

Оцінка продуктивності методів фотонного мапінгу

Наталія Аксак^{1†} та Дмитро Могилевський^{1*†}

¹ Харківський національний університет радіоелектроніки, пр. Науки, 14, м. Харків, Україна

Анотація

У статті розглянуто різні методи фотонного мапінгу для рендерингу 3D сцен, зокрема RTPM, Hash-PPM та Stoch-PPM. Визначено їхні переваги та недоліки залежно від продуктивності, ефективності використання пам'яті та якості зображення. Оцінка проводилась на основі тестових сцен з використанням HDRI карт для моделювання реалістичних умов освітлення. Результати експериментів показали, що RTPM є найефективнішим для сцен з інтенсивними каустиками та систем з підтримкою апаратного трасування променів. У випадках без такої підтримки або з великою кількістю джерел світла, Stoch-PPM та комбінація RTPM із Stochastic Light Culling можуть бути оптимальними. Використання VCM рекомендовано для сцен зі складним непрямым освітленням.

Ключові слова

фотонний мапінг, рендеринг, каустики, трасування променів, цифрова обробка зображень, оцінка продуктивності

1. Введення до методів фотонного мапінгу

Фотонне мапування — це ефективний метод глобального освітлення, який дозволяє моделювати складні ефекти, такі як каустики та розсіяне світло. Він використовується для точного моделювання взаємодії світла з матеріалами в різних галузях, включаючи біологію та екологію. Різні реалізації фотонного мапування можуть значно відрізнятися за продуктивністю і якістю через вибір алгоритмів, налаштування якості, оптимізацію та використання ресурсів. Покращені реалізації балансують між якістю і швидкістю залежно від завдань користувача.

2. Схожі роботи

У роботі [1] представлено метод глобального освітлення для сцен із залученими носіями на основі двонаправленого трасування променів Монте-Карло з використанням фотонних карт для підвищення ефективності та зменшення шуму. Метод імітує багаторазове об'ємне розсіювання, кольорове розтікання між об'ємами та поверхнями, а також об'ємну каустику. Фотонні карти відокремлені від геометрії сцени, що дозволяє імітувати складні об'єкти без необхідності мозаїки. Метод автоматично адаптується до освітлення і виду, що робить його придатним для візуалізації анімацій. Фотонно-ефективне формування зображень дозволяє використовувати однофотонні датчики для захоплення 3D-зображень з одним фотоном на піксель [2]. Однак на практиці мала кількість фотонів часто змішується з фоновим шумом, що створює проблему для алгоритмів реконструкції. У роботі [3] представлено детектор, який розрізняє до 100 фотонів за допомогою просторово-часового мультиплексування масиву надпровідних нанодротів. Він підходить для застосувань у фотонних квантових обчисленнях та

* Corresponding author.

† These authors contributed equally.

✉ natalia.axak@nure.ua (Н. Аксак); dmytro.mohylevskyi@nure.ua (Д. Могилевський);

ORCID 0000-0001-8372-8432 (Н. Аксак); 0009-0003-2889-6208 (Д. Могилевський);



© 2024 Copyright for this paper by its authors. Use permitted under Creative Commons License Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).

квантовій метрології. У роботі [4] повідомляють про джерело одного фотона з високою наскрізною ефективністю. У дослідженні [5] представлено всебічний огляд поступової еволюції алгоритмів транспортування світла, що сприяло прогресу інструментів моделювання, зосереджуючись на використовуваних процедурах і алгоритмах. У роботі [6] представлено реалізацію прогресивного фотонного картографа для трасування променів (RTPM), що використовує апаратне прискорення (наприклад, GPU) для підвищення продуктивності. RTPM забезпечує реалістичне освітлення, особливо для складних сцен, і підходить для інтерактивних додатків та анімації. Хеш-базований прогресивний фотонний мапінг (Hash-PPM) [7] підвищує швидкість доступу до фотонів і зменшує витрати пам'яті, роблячи його ефективним для великих та складних сцен. Він оптимізує пошук фотонів, що особливо корисно для сцен із численними об'єктами або складною геометрією. Стохастичний паралельний фотонний мапінг (Stoch-PPM) [8] підвищує якість освітлення через паралельні обчислення та стохастичний вибір фотонів, зменшуючи шум і покращуючи стабільність у складних сценах. Паралельна обробка значно прискорює обчислення, що робить метод ефективним для великих систем.

Методи фотонного мапінгу відрізняються продуктивністю залежно від технік і оптимізацій. Вони ефективно моделюють складні сцени, покращуючи реалістичність рендерингу. Оцінка продуктивності важлива для вибору оптимального рішення відповідно до вимог якості зображення, швидкості та ресурсів.

3. Опис тестових сцен

Платформа HDRI Haven [9] надає безкоштовні HDRI (High Dynamic Range Image) карти для освітлення 3D сцен (рис. 1), що допомагає оцінити вплив різних умов освітлення на продуктивність і якість рендерингу фотонного мапінгу. HDRI симулює складні світлові ефекти, як-от каустика, важливі для роботи з прозорими або дзеркальними поверхнями.



Рисунок 2: HDRI карти дозволяють оцінити, як різні умови освітлення впливають на продуктивність і якість рендерингу з використанням фотонного мапінгу.

Для оцінки методів фотонного мапінгу використовується набір тестових сцен з різною складністю та умовами освітлення: Interior_1 – сцена з прозорими об'єктами (рис. 1а); Interior_2 – сцена для демонстрації каустик (рис. 1б); Interior_3 – сцена з добре видимими каустиками; Interior_4 – сцена з високою концентрацією каустичних фотонів (рис. 1в); Interior_5 – сцена з розподіленими каустичними фотонами; Interior_6 – сцена з інтер'єром та екстер'єром і багатьма джерелами світла.

Ці сцени дозволяють об'єктивно оцінити продуктивність алгоритмів, враховуючи якість глобального освітлення, реалістичність каустик і тіней, продуктивність на складних геометріях та оптимізацію швидкості рендерингу.

4. Експерименти

Всі тести проводились з роздільною здатністю 1920x1080 на відеокарті NVIDIA RTX 2080 SUPER. Для кожної сцени ми визначили оптимальну кількість фотонів та початковий радіус пошуку для кожного методу, також оцінили продуктивність за такими критеріями:

1. Час рендерингу на ітерацію:

$$T = \frac{N_{rays} \times T_{ray} \times N_{photons} \times T_{photon}}{P_{performance}}, \quad (1)$$

де N_{rays} – кількість променів, T_{ray} – середній час трасування одного променя (мс), $N_{photons}$ – кількість фотонів, T_{photon} – середній час обробки одного фотона (мс), $P_{performance}$ – продуктивність системи (залежить від апаратної частини, як-от кількість ядер або швидкість GPU). Час рендерингу T вимірювався для кожного методу на всіх тестових сценах.

2. Якість зображення оцінюється за допомогою метрики SSIM, яка порівнює еталонне та відрендерене зображення, враховуючи яскравість, контрастність і структуру. Значення SSIM = 1 означає ідеальну схожість, а значення, близьке до 0, вказує на значну різницю.

3. Швидкість збіжності C_r (2) визначає, як швидко алгоритм досягає заданого рівня якості, вимірюючись часом від початку рендерингу T_{start} до досягнення порогового значення якості T_{end} . Малий C_r означає швидку збіжність, великий – повільну.

$$C_r = T_{end} - T_{start}. \quad (2)$$

4. Ефективність використання пам'яті M_e визначає частку збережених фотонів для рендерингу відносно згенерованих. Вона обчислюється як відношення збережених фотонів N_{stored} до загальної кількості випущених N_{total}

$$M_e = N_{stored} / N_{total}. \quad (3)$$

Високий M_e (близький до 1) свідчить про ефективне збереження більшості фотонів, що покращує обчислення освітлення. Низький M_e (близький до 0) вказує на втрату більшості фотонів, що свідчить про неефективність методу.

RTPM показав найкращий час рендерингу на ітерацію серед усіх методів, будучи вдвічі швидшим за Hash-PPM та на 1.5 рази швидшим за Stoch-PPM. Наприклад, у сцені Interior_1 середній час ітерації був: RTPM — 14 мс, Hash-PPM — 27 мс, Stoch-PPM — 19 мс. Метрика SSIM показала, що RTPM та Hash-PPM мають схожу якість зображення за однаковою кількість ітерацій, але завдяки швидкості RTPM досягає кращої якості за однаковий час. Після 10 секунд рендерингу сцени Interior_3, SSIM для RTPM становив 0.94, для Hash-PPM — 0.87, для Stoch-PPM — 0.89. RTPM швидше досягає еталонної якості, наприклад, у сцені Interior_5, де він досяг SSIM 0.9 за 2 секунди, тоді як Hash-PPM потребував 4 секунди, а Stoch-PPM — 3 секунди.

Графік збіжності SSIM для сцени Interior_3 показав, що RTPM досягає майже еталонної якості швидше за конкурентів: після 30 секунд рендерингу SSIM для RTPM становив 0.97, для Hash-PPM — 0.96, для Stoch-PPM — 0.94. RTPM потребує більше пам'яті для структури прискорення трасування променів, але завдяки Photon Culling загальне використання пам'яті часто було меншим, особливо у великих сценах. Наприклад, у сцені Interior_6 RTPM зберігав 153 000 фотонів, тоді як Hash-PPM і Stoch-PPM — понад 1 200 000, що зменшило використання пам'яті та прискорило обчислення. Для розширення аналізу розглянуто також методи Vertex Connection and Merging (VCM) та Stochastic Light Culling (SLC).

5. Висновки

Результати проведених експериментів показали, що: VSM демонструє кращу якість зображення на ранніх етапах рендерингу для сцен з складним непрямым освітленням (наприклад, Interior_2); RTPM залишається більш ефективним для сцен з інтенсивними каустиками; час рендерингу VSM виявився в середньому на 20-30% повільнішим за RTPM; VSM потребує більше пам'яті через необхідність зберігання додаткових структур даних для з'єднання шляхів.

Для систем з апаратним трасуванням променів RTPM є найкращим вибором для сцен зі складними каустиками та численними джерелами світла. Без такої підтримки Stochastic RPPM забезпечує баланс між швидкістю та якістю, особливо для середньо складних сцен. Комбінація RTPM із Stochastic Light Culling ефективна для сцен з багатьма джерелами світла. Для дуже складних сцен з непрямым освітленням можна використовувати VSM, якщо час рендерингу не є критичним. Для оптимальної роботи RTPM варто починати з великого радіусу пошуку і поступово його зменшувати.

Список літератури

- [1] H. W. Jensen, & P. H. Christensen, Efficient simulation of light transport in scenes with participating media using photon maps. In *Seminal Graphics Papers: Pushing the Boundaries*, 2023, Volume 2, pp. 301-310.
- [2] J. Peng, Z. Xiong, X. Huang, Z. P. Li, D. Liu, & F. Xu, Photon-efficient 3d imaging with a non-local neural network. In *Computer Vision—ECCV 2020: 16th European Conference, Glasgow, UK, August 23–28, 2020, Proceedings, Part VI* 16, pp. 225-241.
- [3] R. Cheng, Y. Zhou, S. Wang, M. Shen, T. Taher, & H. X. Tang, A 100-pixel photon-number-resolving detector unveiling photon statistics. *Nature Photonics*, 17(1), 2023, pp.112-119.
- [4] N. Tömm, A. Javadi, N. O. Antoniadis, D. Najer, M. C. Löbl, A. R. Korsch, & R. J. Warburton, A bright and fast source of coherent single photons. *Nature Nanotechnology*, 16(4), 2021, pp. 399-403.
- [5] M. Ayoub, A review on light transport algorithms and simulation tools to model daylighting inside buildings. *Solar Energy*, 198, 2020, pp. 623-642.
- [6] R. Kern, F. Brüll & T. Grosch, Accelerating Photon Mapping for Hardware-Based Ray Tracing. *Journal of Computer Graphics Techniques Vol*, 12(1), 2023.
- [7] M. Mara, D. Luebke, M. McGuire, Toward practical real-time photon mapping: Efficient GPU density estimation. In *Proceedings of the ACM SIGGRAPH Symposium on Interactive 3D Graphics and Games*, Association for Computing Machinery, New York, I3D '13, 2013, pp. 71–78. URL: <https://doi.org/10.1145/2448196.2448207>. 2, 3, 15, 16.
- [8] T. Hachisuka, H. W. Jensen, Parallel progressive photon mapping on GPUs. In *ACM Siggraph Asia 2010 Sketches*, Association for Computing Machinery, New York, SA '10, 54:1. 2010. URL: <https://doi.org/10.1145/1899950.1900004>. 2, 3, 14, 15, 16.
- [9] HDRI Haven. 2024. URL: <https://hdri-haven.com/category/sunrise-sunset/artificial-light>.