

## ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ ФІЗИЧНО-КОРЕКТНОГО РЕНДЕРИНГУ

Вінницький національний технічний університет

### *Анотація*

Розглянуто концептуальні положення фізично-коректного рендерингу

**Ключові слова:** рейтрейсинг, 3D-візуалізація, закони фізики, освітлення рендеринг.

### *Abstract*

Conceptual provisions of physically correct rendering are considered

**Keywords:** raytracing, 3D visualization, laws of physics, lighting rendering.

Фізично-коректний рендеринг (Physically Based Rendering, PBR) – це метод візуалізації в комп'ютерній графіці, який спрямований на досягнення максимально реалістичного зображення за рахунок точного моделювання взаємодії світла з поверхнями. Основна ідея полягає в тому, що візуалізація має базуватися на законах фізики, а не на спрощених або емпіричних моделях освітлення

Основні компоненти фізично-коректного рендеринга включають:

1. Моделювання матеріалів: Використання фізично-коректних моделей для відтворення властивостей поверхонь, таких як шорсткість, металічність, індекс заломлення тощо. Це дозволяє точно передати, як матеріали відображають і розсіюють світло.
2. Освітлення: Реалістичне моделювання джерел світла і їх взаємодії з матеріалами, включаючи відбиття, преломлення та тіні. Системи освітлення в PBR враховують такі явища, як глобальне освітлення та відбитки.
3. Рендеринг: Використання алгоритмів тінювання, які імітують взаємодію світла з поверхнями, для створення кінцевого зображення. Техніки, такі як ray tracing (трасування променів) або rasterization (растеризація), часто оптимізуються для досягнення високої реалістичності і продуктивності.

Фізично-коректний рендеринг вимагає значних обчислювальних ресурсів, але завдяки сучасному прогресу в галузі апаратного забезпечення та оптимізації алгоритмів, він стає все більш доступним для широкого використання в іграх, кіноіндустрії, архітектурній візуалізації та інших областях комп'ютерної графіки.

Розглянемо основні переваги фізично-коректного рендерингу.

Завдяки точному моделюванню взаємодії світла з різними матеріалами, PBR може створювати візуальні ефекти, що наближені до реальності.

Матеріали, створені з використанням PBR, виглядають правдоподібно під будь-яким освітленням, що робить їх більш універсальними і гнучкими у використанні.

PBR забезпечує консистентність візуальних ефектів, так як всі матеріали відповідають одним і тим же фізичним законам. Це означає, що різні об'єкти в сцені будуть взаємодіяти зі світлом однаково, що сприяє єдності загального візуального враження.

Фізично-коректний рендеринг широко використовується в ігровій індустрії, виробництві фільмів, архітектурній візуалізації та інших галузях, де необхідно досягти високого рівня реалізму візуальних ефектів.

Щодо реальних відеокарт, їхні можливості щодо PBR значно відрізняються залежно від моделі та виробника. Сучасні відеокарти, особливо від NVIDIA (серія GeForce RTX) та AMD (серія Radeon RX), включають спеціалізовані технології та апаратне забезпечення для підтримки фізично-

коректного рендерингу, такі як трасування променів в реальному часі та шейдери, оптимізовані для реалістичного освітлення та тіней.

Трасування променів (Ray Tracing) у реальному часі є ключовою функцією для досягнення фізичної коректності рендерингу, оскільки воно дозволяє точно імітувати поведінку світла, включаючи відбиття, тіні, переломлення та розсіювання. Відеокарти RTX від NVIDIA використовують спеціалізовані RT ядра для ефективного трасування променів. AMD впроваджує аналогічні функції у своїх останніх моделях через архітектуру RDNA.

Основні аспекти, на які звертає увагу PBR, включають дифузію, світлопроникність, прозорість, дзеркальне відбиття та поведінку світла при взаємодії з різними поверхнями. Наприклад, грубі поверхні розсіюють світло, зменшуючи інтенсивність відбиття, тоді як гладкі поверхні збільшують яскравість і інтенсивність дзеркальних відбиттів. Також важливою частиною PBR є врахування ефекту Френеля, який описує, як змінюється інтенсивність світла, відбитого від поверхні, залежно від кута погляду.

Фізично-коректне зафарбовування, або фізично-коректне рендерування, є методом у візуалізації та комп'ютерній графіці, який намагається імітувати реальне світло та матеріали з максимальною точністю. У контексті фізики, це означає, що алгоритми рендерингу намагаються дотримуватися основних законів фізики, таких як закон збереження енергії.

У контексті фізично-коректного зафарбовування, це принцип використовується для реалістичного моделювання світла та відбивання. Наприклад, коли світло відбивається від поверхні або проходить через прозорий об'єкт, частина енергії поглинається матеріалом, а решта розсіюється або проходить через нього. Застосування закону збереження енергії до цього процесу дозволяє точно обчислити, як світло повинно взаємодіяти з різними матеріалами, щоб створити реалістичні зображення.

Це досягається за допомогою складних алгоритмів, таких як трасування променів (ray tracing) або метод глобального освітлення, які імітують поведінку світла у реальному світі, включаючи відбивання, преломлення та розсіювання. Користувачі, такі як архітектори, дизайнери інтер'єрів та художники комп'ютерної графіки, можуть використовувати ці техніки для створення візуалізацій, які наближені до реального вигляду об'єктів та сцен у реальних умовах освітлення.

Фізично-коректне зафарбовування, у контексті закону збереження енергії, може бути інтерпретоване як процес або метод, що забезпечує відтворення кольорів у візуалізаціях, анімаціях або симуляціях, який не порушує фізичні закони, зокрема закон збереження енергії. Це може бути особливо важливо у фізичних симуляціях або при створенні візуального контенту, що прагне до реалістичності.

Принципи фізично-коректного зафарбовування

1. Енергетична рівновага: У візуалізаціях кількість світла, яке виходить з джерела світла, має бути рівнозначна кількості світла, що абсорбується, відбивається або пропускається через об'єкти.

2. Консервація енергії у матеріалах: Матеріали у візуалізаціях мають відображати реалістичні властивості поглинання та відбиття світла, забезпечуючи, що енергія світла не "зникає" або "створюється" без джерела.

3. Фізично-правдоподібне розсіювання світла: Моделювання розсіювання світла, таке як відбиття, переломлення та дифузія, має враховувати фізичні закони, як-от закон Снеліуса для переломлення світла.

4. Використання реалістичних джерел світла: Джерела світла в сцені повинні відтворювати реалістичні характеристики, включаючи інтенсивність, кольорову температуру та розподіл світла.

Закони фізики для рендерингу графіки в комп'ютерних програмах і іграх є важливими для створення реалістичних сцен. Одним із ключових принципів, який використовується в цьому контексті, є фізично-коректне зафарбовування, зокрема, закон збереження енергії. Цей закон вимагає, щоб енергія, яка входить в систему (наприклад, світло, що впадає на об'єкт), була дорівнює енергії, яка виходить або поглинається, відображається, розсіюється об'єктом. Таке підход до моделювання світлових взаємодій називається фізично-коректним рендерингом.

Основні закони фізики для рендерингу:

1. Закон Збереження Енергії: Важливий для моделювання освітлення і відтінків. Він забезпечує, що кількість світла, яке відбивається від поверхонь, не перевищує кількість світла, яке впадає на них.

2. Закон Снелла (Закон заломлення): Використовується для розрахунку заломлення світла при проходженні через різні середовища (наприклад, від повітря до скла).

3. Рівняння Рендерингу: Інтегральне рівняння, яке описує, як світло відбивається від поверхонь і розповсюджується у сцені. Це основа для багатьох алгоритмів фізично-коректного рендерингу.

Основне рівняння рендерингу формально описує вихідне світлове випромінювання з точки ( $L_o$ ) як суму власного випромінювання та відображеного випромінювання. Відбите випромінювання розраховується як інтеграл по всіх напрямках випромінювання ( $L_i$ ), що приходить на поверхню, помноженого на коефіцієнт відбиття матеріалу та кутову залежність. Це рівняння є ключем до розуміння та реалізації фізично-коректного зафарбовування в комп'ютерній графіці.

$$L_o(x, v) = L_e(x, v) + \int_{\Omega} f_r(x, v, l) * L_i(x, l) * (n \cdot l) dl$$

де:

- $L_o(x, v)$  є вихідне світлове випромінювання з точки  $x$  в напрямку  $v$ ;
- $L_e(x, v)$  є власне випромінювання з точки  $x$  в напрямку  $v$ ;
- $\int_{\Omega}$  є інтеграл по півсфері напрямків над точкою  $x$ ;
- $f_r(x, v, l)$  є коефіцієнтом відбиття (BRDF) у точці  $x$  для напрямків  $v$  та  $l$ ;
- $L_i(x, l)$  є вхідним світловим випромінюванням у точку  $x$  з напрямку  $l$ ;
- $n$  є нормаллю поверхні в точці  $x$ ;
- $(n \cdot l)$  є скалярним добутком нормалі та напрямку випромінювання, що вказує на косинус кута між ними

4. Моделі BRDF (Bidirectional Reflectance Distribution Function): Функції, які описують, як світло відбивається від матеріалів, враховуючи різноманітність поверхонь.

5. Моделі BTDF (Bidirectional Transmission Distribution Function): Аналогічно до BRDF, але для випадків, коли світло проходить через прозорі або напівпрозорі матеріали.

6. Фотометричні величини: Включають інтенсивність, світловий потік, освітленість та інші характеристики світла, що дозволяють точно моделювати світлові ефекти.

7. Теорія кольору: Для реалістичного відображення кольорів важливо розуміти, як світло взаємодіє з матеріалами і як це сприймається людським оком.

8. Теорія оптики Гюйгенса-Френеля: Допомогає розуміти взаємодію світла з хвилею, особливо у контексті дифракції та інтерференції. Це корисно для моделювання складних оптичних ефектів, наприклад, іридесценції або блискучості.

У контексті фізично-коректного зафарбовування, це принцип використовується для реалістичного моделювання світла та відбивання. Наприклад, коли світло відбивається від поверхні або проходить через прозорий об'єкт, частина енергії поглинається матеріалом, а решта розсіюється або проходить через нього. Застосування закону збереження енергії до цього процесу дозволяє точно обчислити, як світло повинно взаємодіяти з різними матеріалами, щоб створити реалістичні зображення.

Це досягається за допомогою складних алгоритмів, таких як трасування променів (ray tracing) або метод глобального освітлення, які імітують поведінку світла у реальному світі, включаючи відбивання, преломлення та розсіювання. Користувачі, такі як архітектори, дизайнери інтер'єрів та художники комп'ютерної графіки, можуть використовувати ці техніки для створення візуалізацій, які наближені до реального вигляду об'єктів та сцен у реальних умовах освітлення.

Фізично-коректне зафарбовування, у контексті закону збереження енергії, може бути інтерпретоване як процес або метод, що забезпечує відтворення кольорів у візуалізаціях, анімаціях або симуляціях, який не порушує фізичні закони, зокрема закон збереження енергії. Це може бути особливо важливо у фізичних симуляціях або при створенні візуального контенту, що прагне до реалістичності.

Моделі BTDF (Bidirectional Transmission Distribution Function) використовуються в галузі комп'ютерної графіки та візуалізації для опису способу розсіювання світла на поверхні матеріалу. Це дозволяє точніше моделювати властивості матеріалів, такі як відблиск, прозорість та глос, забезпечуючи більш реалістичне зображення об'єктів у 3D-сценах.

BTDF є частиною більш широкого набору функцій, відомих як BRDF (Bidirectional Reflectance Distribution Function), яка описує, як світло відбивається від поверхні. В той час як BRDF зосереджена на відбитті світла, BTDF займається передачею світла через прозорі або напівпрозорі матеріали.

Ці моделі важливі для створення реалістичних візуалізацій у таких галузях, як анімація, відеоігри, архітектурна візуалізація та в дизайні продукції, де точне відтворення матеріальних властивостей може значно вплинути на сприйняття кінцевого результату.

Моделі BTDF можуть відноситися до різних концепцій, в залежності від контексту. У сфері IT, BTDF (BizTalk Deployment Framework) стосується методів та інструментів для розгортання рішень на платформі Microsoft BizTalk. Це може включати автоматизацію розгортання, керування конфігураціями та інші процеси, які спрощують і оптимізують роботу з BizTalk.

BTDF є частиною ширшого набору інструментів для опису взаємодій між світлом та матеріалами, до якого також входять Бідирекційна функція розподілу відбивання (BRDF), Бідирекційна функція розсіювання (BSDF) та Бідирекційна функція розсіювання поверхневого відбиття (BSSRDF). Кожна з цих функцій надає математичну основу для опису того, як світло відбивається, передається або розсіюється в різних напрямках після взаємодії з матеріалом.

Розуміння та точне моделювання BTDF є важливим для симуляції оптичних властивостей матеріалів, проектування енергоефективних будівель з природним освітленням, створення реалістичних комп'ютерно-генерованих зображень (CGI) у фільмах та відеоіграх, а також розробки передових матеріалів із специфічними властивостями передачі або розсіювання світла.

В цілому, фізично-коректний рендеринг є ключовим елементом у створенні візуального контенту, який відповідає реальним світовим умовам і забезпечує глибшу іммерсію для глядача.

Перелік джерел посилання

1. Романюк О. Н. Комп'ютерна графіка. Навчальний посібник / О. Н. Романюк, О. В. Романюк, Р. Ю. Чехмestрук — Вінниця: ВНТУ, 2023. — 146 с.

2. Романюк О. Н. Високопродуктивні методи та засоби зафарбовування тривимірних графічних об'єктів. Монографія. / О. Н. Романюк, А. В. Чорний.- Вінниця : УНІВЕРСУМВінниця, 2006. — 190 с.

3. Романюк О.Н., Чехмestрук Р. Ю., Романюк О.В., Котлик С.В., Романюк С.О. Особливості формування тривимірних графічних сцен. Стан, досягнення та перспективи інформаційних систем і технологій / Матеріали XXII Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих вчених, аспірантів та студентів. Одеса, 21-22 квітня 2022 р. - Одеса, Видавництво ОНТУ, 2022 р. С.158-160.

4. Завальнюк Є. К., Романюк О. Н., Чехмestрук Р. Ю., Романюк О. В., Денисюк А. В. Методи покращення якості зображень. Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я : тези доповідей XXXI міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD-2023, 17–20 травня 2023 р. / за ред. проф. Сокола Є. І. – Харків : НТУ «ХПІ». – С. 1187.

**Романюк Олександр Никифорович** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри програмного забезпечення, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, rom8591@gmail.com.

**Чехмestрук Роман Юрійович** кандидат технічних наук, доцент кафедри програмного забезпечення, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, chekhroma@gmail.com

**Станіславенко Євген Григорович** – студент групи ІПІ-23м, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Факультет інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії, stanislavenkoyevgen@gmail.com

**Romanyuk N. Oleksandr** - doctor of technical sciences, professor, head of the Software Department, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, rom8591@gmail.com.

**Chekhmestruk Roman Yuriyovych**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Software, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, chekhroma@gmail.com

**Stanislavenko Yevhen Grigopovych** - student of group IPI-23m, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Faculty of Information Technologies and Computer Engineering, stanislavenkoyevgen@gmail.com