

## Аналіз нових моделей відбивних здатностей поверхонь у комп'ютерній графіці

Вінницький національний технічний університет

### Анотація

*У даній статті проаналізовано особливості найпоширеніших моделей двонапрямлених функцій відбивних здатностей поверхонь відповідно до сучасних можливостей засобів комп'ютерної графіки та розвитку методів обчислення оптичних властивостей різноманітних поверхонь.*

**Ключові слова:** комп'ютерна графіка, двонапрямлена функція відбивної здатності, модель освітлення.

### Abstract

*This article analyzes the features of the most common models of the bidirectional reflectance distribution function in accordance with the modern capabilities of computer graphics and the development of methods for calculating the optical properties of various surfaces.*

**Keywords:** computer graphics, bidirectional reflectance distribution function, lighting model.

### Вступ

Сучасні засоби комп'ютерної графіки дають можливість досягти надзвичайно високої реалістичності відтворюваних об'єктів. Враховуючи особливості поверхонь, які моделюються, матеріали, з яких вони виготовлені, і, відповідно, їх відбивні властивості, сучасне багатовимірне моделювання створює широкий спектр можливостей практично в усіх сферах комп'ютерної графіки та її окремих галузей. Фотореалістичність досягається за рахунок використання двонапрямлених функцій відбивної здатності поверхонь (ДФВЗ).

З розвитком інформаційних технологій та їх проникненням у найрізноманітніші сфери людської діяльності, діджиталізація та віртуалізація великої кількості послуг та практичне застосування комп'ютерної графіки збільшує потребу у розширенні та накопиченні знань про можливості двонапрямлених функцій для подальшого їх удосконалення та створення нових, відповідно до напрямку застосування. Саме тому актуальним є аналіз існуючих ДФВЗ та особливостей їх використання для моделювання складних поверхонь.

### Результати дослідження

Двонапрямлена функція відбивної здатності визначає оптичні властивості відтворюваних фізичних об'єктів. У комп'ютерній графіці ДФВЗ полягає у розрахунку освітленості точок поверхні відтворюваного об'єкта. Такий підхід передбачає створення математичної моделі освітленості об'єктів у тривимірному просторі, при цьому враховуючи їх фізичні властивості, особливості матеріалів тощо [1]. Сучасні засоби комп'ютерної графіки дозволяють виконувати таке відтворення у реальному часі. Для цього застосовують складні двонаправлені функції відбивної здатності. Варто зазначити, що розрізняють три компоненти світла: фонову, дифузну та спекулярну.

Фонова компонента залежить від фонові інтенсивності джерела світла та коефіцієнта фонового освітлення об'єкту. Це те світло, яке відбивається від багатьох об'єктів, і в результаті освітлює об'єкт, який не перебуває під прямими сонячними променями.

Дифузна компонента визначається кутом падіння світла на поверхню об'єкта. Якщо світло падає на об'єкт під прямим кутом, то інтенсивність відбитого світла набагато вища, ніж якби воно налходило по дотичній.

Спекулярна компонента залежить від позиції спостерігача. Це світло, яке відбивається від об'єкта та потрапляє в поле зору спостерігача. Поверхня об'єкта, на якій знаходиться відблиск, освітлена краще

за всіх інших. Спекулярна компонента залежить від кута між відбитим променем і променем, спрямованим на спостерігача. Чим менший кут, тим яскравіший відблиск [2].

Більшість модельованих поверхонь не є ідеально гладкими. Це так звані шорсткі, анізотропні поверхні. До них, наприклад, відносять метали. Зазвичай, шорстка поверхня, моделюється як сукупність блискучих мікрограней, орієнтованих у різних напрямках. Кожна мікрогрань представляє собою дзеркальну точку поверхні та відбиває падаюче світло [1].

Базовими ДФВЗ, які є основою поширених у використанні сучасних моделей освітлення, можна вважати такі двонаправлені функції, як модель відбиття Ламберта, модель Фонга, модель Блінна-Фонга та модель Шліка. Такі функції враховують загальні оптичні властивості об'єктів, однак нерідко є недостатніми для реалістичного відтворення деяких матеріалів.

Було розроблено множину нових двонаправлених функцій відбивної здатності, які отримано внаслідок апроксимацій, додавання нових коефіцієнтів і зміни методів обчислень оптичних властивостей поверхонь різних об'єктів, тощо. Серед них анізотропна модель Варда, модель Кука-Торренса, Торренса-Спарроу, модель Ашикміна-Ширлі, Орена-Неєра, метод Монте-Карло, моделі Мінаерта, Лебедева, моделі, що враховують хвильову природу світла, наприклад КМВК, та чимало інших, що є менш поширеними у використанні, однак не менш важливими при вирішенні конкретних задач моделювання складних поверхонь [3]. Розглянемо деякі такі моделі освітлення.

Для побудови анізотропних поверхонь часто використовують модель Варда, яка, як і моделі Фонга, Блінна та ін., обчислює спекулярну складову світла за законом Ламберта. Однак дифузна складова в даній моделі має більш складну залежність, яка фізично є більш правильною і дозволяє моделювати матеріали, що мають анізотропну поверхню [4]. Формула виглядає так:

$$k_{spec} = \frac{\rho_s}{\sqrt{(\vec{n} \cdot \vec{l})(\vec{n} \cdot \vec{v})}} \frac{\vec{n} \cdot \vec{l}}{4\pi\alpha_x\alpha_y} e^{-2 \frac{\left(\frac{\vec{h} \cdot \vec{x}}{\alpha_x}\right)^2 + \left(\frac{\vec{h} \cdot \vec{y}}{\alpha_y}\right)^2}{1 + (\vec{h} \cdot \vec{n})}}$$

де  $n$  – нормаль до поверхні,  $h$  – бісектор векторів від джерела світла  $l$  та спостерігача  $v$ ,  $\rho_s$  – коефіцієнт шорсткості поверхні.

В анізотропній моделі Варда для врахування форми відблиску введено також два коефіцієнта  $\alpha_x$  та  $\alpha_y$ , які відповідають за форму відблиску по осі X і Y.

Ще однією поширеною у використанні моделлю освітлення є модель Кука-Торренса. При роботі із шорсткими поверхнями дана модель враховує кут між мікрогранню та нормаллю до поверхні  $\delta$ , який характеризує середньоквадратичний нахил мікрограні. Розподіл орієнтації мікрограней  $D(\delta)$  задає частину мікрограней, що лежать під кутом  $\delta$  до поверхні, та визначається, як розподіл Бекмана:

$$D(\delta) = \frac{1}{4m^2 \cos^4(\delta)} \cdot e^{-[tg(\delta)/m^2]},$$

де  $m$  – коефіцієнт ступеню шорсткості поверхні, що зазвичай варіюється в значеннях [0,2; 0,6]. Розподіл орієнтації мікрограней зменшується при збільшенні кута  $\delta$ . Окрім розподілу Бекмана, модель освітлення Кука-Торренса містить геометричну складову, яка враховує екранування та затемнення точок офсетної поверхні й визначає інтенсивність білкової складової, що формується з неекранованого світла та затемненого відповідно:

$$G_m = \frac{2 \cdot (n \cdot h) \cdot (n \cdot v)}{(h \cdot n)}, \quad G_s = \frac{2 \cdot (n \cdot h) \cdot (n \cdot l)}{(h \cdot n)}.$$

Таким чином, загальна геометрична складова визначається за формулою:

$$G = \min(1, G_m, G_s).$$

Оскільки блискучі мікрограні поверхні не є ідеальним дзеркалом, вони відбивають лише частину падаючого світла, яка визначається коефіцієнтом Френеля. Загальна формула для обчислення кількості відбитого світла за моделлю освітлення Кука-Торренса має вигляд:

$$K = \frac{F \cdot G \cdot D}{(v \cdot n)(l \cdot n)},$$

де добуток  $(v \cdot n)$  в знаменнику встановлює регулювання інтенсивності світла.

Об'єктом, що моделюється, у комп'ютерній графіці, може виступати не лише фізичний матеріал. Часто завдання полягає у формуванні реалістичної поверхні шкіри людини. Це поширене питання у галузі ігрової індустрії, мультиплікації, а також медицині тощо. При цьому важливим питанням залишається можливість використовувати обрані засоби у реальному часі. Для вирішення даних задач ефективним можна вважати використання методу Монте-Карло, який прийнято вважати чисельним алгоритмом, що генерує та використовує випадкові величини для вирішення різних завдань за допомогою моделювання та подальшого обчислення імовірнісних характеристик, виходячи з отриманих вибірок [5]. Вперше для моделювання шкіри цей метод застосували в галузі досліджень раку. Було розроблено модель стійкого легкого розповсюдження світла в багатошаровій тканині.

Варто зазначити, що потрапляючи на поверхню шкіри, промінь світла частково дзеркально відбивається поверхнею епідермісу, а частково заломлюється і передається в шкіру. При цьому відбивається 5% падаючого світла і регулюється рівнянням Френеля, решта поглинається епідермісом і транспортується у внутрішні шари, поступово ослаблюючись розсіюванням. Розсіяні фотони поширюються у випадкових напрямках, сприяючи дифузному розподілу світла в тканині. Випадкові напрями розповсюдження фотонів обчислюються функцією фази розсіювання за допомогою генератора псевдовипадкових чисел за методом Монте-Карло. Таким чином досягається результат відтворення реалістичного відбиття та розповсюдження світла від шкіри, що максимально близьке до аналогічного природного явища [6]. На рис. 3 зображено результати моделювання людського обличчя за допомогою дистрибутивної функції Фонга (а), моделі освітлення Ламберта (б) та з використанням методу Монте-Карло (в).

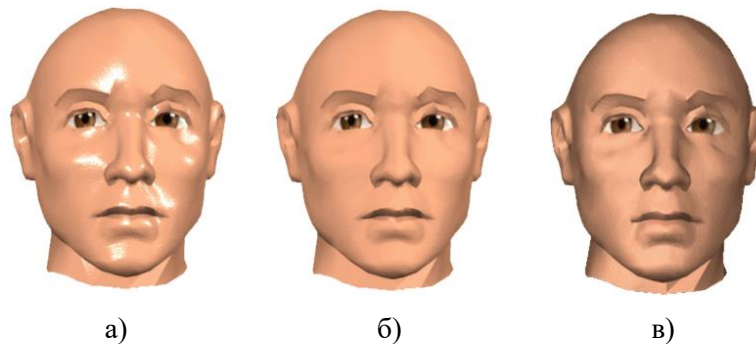


Рисунок 3. – Моделювання обличчя людини а) за ДФВЗ Фонга; б) за моделлю освітлення Ламберта; в) за методом Монте-Карло.

Генератор псевдовипадкових чисел використовується для вибірки дискретних подій з розподілу ймовірностей, отриманих від коефіцієнтів взаємодії та фазової функції. Тим не менш метод Монте-Карло залишається доволі затратним та вимогливим до ресурсів.

### Висновки

Отже, сьогодні існує широкий спектр можливостей для реалістичного відтворення різних складних поверхонь. Усі вони базуються на роботі із оптичними властивостями того чи іншого фізичного об'єкта.

В даній статті було розглянуто три поширених у використанні методи – модель Варда, Кука-Торренса та метод Монте-Карло. Кожен з них має свої особливості у визначенні відбивної здатності об'єктів.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Чан А. Л. В. Аналіз моделі відбивної здатності поверхні кука-торренса [Текст] / А. Л. В. Чан, О. Н. Романюк // Тези доповідей XI Міжнародної науково-технічної конференції «Інформаційно-

комп'ютерні технології – 2020 (ІКТ-2020)», м. Житомир, 09 - 11 квітня 2020 р. – Житомир: Житомирська політехніка, 2020. – С. 103-104.

2. Романюк О. Н. Особливості визначення спекулярної складової кольору з використанням нової дистрибутивної функції відбивної здатності поверхні [Електронний ресурс] / О. Н. Романюк, Р. Ю. Довгалюк, Д. Л. Благодир // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Сер. : Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка. - 2012. - Вип. 16. - С. 95-100.

3. Романюк О. Н. Класифікація дистрибутивних функцій відбивної здатності поверхні / О. Н. Романюк // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Сер. : Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка. - 2008. - Вип. 9. - С. 145-151.

4. Чан А. Л. В. Аналіз моделі Варда [Електронний ресурс] / Чан А. Л. В., Романюк О. Н. // Матеріали конференції «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи» ВНТУ, Вінниця, 2020 р. – Електрон. текст. дані. – 2020. – Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/mn/mn2020/paper/view/10427>

5. И. Ю. Сесин, В. В. Нечаев, «Сравнительный анализ генераторов псевдослучайных чисел для решения задач рендеринга методом Монте-Карло», International Journal of Open Information Technologies ISSN: 2307-8162 vol. 6, no.10, 2018, p. 34-40.

6. Чан А. Л. В. Аналіз відтворення поверхні шкіри людини використанням дистрибутивних функцій відбивної здатності [Текст] / Чан А. Л. В., Романюк О. Н. // Матеріали ІХ Міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Молодь у світі сучасних технологій», Херсон, 4-5 червня 2020 р. – 2020. – С. 230-233.

**Чан Аліна Ле Ванівна** – студентка 4 курсу Вінницького національного технічного університету, факультет інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії, кафедра програмного забезпечення, м. Вінниця, e-mail: [kovychwriter@gmail.com](mailto:kovychwriter@gmail.com)

**Романюк Олександр Никифорович** – д.т.н., професор, завідувач кафедри програмного забезпечення Вінницького національного технічного університету, факультет інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії, м. Вінниця, e-mail: [rom8591@gmail.com](mailto:rom8591@gmail.com)

**Chan Alina L. V.** – 4th year student of Vinnytsia National Technical University, Faculty of Information Technologies and Computer Engineering, Department of Software, Vinnytsia, e-mail: [kovychwriter@gmail.com](mailto:kovychwriter@gmail.com)

**Romaniuk Oleksandr N.** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Software Department of Vinnytsia National Technical University, Faculty of Information Technologies and Computer Engineering, Vinnytsia e-mail: [rom8591@gmail.com](mailto:rom8591@gmail.com)