

ВИКОРИСТАННЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ МОДЕЛЕЙ ОСВІТЛЕННЯ НА ОСНОВІ ДФВЗ

¹Вінницький національний технічний університет

Анотація

Розглянуто сучасні підходи до використання штучного інтелекту для розрахунку моделей освітлення на основі ДФВЗ. Проаналізовано обмеження класичних аналітичних моделей та обґрунтовано доцільність застосування нейронних мереж для апроксимації складних функцій відбиття світла. Описано методи поєднання машинного навчання з фізично-базованими обмеженнями, а також підходи до інверсного відновлення параметрів матеріалів. Показано, що застосування штучного інтелекту сприяє підвищенню точності, зменшенню обчислювальних витрат і розширенню сфер використання ДФВЗ-моделей у сучасних системах візуалізації.

Ключові слова: ДФВЗ, моделювання освітлення, штучний інтелект, нейронні мережі, фізично-базований рендеринг, апроксимація відбиття світла

Abstract

Modern approaches to the use of artificial intelligence for calculating lighting models based on BRDF are considered. The limitations of classical analytical models are analyzed and the feasibility of using neural networks to approximate complex light reflection functions is substantiated. Methods for combining machine learning with physically-based constraints are described, as well as approaches to inverse recovery of material parameters. It is shown that the use of artificial intelligence contributes to increasing accuracy, reducing computational costs, and expanding the scope of use of BRDF models in modern visualization systems.

Keywords: BRDF, lighting modeling, artificial intelligence, neural networks, physically based rendering, light reflection approximation

Вступ

Двопроменева функція відбивної здатності (ДФВЗ) [1-10] описує залежність інтенсивності відбитого світла від напрямку падаючого випромінювання та напрямку спостереження і використовується для математичного опису властивостей поверхонь матеріалів [1]. Точність моделювання ДФВЗ безпосередньо впливає на реалістичність синтезованих зображень, коректність світлових симуляцій та якість візуалізації складних сцен [2].

Сучасний розвиток комп'ютерної графіки та візуалізаційних технологій характеризується зростаючими вимогами до фізичної коректності та фотореалістичності синтезованих зображень. Одним із основних елементів фізично-базованого рендерингу є коректне моделювання взаємодії світла з поверхнями матеріалів, що формалізується за допомогою двопроменевої функції відбивної здатності ДФВЗ [1]. Саме точність опису ДФВЗ визначає адекватність відтворення оптичних властивостей матеріалів у віртуальних сценах.

Традиційні аналітичні моделі ДФВЗ, незважаючи на їх широке застосування, мають обмежені можливості щодо опису складних матеріалів і часто потребують ручного налаштування параметрів [2]. У зв'язку з цим актуальним є застосування методів штучного інтелекту, які дозволяють автоматизувати процес побудови ДФВЗ-моделей, підвищити їх точність та адаптивність до реальних вимірюваних даних [3]. Використання нейронних мереж у задачах моделювання освітлення відкриває нові перспективи для розвитку фізично-базованого рендерингу та суміжних галузей комп'ютерної графіки [4].

Результати дослідження

У зв'язку з цим у сучасних дослідженнях активно розглядається застосування методів штучного інтелекту для автоматизації побудови та розрахунку ДФВЗ-моделей. Основна ідея полягає у використанні машинного навчання для апроксимації складних функцій відбиття світла на основі вимірних

або синтетичних даних [3]. Нейронні мережі здатні представляти багатовимірні нелінійні залежності, що робить їх придатними для моделювання ДФВЗ без жорстких аналітичних обмежень.

Одним із напрямів є побудова так званих нейронних ДФВЗ, у яких функція відбиття світла подається у вигляді параметризованої нейронної мережі [3]. Такі підходи дозволяють компактно зберігати інформацію про матеріал і забезпечують високу точність апроксимації навіть для складних поверхоень. Навчання нейронної ДФВЗ здійснюється на наборах даних, отриманих за допомогою гоніометрів або шляхом чисельного моделювання світлових процесів [2]. У результаті формується модель, здатна узагальнювати поведінку матеріалу для різних кутів освітлення та спостереження.

Важливим аспектом застосування штучного інтелекту в розрахунку ДФВЗ є поєднання нейронних моделей із фізично-базованими обмеженнями. Зокрема, у роботах останніх років наголошується на необхідності дотримання енергетичної збереженості, симетрії та додатності ДФВЗ [2]. Для цього у структуру нейронних мереж або функцію втрат вводяться додаткові фізичні обмеження, що підвищує коректність отриманих моделей і запобігає появі нефізичних артефактів у процесі рендерингу.

Ще одним перспективним напрямом є використання штучного інтелекту для інверсних задач, пов'язаних із відновленням параметрів ДФВЗ за зображеннями або відеопослідовностями [3]. У таких задачах нейронні мережі навчаються визначати властивості матеріалу за результатами освітлення сцени, що дозволяє автоматизувати процес матеріального сканування. Подібні підходи особливо актуальні для віртуальної та доповненої реальності, де необхідно швидко відтворювати реальні об'єкти з високим рівнем фотореалістичності.

Застосування методів штучного інтелекту також сприяє оптимізації обчислювальних витрат при використанні складних ДФВЗ-моделей. Нейронні апроксимації можуть замінювати дорогі інтегральні обчислення, забезпечуючи прискорення рендерингу в реальному часі без суттєвої втрати якості [4]. Це має важливе значення для ігрових рушіїв, симуляторів та інтерактивних візуалізацій, де обчислювальні ресурси є обмеженими.

Окрему увагу в сучасних дослідженнях приділяють проблемі оцінювання якості ДФВЗ-моделей. Традиційні метрики, що базуються на середньоквадратичній похибці, не завжди коректно відображають сприйняття людиною різниці між матеріалами [6]. У зв'язку з цим пропонуються нейронні перцептивні метрики, які враховують особливості зорового сприйняття та дозволяють більш адекватно порівнювати результати різних ДФВЗ-апроксимацій [6].

Подальший розвиток методів штучного інтелекту у сфері розрахунку моделей освітлення ДФВЗ пов'язаний із необхідністю ефективного представлення високовимірних даних. Функція ДФВЗ залежить щонайменше від чотирьох кутових параметрів, а у випадку спектральних або просторово-змінних матеріалів її розмірність ще більше зростає [1]. Традиційні табличні або параметричні представлення виявляються малоефективними з точки зору пам'яті та швидкодії, що стимулювало застосування нейронних мереж як універсальних апроксиматорів багатовимірних функцій [3].

У сучасних роботах нейронні ДФВЗ-моделі часто використовують компактні латентні простори, в яких матеріальні властивості кодуються у вигляді векторів фіксованої розмірності [4]. Це дозволяє не лише зменшити обсяг збережених даних, а й виконувати інтерполяцію між різними матеріалами, створюючи нові властивості поверхонь без додаткових вимірювань. Такий підхід є особливо корисним у цифровому контент-виробництві, де необхідно швидко формувати бібліотеки матеріалів для сцен різної складності [2].

Значну увагу приділяють також задачі узгодження нейронних ДФВЗ із класичними фізично-базованими моделями. Замість повної заміни аналітичних формул нейронними мережами часто застосовується гібридний підхід, за якого нейронна мережа навчається передбачати параметри фізичної моделі або коригувати її вихідні значення [2]. Це дозволяє зберегти інтерпретованість параметрів і водночас підвищити точність моделювання складних ефектів, таких як міжвідбивання, мікрофасетна анізотропія та підповерхневе розсіювання [1].

Ще одним важливим напрямом є використання штучного інтелекту для адаптивної вибірки та інтегрування ДФВЗ у задачах рендерингу. Класичні методи чисельного інтегрування, що застосовуються в трасуванні променів, можуть бути надзвичайно обчислювально затратними для складних ДФВЗ [4]. Нейронні мережі застосовуються для навчання оптимальних стратегій вибірки напрямків освітлення, що зменшує дисперсію та пришвидшує збіжність алгоритмів рендерингу [2].

У контексті інверсних задач нейронні ДФВЗ-моделі відіграють первинну роль у відновленні властивостей матеріалів за зображеннями реальних сцен. Сучасні підходи дозволяють одночасно оцінювати геометрію об'єкта, параметри освітлення та ДФВЗ, що є надзвичайно складною задачею в кла-

сичній постановці [3]. Використання глибоких нейронних мереж суттєво спрощує цей процес і робить можливим автоматичне створення цифрових двійників реальних об'єктів для подальшого використання у віртуальному середовищі.

Особливе значення мають дослідження, спрямовані на застосування нейронних ДФВЗ у поєднанні з нейронними полями випромінювання. Поєднання цих підходів дозволяє більш точно розділяти вплив геометрії, освітлення та матеріальних властивостей сцени [5]. Це відкриває нові можливості для реконструкції сцен з використанням обмеженої кількості зображень і має важливе прикладне значення для дистанційного зондування, робототехніки та систем комп'ютерного зору [5].

Окремим напрямом є аналіз якості та адекватності нейронних ДФВЗ-моделей. Встановлено, що чисельні метрики похибки не завжди корелюють із візуальним сприйняттям результатів [6]. У відповідь на це розробляються нейронні перцептивні метрики, навчені на експериментальних даних, які краще відображають суб'єктивну оцінку людини щодо реалістичності матеріалів [6]. Використання таких метрик дозволяє більш об'єктивно порівнювати різні моделі ДФВЗ та оптимізувати їх з урахуванням зорового сприйняття.

Загалом, застосування штучного інтелекту у розрахунку моделей освітлення ДФВЗ сприяє формуванню нового покоління методів фізично-базованого рендерингу. Ці методи поєднують точність фізичних моделей, гнучкість нейронних апроксимацій та ефективність сучасних обчислювальних архітектур [4]. У перспективі це дозволяє створювати універсальні моделі матеріалів, здатні адаптуватися до різних умов освітлення та застосовуватися в широкому спектрі задач — від комп'ютерної графіки та дизайну до наукового моделювання й аналізу супутникових зображень [5], [7].

Таким чином, використання штучного інтелекту для розрахунку ДФВЗ є не лише інструментом підвищення якості візуалізації, але й важливим науковим напрямом, що формує основу для подальшого розвитку цифрових технологій моделювання світлових процесів [2], [6].

Висновки

Загалом, використання штучного інтелекту для розрахунку моделей освітлення відкриває нові можливості для підвищення точності, адаптивності та ефективності світлових моделей. Поєднання даних реальних вимірювань, фізично-базованих принципів і методів машинного навчання дозволяє створювати універсальні ДФВЗ-моделі, придатні для широкого спектра застосувань.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Geometrical considerations and nomenclature for reflectance / F. E. Nicodemus [et al.] – Washington: National Bureau of Standards, 1977. — 52 p.
2. Zhou Y. An overview of BRDF models in computer graphics / Y. Zhou // Theoretical and Natural Science. — 2023. — Vol. 19. — P. 205–210.
3. Chen Z. Invertible Neural BRDF for object inverse rendering / Z. Chen, S. Nobuhara, K. Nishino // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. — 2021. — Vol. 44, No. 12. — P. 9380–9395.
4. Neural pre-integrated lighting for reflectance decomposition / M. Boss [et al.] // NIPS'21: Proceedings of the 35th International Conference on Neural Information Processing Systems, 2021. — 2021. — P. 10691–10704.
5. BRDF-NeRF: Neural radiance fields with BRDF modelling / L. Zhang [et al.] // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. — 2025. — Vol. 143 – Art. no. 104747.
6. A neural quality metric for BRDF models / B. Kavosighafi [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. — 2025. — Vol. 3128. — Art. no. 012015.
7. Ляшенко Ю. Л. Фізично коректна дистрибутивна функція відбивної здатності поверхні / Ю. Л. Ляшенко, О. Н. Романюк, Г. Ю. Сісюк // Вісник КДУ імені Михайла Остроградського. - 2010. - Вип. 5 (64), ч. 1. - С. 83-86.
8. Енергетично-коректна модель освітлення, основана на розрахунку кута між векторами / Є. К. Завальнюк, О. Н. Романюк, О. П. Прозор, А. В. Снігур // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2023. – № 1. – С. 75-82.
9. Аналіз сучасних моделей освітлення для задач рендерингу / О. Н. Романюк [та ін.] // Матеріали XVI міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології і автоматизація - 2023» ,[Одеса], 19-20 жовтня 2023 р. – Одеса, 2023 р. – С. 411-416.

10. - Романюк О. Н. Аналіз нових моделей освітлення на основі двопробенеких функцій відбивної здатності / О. Н. Романюк, Є. К. Завальнюк, О. Л. Бобко // Україна та світ: сучасні парадигми розвитку суспільства : колективна монографія – Харків : СГ НТМ «Новий курс», 2024. – Розд. 1.4. С. 16-39.

Романюк Олександр Никифорович - д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри програмного забезпечення, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця

Завальнюк Євген Костянтинович - аспірант кафедри програмного забезпечення, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця

Мельник Анастасія Володимирівна - студентка гр. 2ПІ-22Б, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця.

Romanyuk Oleksandr Nykyforovych - Dr. of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Software, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia

Zavalniuk Yevhen Kostyantynovych - postgraduate student of the Department of Software, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia

Melnyk Anastasia Volodymyrivna - student of group 2PI-22B, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia.