве розсіювання світла на шкірі людини

РОЗДІЛ 2

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ

2.1 Рівняння відбиття променів світла

Основною радіометричною величиною, яка використовується для шейдингу, є *яскравість* (символ L). Хоча *яскравість* є спектральною величиною, для цілей візуалізації вона найчастіше зберігається як триплет RGB (red, green, blue). Вихідний показник L в певній точці (L_o) є функцією вхідні яскравості в цій точці (L_i). Для опису цього найчастіше використовується рівняння відбиття променів:

$$L_o(\omega_o) = \int_{\Omega} f(\omega_o, \omega_i) \otimes L_i(\omega_i) (\underline{n \cdot \omega_i}) d\omega_i \quad (2.1)$$

Вихідна яскравість задається для вихідного напрямку ω_o . Для локального шейдингу ω_o - одиничний вектор, що вказує від точки шейдингу на позицію спостерігача, ω_i – вектор світла l , спрямований із точки шейдингу до джерела світла. Областю визначення інтеграла Ω є півкуля, визначена за допомогою нормалі поверхні n .

Як видно з рівняння, вихідна яскравість пропорційна сумі вхідної з кожного напрямку півкулі, зваженою за кутом падіння між вхідним променем і нормаллю поверхні. Вхідна яскравість також зважується через *bidirectional reflectance distribution function* - $f(\omega_o, \omega_i)$ (BRDF). Ця функція приймає вхідний і вихідний промінь, і показує наскільки вхідний промінь впливає на кінцеву вихідну яскравість. Відмінності між моделями PBR полягають у виборі та конструкції BRDF.

2.2 BRDF функції

BRDF можна інтерпретувати як визначення розподілу розсіяного та відбитого світла для заданого вхідного напрямку світла і параметрується

чотирма кутами. Для того щоб BRDF відповідав законам фізики, має виконуватися наступне:

$$f(\omega_o, \omega_i) = f(\omega_i, \omega_o) \quad (2.2)$$

та повинна зберігатись енергія:

$$\forall \omega_i, \int_{\Omega} f(\omega_o, \omega_i) (\underline{n \cdot \omega_i}) d\omega_o \leq 1 \quad (2.3)$$

Інтеграл від BRDF, помножений на косинусний коефіцієнт для всіх можливих вихідних напрямків ω_o не повинен перевищувати одиницю для всіх можливих вхідних напрямків ω_i . Це означає, що кількість вихідного світла не повинна перевищувати кількість вхідного світла.

Як видно на рисунку 1.6, відбиття та підповерхневе розсіювання — це дуже різні явища, і часто кожне з них моделюється окремим BRDF. Термін, що описує підповерхневе розсіювання називається *diffuse*, а термін, що описує відбиття називається *specular*. Два найпоширеніших BRDF які використовуються для шейдингу у реальному часі — це *BRDF Ламберта* для *diffuse* та модель *Кука-Торренса* для *specular*.

2.3. Модель Кука-Торренса

Модель Кука-Торранса [2] була створена у 1981 році і з тих пір широко використовується в офлайн рендерингу фільмів. В останні роки графічні процесори стали достатньо потужними, щоб запускати модель Кука-Торранса в режимі реального часу, що викликало широке застосування PBR для рендерингу відеоігор.

Теорія мікрограней. Модель Кука-Торранса заснована на теорії *мікрограней* [3]. У цій теорії поверхні розглядаються як сукупність крихітних оптично плоских поверхонь (мікрограней). Кожна з яких має нормаль, m . Крім того, під час шейдингу точці поверхні задається вектор вхідного світла l і

вихідний напрямок v . Необхідно обчислити лише частину світла, що йде з напрямку l , та що відбивається в напрямку v . Лише мікрограні, нормаль t до поверхні яких дорівнює вектору h між l і v може впливати на відбиття променя.

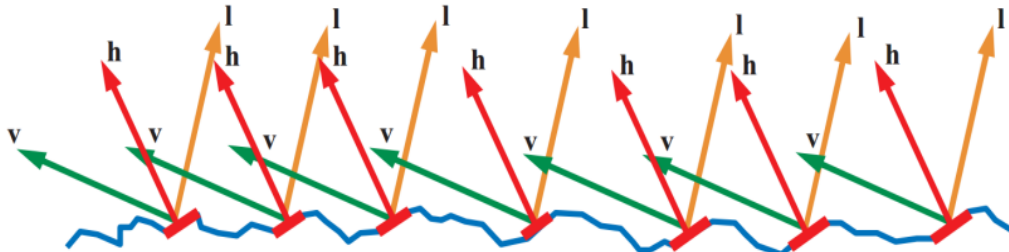


Рисунок 2.1 - Лише мікрограні для яких $t = h$ можуть впливати на відбиття світла

Світло, що надходить на мікрогрань, і світло, що виходить з мікрограні може бути заблоковане деформаціями на поверхні. Ці явища називають затіненням і маскуванням відповідно. Затінені та замасковані мікрограні не впливають на відбиття світла. Усі мікрограні, які впливають на відбиття, називають *активними* мікрогранями. Модель Кука-Торранса випливає з цих припущень і має такий вигляд:

$$f_{Cook-Torrance}(v, l) = \frac{F(l, h)G(l, v, h)D(h)}{4(n \cdot l)(n \cdot v)} \quad (2.4)$$

У рівнянні $F(l, h)$ показник відбиття Френеля, $G(l, v, h)$ показник затінення та маскування, $D(h)$ — це показник нормального розподілу, а $4(n \cdot l)(n \cdot v)$ — це нормалізуючий фактор.

Формули Френеля. Рівняння Френеля описують поведінку світла при проходженні крізь матеріали з різними показниками заломлення. Для шейдингу рівняння Френеля обчислює відсоток відбитого світла як функція кута падіння світла та показника заломлення матеріалу. Під кутом 0° кожен матеріал відбиває певну кількість світла F_0 , що є його базовою відбивною

здатністю. Для кутів приблизно до 45° коефіцієнт відбиття залишається відносно постійним, а потім швидко збільшується до 100% коли кут наближується до 90° . Цей ефект можна побачити на рисунку 2.2; пластикова кулька не віддзеркалює навколишнє середовище біля її центральної частини, але віддзеркалює біля країв.



Рисунок 2.2 - Ефект Френеля можна побачити на краях кулі

Наближення, яке використовується для моделювання цієї поведінки, є функцією Шліка:

$$F_{Schlick}(\mathbf{F}_0, \theta) = \mathbf{F}_0 + (1 - \mathbf{F}_0)(1 - \cos(\theta))^5 \quad (2.5)$$

де у випадку дзеркальних BRDF і мікрограней кут падіння дорівнює:

$$\cos(\theta) = \mathbf{l} \cdot \mathbf{h}$$

$$F_{Schlick}(\mathbf{F}_0, \mathbf{l}, \mathbf{h}) = \mathbf{F}_0 + (1 - \mathbf{F}_0)(1 - (\mathbf{l} \cdot \mathbf{h})^5) \quad (2.6)$$

Для деяких матеріалів коефіцієнт відбиття може бути функцією довжини хвилі вхідного світла. Це явище надає кольору таким металам, як золото та мідь (рисунок 2.3). В PBR це моделюється якщо зробити \mathbf{F}_0 триплетом RGB.

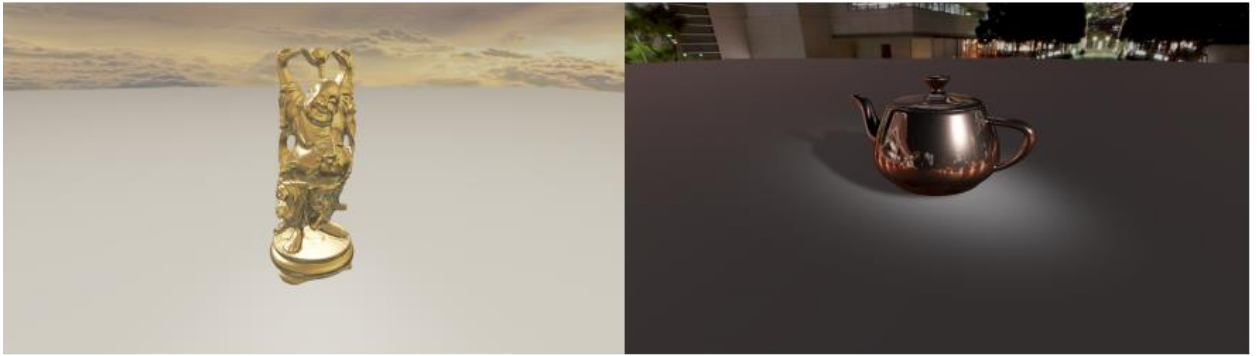


Рисунок 2.3 - Золото (ліворуч) і мідь (праворуч) мають кольорові віддзеркалення

Нормальне розподілення. Нормальний розподіл, є скалярною функцією, яка відображає відсоток нормалей мікрограней, орієнтованих у напрямку \mathbf{h} . Цей відсоток, як правило, вище, якщо \mathbf{h} ближче до нормалі поверхні \mathbf{n} . Моделі для функції нормального розподілу зазвичай параметризуються шорсткістю поверхні α , яка має значення між 0 і 1. Нормальний розподіл повинен містити коефіцієнт нормалізації, щоб зберегти енергію, яка є похідною від наступного обмеження [4]:

$$\int_{\Omega} D(\mathbf{h})(\mathbf{n} \cdot \mathbf{h}) d\omega_i = 1 \quad (2.7)$$

В ізотропному випадку всі моделі нормального розподілу мають коефіцієнт нормалізації 1. Найбільш вживана модель нормального розподілу GGX [5]:

$$D_{GGX}(\mathbf{h}, \alpha) = \frac{\alpha^2}{\pi((\mathbf{n} \cdot \mathbf{h})^2(\alpha^2 - 1) + 1)^2} \quad (2.8)$$

Ще одна видатна модель – нормальний розподіл Бекмана:

$$D_{Beckmann}(\mathbf{h}, \alpha) = \frac{1}{\pi \alpha^2 (\mathbf{n} \cdot \mathbf{h})^4} \exp \left(\frac{(\mathbf{n} \cdot \mathbf{h})^2 - 1}{\alpha^2 (\mathbf{n} \cdot \mathbf{h})^2} \right) \quad (2.9)$$

Вплив параметра шорсткості на шейдинг можна побачити на рисунку 2.4:

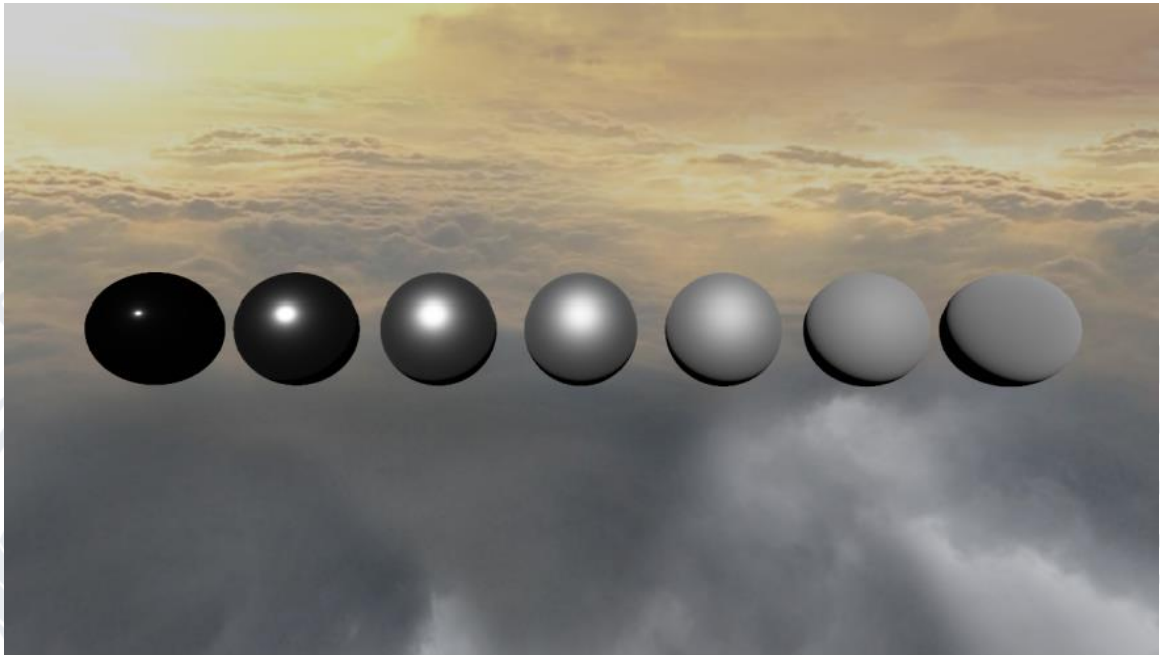


Рисунок 2.4 - Шорсткість від 0 (зліва) до 1 (справа)

Геометричний закон. Геометричний, або закон маскування тіней, є функцією, яка виводить ймовірність що мікрограні із заданою нормаллю h зможуть відбивати світло з вхідного у вихідний напрямок. Іншими словами, ймовірність того, що мікрограні не замасковані або затінені іншими мікрогранями. Як і у випадку з нормальним розподілом, існує багато теоретичних моделей для цієї функції [6]. Найвідомішою моделлю є функція Сміта:

$$G_{Smith}(l, v, h) = G_1(l)G_1(v) \quad (2.10)$$

Де G_1 може бути якоюсь іншою моделлю, наприклад GGX:

$$G_{GGX}(e) = \frac{2(n \cdot e)}{(n \cdot e) + \sqrt{\alpha^2 + (1 + \alpha^2)(n \cdot e)^2}} \quad (2.11)$$

Або моделлю Бекмана:

$$c = \frac{\mathbf{n} \cdot \mathbf{e}}{\alpha \sqrt{1 - (\mathbf{n} \cdot \mathbf{e})^2}}$$

$$G_{Beckmann}(\mathbf{e}) = \begin{cases} \frac{3.535c + 2.181c^2}{1 + 2.276c + 2.577c^2} & \text{if } c < 1.6 \\ 1 & \text{if } c \geq 1.6 \end{cases} \quad (2.12)$$

На цьому аналіз дзеркального BRDF Кука-Торранса завершено. Різницю між законами Бекмана та GGX можна побачити на рисунках 2.5, 2.6 та 2.7:

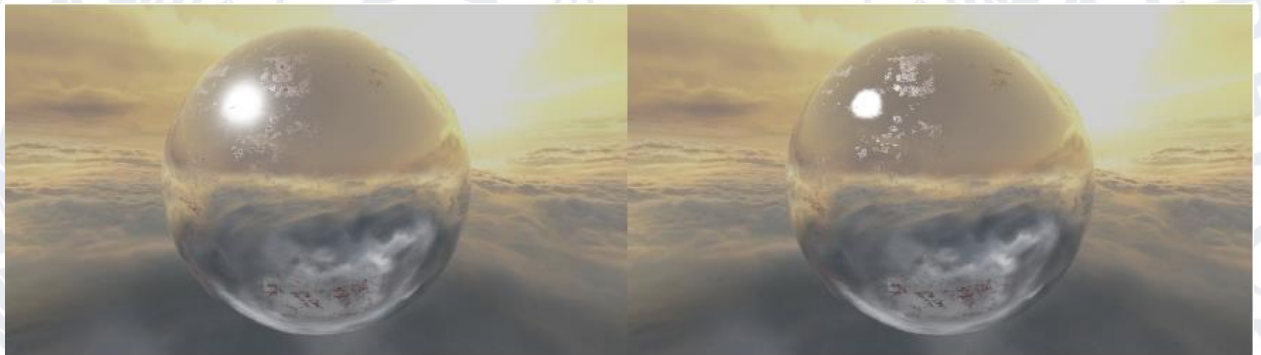


Рисунок 2.5 - GGX (ліворуч) і Бекман (праворуч) на іржавому сталевому матеріалі



Рисунок 2.6 - закон GGX на залізному матеріалі



Рисунок 2.7 - закон Бекмана на залізному матеріалі

2.3. Дифузний BRDF Ламберта

Під час візуалізації в реальному часі найчастіше використовується дифузний BRDF Ламберта:

$$f_{Lambert}(\mathbf{v}, \mathbf{l}) = \frac{c_{diff}}{\pi} \quad (2.13)$$

Цей BRDF фактично є константою, тобто моделює рівномірну дифузію; вхідні промені світла розсіюються в усіх можливих напрямках з однаковою ймовірністю. c_{diff} – частина світла, яка буде розсіюватися з поверхні. Цей параметр часто називають альбедо або дифузним кольором, і він близько відповідає тому, що зазвичай називають кольором матеріалу.

BRDF, що використовується в рівнянні відбиття, складається з дзеркального та дифузного BRDF, але вони повинні бути змішані таким чином, щоб не порушуватися закон збереження енергії. Цього можна досягти кількома способами, найчастіше за допомогою лінійної інтерполяції між рівняннями BRDF з коефіцієнтом, пропорційним коефіцієнту відбиття об'єкту у заданій

точці шейдингу. Коефіцієнтом, що задовольняє цій властивості, є дифузний показник Френеля:

$$\cos(\theta) = \mathbf{v} \cdot \mathbf{n}$$

$$F_{diff}(\mathbf{F}_0, \mathbf{v}, \mathbf{n}) = \mathbf{F}_0 + (1 - \mathbf{F}_0)(1 - (\mathbf{v} \cdot \mathbf{n})^5) \quad (2.14)$$

Повний BRDF:

$$f(\mathbf{v}, \mathbf{l}) = f_{Lambert}(\mathbf{v}, \mathbf{l})(1 - F_{diff}) + f_{Cook-Torrance}(\mathbf{v}, \mathbf{l})F_{diff} \quad (2.15)$$

На рисунку 2.8 значення F_0 змінюється від 0 - ліворуч до 1 – праворуч з незмінними значеннями для дифузного кольору та шорсткості. Можна побачити, як змінюється зовнішній вигляд кулі з діелектричного на металевий.

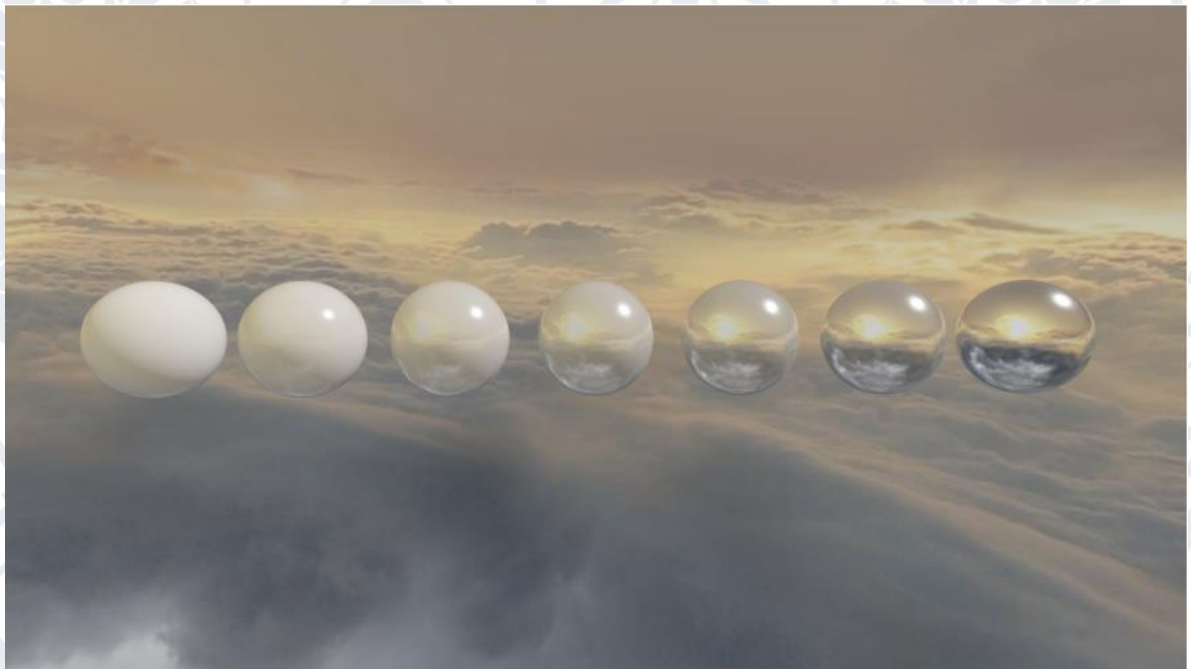


Рисунок 2.8 - Зміна F_0 з постійними c_{diff}

РОЗДІЛ 3

РЕАЛІЗАЦІЯ PBR

4.1. Гама і високо-динамічний діапазон

Перш ніж ознайомитися з деталями реалізації, важливо звернути увагу на гамма-корекцію та високо-динамічний діапазон (high dynamic range, далі HDR).

Гама-корекція. Текстури, що містять параметри кольору (дифузні та дзеркальні текстури), кодуються в нелінійному просторі sRGB, оскільки це більше підходить для перегляду людськими очима [7]. Ці текстури необхідно лінеаризувати перед введенням їх у рівняння шейдингу, інакше результати будуть невірними. Аналогічно, остаточні значення кольору повинні бути виправлені гамма-корекцією перед виведенням їх на монітор, щоб користувач міг їх побачити. Ефекти гамма-корекції можна побачити на рисунку 3.1, де на лівому зображенні межа між освітленою та неосвітленою областю занадто м'яка.

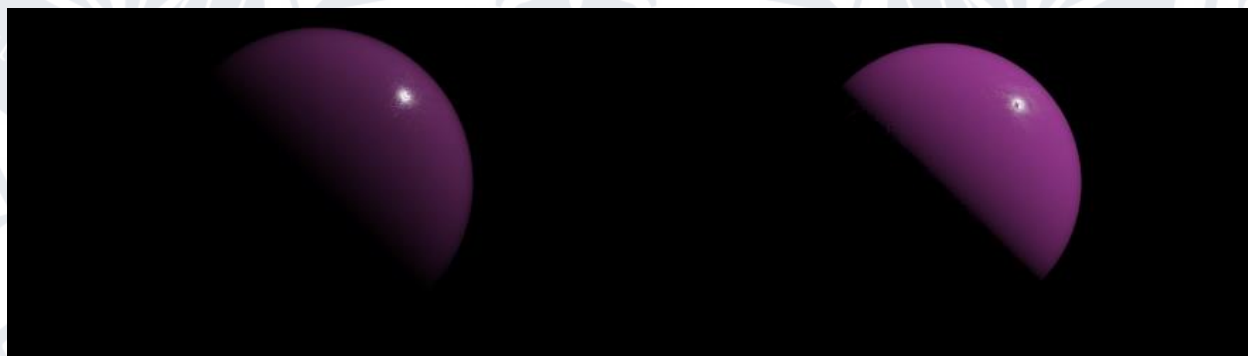


Рисунок 3.1 - Неправильна гамма (зліва) та правильна (справа)

Лінеаризація здійснюється шляхом підвищення значень кольору до ступеня гамми або підвищення їх до величини, зворотної гамми, залежно від гамма-корекції.

Високо-динамічний діапазон (HDR). У сонячний день інтенсивність світла, що йде від Сонця, в тисячі разів перевищує інтенсивність будь-якого іншого джерела світла. Цей широкий діапазон інтенсивності неможливо

змодельовати, використовуючи стандартні 8-бітові буфери накопичення світла на канал. Цю проблему можна вирішити, використовуючи великий динамічний діапазон. Замість 8 біт на канал використовується 16-розрядний (або більше) буфер накопичення з плаваючою комою. На відміну від 8-розрядних буферів, буфери з плаваючою комою дозволяють накопиченому значенню бути більшим за 1. Після етапу накопичення світла необмежені значення в буфері мають бути переставлені на діапазон $[0, 1]$ для виведення на монітор. Функції, які використовуються для цього, називають тональними відображеннями, прикладом яких є:

$$T(c_{hdr}) = 1 - \exp(-c_{hdr} * exposure) \quad (3.1)$$

Параметр експозиції аналогічний експозиції у фотографії, тобто кількість світла на одиницю площі. Цей параметр можна отримати від середньої яскравості екрана або залишити художникам для налаштування. Ефекти HDR та тонального відображення можна побачити на рисунку 3.2.

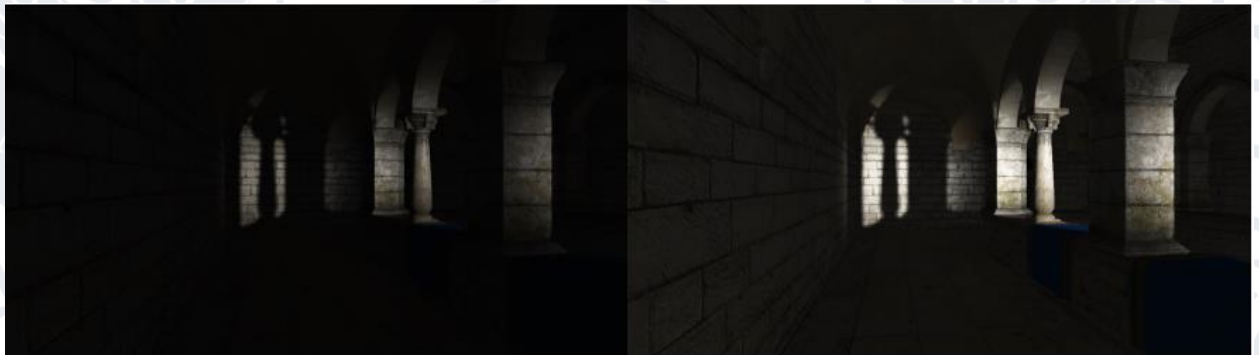


Рисунок 3.2 - HDR з низькою експозицією (зліва) та з високою (справа)

3.2 Розв'язання рівняння відбиття

Точкові джерела світла. Щоб повністю вирішити рівняння відбиття, світло, що надходить з усіх можливих напрямків навколо нормально-визначеної півкулі, має бути інтегровано, що, очевидно, неможливо в реальному часі. Рівняння можна розв'язати для точкових джерел світла, таких

як точкове, спрямоване світло. При освітленні точковим світлом кожна точка, яка затінюється, отримує світло з одного напрямку l_c :

$$L_i(l) = 0, \forall l \neq l_c \quad (3.2)$$

Позбавляємося інтегралу застосуванням 4.1 на 3.1:

$$L_o(v) = f(v, l_c) \otimes L_i(l_c)(\underline{n \cdot l_c}) \quad (3.3)$$

Точкові джерела світла параметризовані через c_{light} , колір, який мала б біла ламбертівська поверхня при освітленні світлом із напрямку, перпендикулярного до нормалі поверхні.

$$l_c = n$$

$$c_{light} = \int_{\Omega} f_{Lambert}(v, \omega_i) \otimes L_i(\omega_i)(\underline{n \cdot \omega_i}) d\omega_i \quad (3.4)$$

Підставимо (2.13) в (3.4) з $c_{diff} = 1$:

$$c_{light} = \frac{1}{\pi} \int_{\Omega} L_i(\omega_i)(\underline{n \cdot \omega_i}) d\omega_i \quad (3.5)$$

Застосуємо (3.2) та (3.4) у (3.5):

$$c_{light} = \frac{1}{\pi} L_i(l_c)$$

$$L_i(l_c) = \pi c_{light} \quad (3.6)$$

Остаточне рівняння точкового шейдингу світла отримаємо підставивши (3.6) у (3.3)

$$L_o(\mathbf{v}) = \pi f(\mathbf{v}, \mathbf{l}_c) \otimes c_{light}(\mathbf{n} \cdot \mathbf{l}_c) \quad (3.7)$$

Наведене вище рівняння необхідно обчислити для кожного точкового джерела світла на сцені, а результати підсумувати. Для моделювання затухання світла, c_{light} можна перетворити на функцію відстані до джерела світла:

$$c_{light}(d) = \frac{c_{light_0}}{a_0 d^2 + a_1 d + a_2} \quad (3.8)$$

Непряме освітлення. Освітлення сцени лише за допомогою точкових джерел світла може бути проблематичним, оскільки неосвітлені ділянки залишаться повністю темними. Аналогічно, сильно дзеркальні об'єкти майже не розсіюють світло, коли нормаль їх поверхні знаходиться під великим кутом до вектора світла. Ці проблеми можна побачити на рисунку 3.3.



Рисунок 3.3 - Дуже дзеркальний матеріал, освітлений лише одним точковим джерелом світла

Можливі рішення цієї проблеми включають навколишнє та середовищне освітлення. Навколишнє освітлення полягає в додаванні постійного значення

до результатів шейдингу, щоб зробити сцену яскравішою, але такий підхід не дає привабливих результатів[8].

З іншого боку, середовищні методи освітлення можуть дати хороші результати. Кубічну текстуру навколишнього середовища (skybox) можна розглядати як текстуру випромінювання. Кожен піксель текстури випромінювання представляє світло, яке знаходиться нескінченно далеко і чий колір (c_{light}) є кольором пікселя. Застосовуючи ці аргументи та BRDF Ламберта, рівняння відбиття стає функцією лише нормалі поверхні:

$$L_o(\mathbf{n}) = I(\mathbf{n})c_{diff}$$

$$I(\mathbf{n}) = \frac{1}{\pi} \int_{\Omega} L_i(\omega_i)(\mathbf{n} \cdot \omega_i) d\omega_i \quad (3.9)$$

$I(\mathbf{n})$ – освітленість, сума всього вхідного світла, що потрапляє на півсферу, визначену \mathbf{n} . Це значення може бути попередньо обчислене для різних значень \mathbf{n} . Результати попереднього обчислення зберігаються в текстурі опромінення, кубічній текстурі, яка має значення $I(t)$ у текстурних координатах t .

Щоб обчислити $I(\mathbf{n})$, рівняння (3.9) зображується у полярних координатах:

$$I(\mathbf{n}) = \frac{1}{\pi} \int_{\phi} \int_{\theta} L_i(\phi_i, \theta_i) \cos(\theta_i) \sin(\theta_i) d\theta_i d\phi_i \quad (3.10)$$

Інтеграли розв'язуються застосуванням методу Монте-Карло до кожного з них:

$$I(\mathbf{n}) = \frac{1}{\pi} \frac{2\pi}{N_1} \frac{\pi}{2N_2} \sum_{N_1} \sum_{N_2} L_i(\phi_i, \theta_i) \cos(\theta_i) \sin(\theta_i) \quad (3.11)$$

$$I(\mathbf{n}) = \frac{\pi}{N_1 N_2} \sum_{N_1}^{N_1} \sum_{N_2}^{N_2} L_i(\phi_i, \theta_i) \cos(\theta_i) \sin(\theta_i) \quad (3.12)$$

Де N_1 і N_2 – кількість вибірок для кожного кута. Вхідне випромінювання $L_i(\phi_i, \theta_i)$ є зразком текстури випромінювання в текстурних координатах \mathbf{t} , де:

$$\mathbf{t} = (\sin(\theta) \cos(\phi), \sin(\theta) \cos(\phi), \cos(\theta)) \quad (3.13)$$

Ефекти відображення опромінення можна побачити на рисунку 3.4, де можна побачити неосвітлені області, які отримують освітлення з текстури навколишнього середовища.



Рисунок 3.4 - Один і той самий об'єкт у різних середовищах

Неможливо попередньо обчислити освітлення на основі дзеркального зображення, оскільки воно залежить від напрямку погляду [10] [11]. У цьому випадку текстуру випромінювання слід розраховувати в реальному часі, а дзеркальний BRDF слід обчислювати для кожного зразка. Однак це неможливо в програмах реального часу. Часто використовуюваною альтернативою є обчислення класичного відображення середовища для дзеркальних об'єктів і розмивання відображення залежно від шорсткості матеріалу. Розмиття можна досягти шляхом обчислення MIP текстури середовища, а потім просто вибору рівня MIP на основі шорсткості пікселя під час розрахунку текстури середовища. Результати роботи цього методу можна побачити на рисунку 3.5.



Рисунок 3.5 - Дзеркальні відображення

3.3 Порівняння з моделлю Блінна-Фонга

Окреслена модель шейдингу PBR параметризована альбедо, дзеркальністю і шорсткістю поверхні. Хоча модель Блінна-Фонга параметризована подібним чином: дифузія, дзеркальність та блиск (блиск можна описати як зворотну шорсткість), ці групи параметрів мають дуже різні значення. З цієї причини використання тих самих параметрів як вхідних даних для обох моделей і порівняння результатів є неприпустимим. Для кожної моделі слід створити окремий набір параметрів, щоб повністю використовувати графічну точність, яку може створити кожна модель.

Крім того, немає емпіричного способу порівняння цих моделей. Пошук різниці зазвичай проводиться шляхом порівняння сприймаємої суб'єктивно візуальної правильності відтворених зображень. З огляду на ці примітки, на малюнках (3.6) – (3.9) представлені ідентичні сцени, відтворені відповідно до кожної моделі.

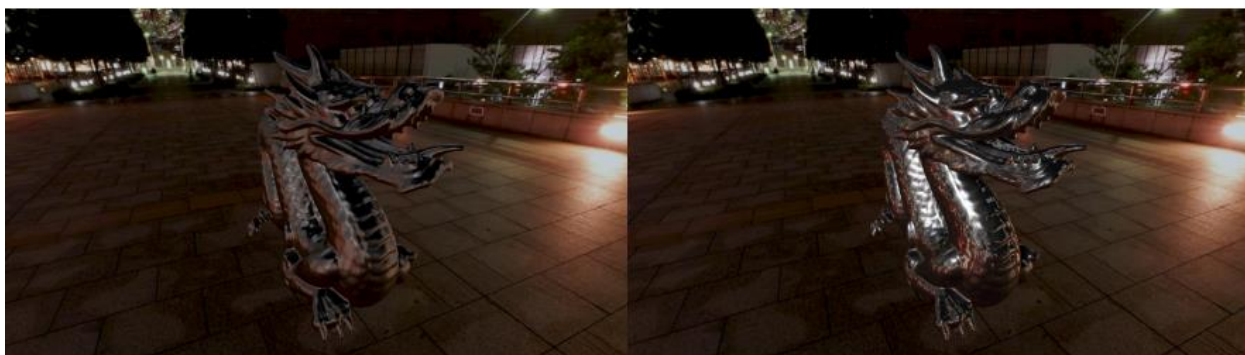


Рисунок 3.6 - Блінн-Фонг зліва та PBR справа



Рисунок 3.7 - Блінн-Фонг зліва та PBR справа

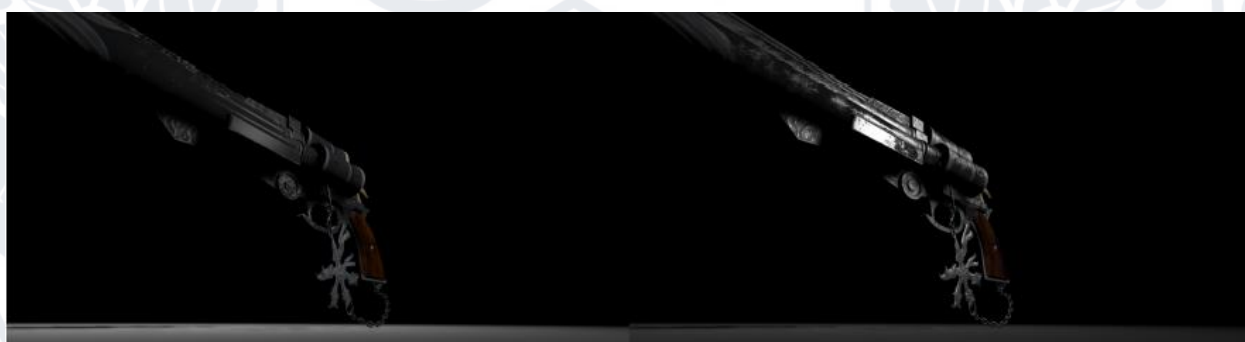


Рисунок 3.8 - Блінн-Фонг зліва та PBR справа

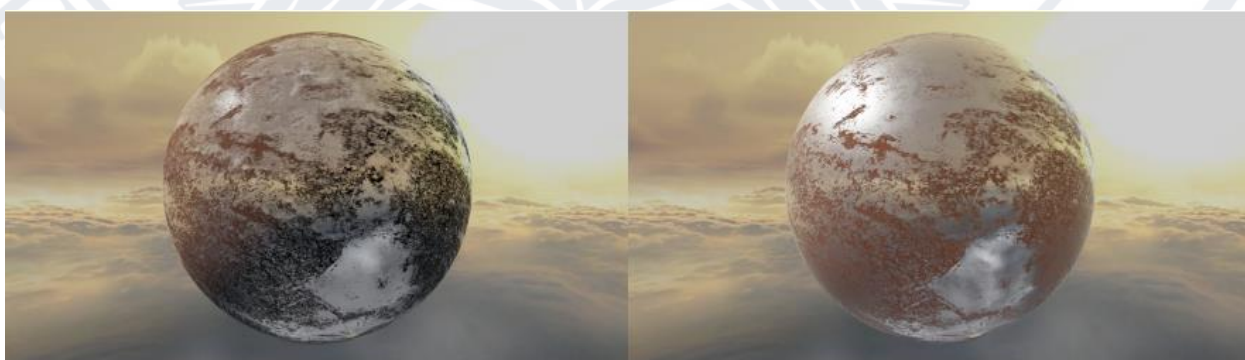


Рисунок 3.9 - Блінн-Фонг зліва та PBR справа

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній (бакалаврській) роботі досліджені сучасні моделі шейдингу, які використовуються в комп'ютерній графіці, зокрема фізично-коректний рендеринг. Протягом останніх кількох років, завдяки розвитку графічних процесорів у персональних комп'ютерах значно зросли можливості обробки графіки, *фізично коректний рендеринг* став дуже поширеним в програмах, що обчислюються у реальному часі, таких як відеоігри. Через цей інтерес сфера PBR отримала величезний стимул для подальшого розвитку. Різниця в продуктивності між базовою моделлю шейдингу PBR і Blinn-Phong є незначною на будь-якому сучасному графічному процесорі для домашнього ПК, оскільки вона становить лише кілька додаткових інструкцій шейдерів для моделі PBR. Ці факти свідчать про перевагу PBR над іншими моделями шейдингу, не заснованими на фізичному рівні. До недоліків PBR можна віднести його відносно низьку застосовність до сильно стилізованої графіки (хоча в останні роки було багато успішних ігор із використанням стилізованої графіки з PBR). Крім того, невелика перевага моделі Блінна-Фонга у продуктивності над PBR може мати значну вагу при дуже обмежених апаратних умовах, таких як мобільні платформи.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. S. Green, “GPUGems Chapter 16. Real-Time Approximations to Subsurface Scattering,” 2007. [Онлайновий]. Available: http://http.developer.nvidia.com/GPUGems/gpugems_ch16.html.
2. R. Cook and K. E. Torrance, “A reflectance model for computer graphics,” SIGGRAPH, 1981. [Онлайновий]. Available: <http://inst.cs.berkeley.edu/~cs294-13/fa09/lectures/cookpaper.pdf>.
3. N. Hoffman, “Physically-Based Shading Models in Film and Game Production,” SIGGRAPH, 2010. [Онлайновий]. Available: http://renderwonk.com/publications/s2010-shading-course/hoffman/s2010_physically_based_shading_hoffman_a_notes.pdf.
4. G. Humphreys, M. Pharr “Physically Based Rendering: From Theory to Implementation”, SIGGRAPH, 2004. [Онлайновий]. Available: <https://www.pbrt.org/>.
5. N. Reed, “How Is The NDF Really Defined?” 2013. [Онлайновий]. Available: <http://www.reedbeta.com/blog/how-the-ndf-really-defined/>
6. B. Walter, S. R. Marschner, H. Li, and K. E. Torrance, “Microfacet Models for Refraction through Rough Surfaces,” Program of Computer Graphics, Cornell University, 2007. [Онлайновий]. Available: <https://www.cs.cornell.edu/~srm/publications/EGSR07-btdf.pdf>.
7. B. Karis, “Specular BRDF Reference,” 2013. [Онлайновий]. Available: <https://graphicrants.blogspot.hr/2013/08/specular-brdf-reference.html>.
8. L. Gritz and E. d'Eon, “GPUGems 3 Chapter 24. The Importance of Being Linear,” 2007. [Онлайновий]. Available: http://http.developer.nvidia.com/GPUGems3/gpugems3_ch24.html.
9. M. Alamia, “Physically Based Rendering,” 2011. [Онлайновий]. Available: http://www.codinglabs.net/article_physically_based_rendering.aspx_24

10. “Physically Based Rendering: Cook–Torrance,” 2011. [Онлайновий]. Available: http://www.codinglabs.net/article_physically_based_rendering_cook_torrance.aspx.
11. P. Hennessy, “Implementation Notes: Runtime Environment Map Filtering for Image Based Lighting,” 2015. [Онлайновий]. Available: <https://placeholderart.wordpress.com/2015/07/28/implementation-notes-runtime-environment-map-filtering-for-image-based-lighting/>

