

УДК 004.925

СУЧАСНІ МЕТОДИ ФОТОННОГО ВІДОБРАЖЕННЯ ТА ТРАСУВАННЯ ПРОМЕНІВ У СИСТЕМАХ КОМП'ЮТЕРНОЇ ГРАФІКИ

Могилевський Д.І.

dmytro.mohylevskyi@nure.ua

Науковий керівник – д.т.н, професор, Аксак Наталія Георгіївна
Харківський національний університет радіоелектроніки, каф. ІСТ
м. Харків, Україна

Abstract. Modern computerized systems increasingly require highly realistic visual environments, where accurate rendering of shadows and reflections plays a crucial role in improving visual fidelity and analytical precision. Photon-based rendering techniques, particularly photon mapping, have become effective tools for simulating complex light interactions in digital scenes. These techniques enable detailed modeling of global illumination, caustics, and indirect lighting effects that are difficult to achieve with traditional rendering methods. The study examines the principles and practical implementation of photon imaging techniques for generating precise shadows and reflections in complex computational environments. Such techniques are especially relevant for scientific visualization, virtual simulations, and advanced digital modeling systems.

Техніки фотонного відображення та трасування променів є важливим напрямом сучасної комп'ютерної графіки, що забезпечує створення високоточних тіней, відбиттів та інших світлових ефектів у складних комп'ютеризованих системах. Сучасні підходи до візуалізації базуються на фізично обґрунтованих моделях поширення світла, які дозволяють відтворювати взаємодію світлових потоків з об'єктами сцени максимально наближено до реальних умов. У цьому контексті ключове значення мають методи фотонного відображення та трасування променів, які моделюють процеси відбиття, заломлення, розсіювання світла і формування тіней. Як зазначає Л. Назаренко, «процес формування світлового зображення в комп'ютерних системах ґрунтується на фізичних закономірностях поширення випромінювання, що описуються законами радіометрії та фотометрії, а точне моделювання цих процесів дозволяє отримувати достовірні візуальні результати у цифрових середовищах» [1, с. 54].

Одним із фундаментальних підходів до формування фотореалістичних тривимірних зображень є метод трасування променів (ray tracing), який став основою для розвитку сучасних алгоритмів глобального освітлення. Згідно з дослідженням О. Романюка, «техніки трасування променів забезпечують точне моделювання поширення світла в тривимірних сценах, включаючи пряме та

непряме освітлення, відбиття, заломлення, утворення тіней і каустичних ефектів» [4, с. 9]. Класичний підхід до трасування променів, відомий як алгоритм Whitted-style Ray Tracing, передбачає випромінювання первинного променя від камери до кожного пікселя сцени. Після перетину з поверхнею об'єкта система визначає точку контакту і розраховує локальне освітлення відповідно до моделей взаємодії світла з поверхнею, таких як моделі Ламберта або Фонга. На цьому етапі формуються додаткові промені відбиття, заломлення та тіней, що дозволяє відтворювати дзеркальні відбиття, прозорість матеріалів і чіткі контури тіней [4, с. 10].

Розвиток комп'ютерної графіки сприяв появі більш складних фотонних методів відображення, які здатні враховувати глобальне освітлення і багатократне розсіювання світла між поверхнями. Такі методи базуються на статистичних підходах, зокрема стохастичних алгоритмах трасування шляхів світла. Як підкреслюють С. Паркер та П. Ширлі, алгоритми двонаправленого трасування шляхів (Bidirectional Path Tracing) дозволяють моделювати складні взаємодії світлових потоків, об'єднуючи траєкторії променів, що виходять від камери, і траєкторії, які поширюються від джерел світла, що значно підвищує точність відтворення глобального освітлення [3, с. 64]. Завдяки цьому стає можливим відображення таких складних ефектів, як м'які тіні, кольорові відбиття від поверхонь та каустика, які важко реалізувати в межах класичних детермінованих алгоритмів.

Важливу роль у фотонному відображенні відіграє також фізичне моделювання взаємодії світла з матеріалами. Для цього використовуються різні моделі відбиття і розсіювання, що враховують властивості поверхні, її шорсткість, коефіцієнт відбиття та показник заломлення. Дослідження в галузі фізики світла доводять, що «правильний вибір моделі взаємодії світла з матеріалами є ключовим фактором для створення реалістичних зображень у складних віртуальних середовищах» [2, с. 87]. Саме тому сучасні рендерингові системи поєднують фізично коректні моделі освітлення з алгоритмами трасування променів, що забезпечує високий рівень достовірності зображення.

Разом із тим застосування фотонних технік пов'язане з високими обчислювальними витратами, оскільки точне моделювання світлових процесів потребує значної кількості розрахунків. У зв'язку з цим значна увага приділяється оптимізації алгоритмів трасування. Зокрема, використовуються методи просторового поділу сцени, такі як ієрархія обмежувальних об'ємів (Bounding Volume Hierarchy) або структури типу Octree, що дозволяють значно скоротити кількість перевірок перетину променів з об'єктами сцени [4, с. 29]. Крім того, для підвищення продуктивності застосовуються попередньо обчислені карти освітлення (lightmaps) та карти тіней (shadow maps), які

зберігають результати розрахунків освітлення і дозволяють зменшити навантаження на систему під час рендерингу в реальному часі.

Додаткові оптимізаційні підходи передбачають обмеження глибини відбиття променів, використання спрощених моделей відбиття та комбінування трасування променів з іншими методами рендерингу, зокрема растеризацією. Таке поєднання дозволяє досягти балансу між точністю візуалізації та швидкістю обробки графічних сцен. Як зазначає О. Романюк, «постійне вдосконалення алгоритмів та апаратних засобів обробки графіки дає можливість використовувати методи трасування променів навіть у режимі реального часу, що значно розширює сферу їх застосування – від відеоігор до наукової візуалізації та систем моделювання складних процесів» [4, с. 30].

Відтак, техніки фотонного відображення та трасування променів становлять фундамент сучасних систем комп'ютерної візуалізації. Вони забезпечують фізично обґрунтоване моделювання світлових процесів, що дозволяє створювати високоточні тіні, відбиття та інші складні оптичні ефекти у цифрових середовищах. Поєднання цих методів з оптимізаційними алгоритмами та сучасними апаратними технологіями відкриває нові можливості для формування фотореалістичних зображень у складних комп'ютеризованих системах та сприяє подальшому розвитку галузі комп'ютерної графіки.

Список використаних джерел

1. Назаренко Л. А. Основи радіометрії та фотометрії : монографія; Харк. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. Х.: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2014. 352 с.
2. Назаренко Л. А. Фізика і техніка світлодіодів : навч. посібник; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2021. 255 с.
3. Parker S.G., Shirley P. Bidirectional path tracing in theory and practice. Journal of Computer Graphics Techniques (JCGT), 2018. 2. P. 60-85. URL: <https://www.jcgt.org/published/02/04/03>.
4. Romaniuk O. Ray tracing methods for forming three-dimensional graphic images. Computer science. 2019. P. 9-20. DOI: 10.51587/9798-9917-51926-2025-023-9-30