

УДК 004.92

Є.К. ЗАВАЛЬНЮК, О.Н. РОМАНЮК, С.В. ПАВЛОВ, Р.П. ШЕВЧУК, Т.І. КОРОБЕЙНИКОВА

РОЗРОБКА ФІЗИЧНО КОРЕКТНОЇ МОДЕЛІ ВІДБИТТЯ ДРУГОГО СТЕПЕНЯ

*Вінницький національний технічний університет, Хмельницьке шосе 95, 21021, Вінниця, Україна,
e-mail: rom8591@gmail.com*

*Західноукраїнський національний університет, Тернопіль, Україна
Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна*

Анотація. У статті описано розробку фізично коректної моделі відбиття світла на основі модифікованої моделі Шліка. Проаналізовано переваги та недоліки основних емпіричних моделей відбиття. Обґрунтовано необхідність розробки нових фізично коректних двопроменевих функцій відбивної здатності. Описано основні етапи обчислення нормуючого коефіцієнта для модифікованої моделі Шліка. Обчислено ідеальні значення нормуючого коефіцієнта відносно коефіцієнта спекулярності поверхні n . Отримано формулу залежності значення коефіцієнта від n . Обчислено значення абсолютної похибки напівсферичної інтегральної відбивної здатності від 1 для проміжку $n \in [2, 1000]$.

Ключові слова: двопроменева функція відбивної здатності, фізично коректні моделі відбиття світла, закон збереження енергії..

Abstract. In this article the development of physically correct light reflectance model which is based on the modified Schlick model is discussed. The advantages and disadvantages of main empirical reflectance models are discussed. The necessity of development of the new physically correct bidirectional reflectance distribution functions is shown. The main steps of normalizing coefficient calculation for the modified Schlick model are discussed. The ideal normalizing coefficient values depending on the surface specular coefficient n were calculated. The formula of dependence between coefficient value and n was discovered. The absolute error value between 1 and hemispherical integral reflectivity value was calculated for the interval $n \in [2, 1000]$.

Keywords: bidirectional reflectance distribution function, physically correct light reflectance models, energy conservation law.

DOI: 10.31649/1681-7893-2022-44-2-19-25

ВСТУП

Засоби графічної візуалізації [1,2,3] використовуються практично в усіх сферах діяльності людини, оскільки в цьому випадку найпростіше організувати ефективний інтерфейс між комп'ютером та людиною. Це пояснюється високою інформативністю графічних зображень і оперативністю сприйняття графічної інформації людиною через зоровий інформаційний канал. На даному етапі розвитку комп'ютерної графіки особливу увагу приділяють тривимірним зображенням, що найбільш адекватно відтворюють процеси або об'єкти. При синтезі графічних сцен необхідно вирішувати двоєдину задачу – забезпечення високої реалістичності генерації графічних об'єктів і досягнення прийнятної для даного застосування часу формування сцени [4, 5, 6, 7].

Важливим для формування тривимірних сцен є дотримання фізичних законів при відтворенні графічних об'єктів, що дозволить підвищити реалістичність формування графічних зображень.

1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

За оптичні властивості поверхні відповідає двопробенева дистрибутивна функція відбивної здатності ДФВЗ (BRDF – Bidirectional Reflectance Distributive Function) [1, 2, 3, 5, 6]. Вона є моделлю освітлення [2] та визначає, яку частку випромінювання, що надійшло в точку з напрямку \vec{L} , буде відбито в напрямку \vec{V} (рис. 1). ДФВЗ є функцією кількох змінних

$$BRDF = f_{\lambda}(\alpha, \mu_1, \varphi, \mu_2, x) = f(\vec{L}, \vec{V}, \vec{N}),$$

де λ – довжина хвилі, $(\alpha, \mu_1), (\varphi, \mu_2)$ – параметри, що визначають відповідно напрямок падаючого світла і напрямок спостереження.

Інтенсивність випромінювання I в заданому напрямку визначається як величина променевого потоку через ділянку ds_{\perp} (рис. 1), перпендикулярну променю, в межах диференціального тілесного кута $d\omega$, який дорівнює площі нескінченно малого елемента на поверхні одиничної сфери

$$I = \frac{d\Phi}{ds_{\perp} d\omega} = \frac{d\Phi}{ds \cos \alpha d\omega}.$$

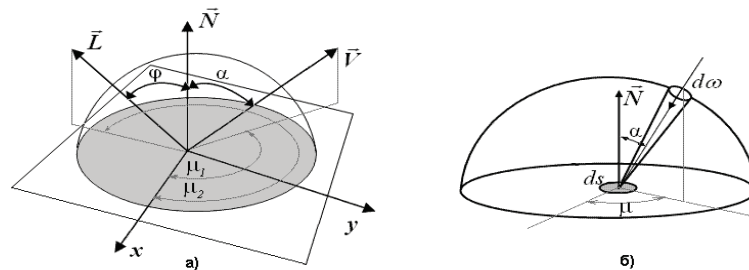


Рисунок 1 – Вихідні дані для розрахунку ДФВЗ

ДФВЗ може бути розрахована за формулою [2, 3]

$$BRDF = dI(\vec{V}_i) / I(L_i) \cos \alpha d\omega_i.$$

У комп'ютерній графіці найчастіше використовують модель визначення спекулярної складової кольору Б. Фонга [1, 2, 3], що має вигляд

$$I_s = I \cdot \varpi(\varphi, \lambda) \cdot \cos^n \psi,$$

де $\varpi(\varphi, \lambda)$ – крива відбиття, що визначає відношення дзеркально відбитого світла до падаючого як функцію кута падіння θ і довжини хвилі λ , n – коефіцієнт спекулярності поверхні [4, 5, 6].

Функція $\varpi(\varphi, \lambda)$ складна, тому її у більшості випадків заміняють константою k_s , яку визначають експериментально або вибирають з естетичних міркувань. У ДФВЗ Фонга [1,2] $\cos \psi = \vec{V} \cdot \vec{R}$, де $\vec{R} = 2 \cdot (\vec{L} \cdot \vec{N}) \cdot \vec{N} - \vec{L}$. Вектор \vec{R} називають вектором дзеркального відбиття [1]. У дистрибутивній функції Блінна [1], яка історично з'явилася пізніше ДФВЗ Фонга, замість $\cos \psi$ використовують $\cos \gamma = \vec{N} \cdot \vec{H}$, де $\vec{H} = (\vec{L} + \vec{V}) / |\vec{L} + \vec{V}|$. У сучасних засобах тривимірної графіки широкого поширення отримала дистрибутивна функція Шліка [3], яка має такий вигляд: $\cos \gamma / (n - n \cos \gamma + \cos \gamma)$. Ця ДФВЗ має значно меншу обчислювальну складність порівняно з функціями Фонга та Блінна. На жаль, наявність операції ділення значно ускладнює апаратну реалізацію функції. Аналіз показав, що дистрибутивна функція Шліка відтворює епіцентр відблиску з максимальною відносною похибкою, що не перевищує 10%. За цією ділянкою спостерігається суттєве розходження з результатами, отриманими за моделлю освітлення Блінна. Недоліком ДФВЗ Шліка є те, що дистрибутивна

МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ І ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ТА СИГНАЛІВ

функція в зоні формування блюмінга падає до нульового рівня надзвичайно повільно, що обумовлює неприродне освітлення графічного об'єкта та додаткові обчислення за рахунок збільшення інтервалу зміни аргументу.

ДФВЗ Гауса [2] виду $e^{-\frac{n \cdot (\angle(\vec{H}, \vec{L}))^2}{2}}$ є достатньо точною, реалістично відтворює як зону епіцентра відблиску, так і його затухання (блюмінгу), однак не отримала широкого поширення, оскільки передбачає використання обернених функцій для обчислення кута між векторами нормалей.

У функції спекулярного відбиття Блейка [2,3] використовується кусково-квадратична апроксимація ДФВЗ Фонга на трьох інтервалах. Модель передбачає виконання операцій множення, ділення й додавання, оперує з кутом, розрахунок якого потребує великих витрат часу та має низьку точність.

Р.Ф. Ліон [2], запропонував функцію $\cos^n \gamma$ розкласти у ряд Тейлора і замість кута між відбитим напрямком світла та спостерігачем використати довжину хорди між векторами. В результаті отримано ДФВЗ типу $(1 - n(\angle(\vec{H}, \vec{L}))^2 / 2^{w+1})^{2w}$, де w вибирають залежно від необхідної точності апроксимації. Заміна кута на довжину хорди не сильно позначається на точності розрахунків тільки для невеликих значень кутів.

Авторами розроблено модифіковану модель Шліка, яка має такий вигляд [8]

$$\frac{2 \cos x}{\left(1 + \frac{1}{4}\right) \left(n - n * \cos x + \left(1 + \frac{1}{4}\right) \cos x\right)^2}.$$

Доданок $\left(1 + \frac{1}{4}\right)$ легко знайти з використанням мікрооперацій додавання та зсуву.

У наведених моделях не виконується закон збереження енергії [6]. Стосовно до ДФВЗ закон збереження енергії стверджує, що світлова енергія, що розсіюється поверхнею, не може перевищувати світлову енергію, що потрапила на поверхню.

ДФВЗ повинні задовольняти принцип симетричності Гельмгольца та збереження енергії. Принцип симетричності передбачає незмінність значення функції за умови зміни місцями вхідного й вихідного напрямку.

Таким чином актуальним є питання розробки нових ДФВЗ, які б забезпечували достатню точність відтворення всіх ділянок відблиску та була фізично коректною.

Мета статті – розробка фізично коректної модифікованої моделі Шліка.

2. ЗНАХОДЖЕННЯ ФОРМУЛИ НОРМУЮЧОГО КОЕФІЦІЄНТА ДЛЯ МОДИФІКОВАНОЇ МОДЕЛІ ШЛІКА

Умову дотримання закону збереження енергії можна виразити через вираз інтегралу

$$\int_{\Omega} f_r(\omega, \omega_r) * \cos(\theta) d\omega \leq 1,$$

де $d\omega$ – тілесний кут, обчислюється: $\sin \theta d\theta d\varphi$.

Здійснимо розрахунок нормуючого коефіцієнта для вдосконаленої моделі Шліка, з врахуванням якого модель відповідатиме зазначеній умові.

Позначимо шуканий коефіцієнт як $coef(n)$ і формуємо рівняння для розв'язку

$$coef(n) \int_{\Omega} f_r(\omega, \omega_r) * \cos(\theta) d\omega = 1$$

Підставляємо у виразі замість $f_r(\omega, \omega_r)$ формулу модифікованої моделі Шліка

$$coef(n) * \int_{\Omega} \frac{2 \cos(\theta)}{1.25(n - n * \cos(\theta) + 1.25 \cos(\theta))^2} \cos(\theta) d\omega = 1$$

МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ І ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ТА СИГНАЛІВ

Перейдемо до інтегралу у сферичній системі координат. Значення, за якого модифікована модель Шліка досягає нуля, приблизно становить $\frac{\pi}{2}$. Тоді отримуємо вираз

$$\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \frac{2 \cos(\theta)}{1.25(n - n * \cos(\theta) + 1.25 \cos(\theta))^2} \cos(\theta) \sin(\theta) d\theta d\varphi$$

Знайдемо значення визначеного інтегралу по $d\varphi$. Інтеграл набуває вигляду

$$2\pi \int_0^{\pi/2} \frac{2 \cos(\theta)}{1.25(n - n * \cos(\theta) + 1.25 \cos(\theta))^2} \cos(\theta) \sin(\theta) d\theta$$

Для виразу інтегралу введемо позначення $Int(n)$

$$Int(n) = \int_0^{\pi/2} \frac{2 \cos(\theta)}{1.25(n - n * \cos(\theta) + 1.25 \cos(\theta))^2} \cos(\theta) \sin(\theta) d\theta$$

Тоді рівняння для знаходження нормуючого коефіцієнта має вид

$$coef(n) * 2\pi * Int(n) = 1$$

З рівняння визначаємо нормуючий коефіцієнт $coef(n)$ для одного n за формулою

$$coef(n) = \frac{1}{2\pi * Int(n)}$$

Розраховуємо значення $coef(n)$ відповідно до кожного n на проміжку $n \in [1, 1000]$. Вибірку значень $coef(n)$ розміром 50 збережемо у текстовому файлі (рисунок 2). На основі розрахованих даних визначимо формулу залежності значення $coef(n)$ від n .

n , $coef(n)$
1, 0.419
2, 0.6
3, 0.765
5, 1.073
7, 1.367
9, 1.653
10, 1.793
30, 4.476
40, 5.779
50, 7.071
70, 9.634

Рисунок 2 – Частина розрахованих ідеальних значень коефіцієнтів для n

Для знаходження формули нормуючого коефіцієнта модифікованої моделі Шліка застосовано програмний засіб TuringBot. Як вхідні дані для розрахунку використано текстовий файл з вибіркою даних, метрикою обрано середнє квадратичне (RMS) (рисунок 3).

Input
Advanc

Input file

Target variable

Input variables Row number

Search options

Search metric

Train/test split

Test sample

Рисунок 3 – Вибір налаштувань для обчислення формули нормуючого коефіцієнта модифікованої моделі Шліка у TuringBot

Для вхідних даних у програмі отримано графік залежності ідеальних значень нормуючого коефіцієнта відносно n (рисунок 4, вісь абсцис – номер у вибірці, вісь ординат – значення коефіцієнта).

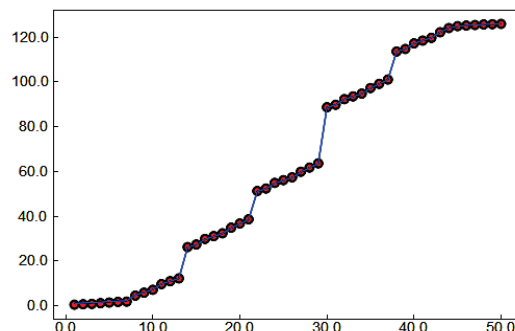


Рисунок 4 – Графік залежності ідеальних значень $coef(n)$ від зростання n

Е результаті отримано набір варіантів формули нормуючого коефіцієнта різних рівнів точності та складності (рисунок 5).

Solutions

Size	Error	Function
1	46,102308	62.2421
3	0,504588	0.126348*n
5	0,188049	0.12533*(6.22623+n)
8	0,111746	0.122027*(sqrt(n)+n)
10	0,063278	(0.124905-(1.12537/(-9.64838-n))) ² *n
12	0,020065	0.124723*n-(45.76/(n+46.5778))+1.31686

Рисунок 5 – Отримані варіанти формул нормуючого коефіцієнта для модифікованої моделі Шліка

МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ І ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ТА СИГНАЛІВ

Було обрано останню формулу зі списку, враховуючи точність і прийнятну складність обчислення. Отже, отримана формула нормуючого коефіцієнта для модифікованої моделі Шліка розраховується:

$$0.125n - \left(\frac{45.76}{n + 46.578} \right) + 1.317$$

На рисунку 6 зображено графік абсолютної похибки (Δ) виразу $coef(n) * 2\pi * Int(n)$ від 1. Максимальна похибка на проміжку $n \in [2, 1000]$ не перевищує $42 * 10^{-3}$.

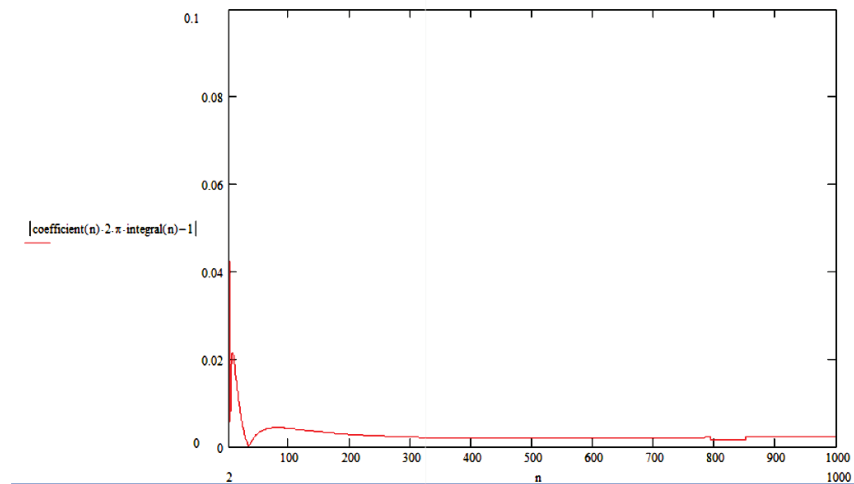


Рисунок 6 – Залежність Δ від n

ВИСНОВКИ

У статті розглянуто розробку фізично коректної моделі відбиття другого степеня. Розроблена модель відбивної здатності є точнішою порівняно з оригінальною моделлю Шліка, оскільки відповідає закону збереження енергії.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. О.Н. Романюк, та А. В. Чорний, *Високопродуктивні методи та засоби зафарбовування тривимірних графічних об'єктів*, Вінниця, Україна: УНІВЕСУМ-Вінниця, 2006.
2. О.Н. Романюк, *Комп'ютерна графіка. Навчальний посібник*. Вінниця: УНІВЕСУМ-Вінниця, 2001.
3. О.Н. Романюк, "Класифікація дистрибутивних функцій відбивної здатності поверхні", *Наукові праці Донецького національного технічного університету. Сер.: Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка*. Вип. 9. с. 145-151, 2008.
4. O. Romanuyk, and A. Chernij, "Methods for Specular Color Component Accelerate Calculation", *IEEE Workshop on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing systems: Technology and Applications*. Sofia, pp. 615— 619, 2005.
5. С.О. Романюк, С.В. Павлов та І.В. Абрамчук. "Модель для відтворення спекулярної складової кольору при формуванні високореалістичних біомедичних зображень", *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах* №3, 2016. С. 161-167.
6. Olexander N. Romanuyk, Sergii V. Pavlov, and etc. "A function-based approach to real-time visualization using graphics processing units", *Proc. SPIE 11581, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments 2020*, 115810E (14 October 2020); <https://doi.org/10.1117/12.2580212>.
7. Leonid I. Timchenko, Natalia I. Kokriatskaia, Sergii V. Pavlov, and etc. "Q-processors for real-time image processing", *Proc. SPIE 11581, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments 2020*, 115810F (14 October 2020); <https://doi.org/10.1117/12.2580230>.
8. С.К. Завальнюк, О.Н., Романюк, В.В. Войтко, О.В. Романюк, А.В. Снігур. Розробка модифікованої моделі Шліка для визначення спекулярної складової кольору, *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*, 2022, № 3, -С. 4-12.

REFERENCES

1. O. N. Romanyuk, and A. V. Chorny, High-performance methods and tools for painting three-dimensional graphic objects, Vinnytsia, Ukraine: UNIVESUM-Vinnytsia, 2006.
2. O. N. Romaniuk, Computer graphics. Tutorial. Vinnytsia: UNIVESUM-Vinnytsia, 2001.
3. O. N. Romaniuk, "Classification of distribution functions of surface reflectivity", Scientific works of Donetsk National Technical University. Ser.: Informatics, cybernetics and computer technology. Vol. 9. p. 145-151, 2008.
4. O. Romanuyk, and A. Chernij, "Methods for Specular Color Component Accelerated Calculation", IEEE Workshop on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing systems: Technology and Applications. Sofia, pp. 615—619, 2005.
5. S.O. Romanyuk, S.V. Pavlov and I.V. Abramchuk. "A model for reproducing the specular component of color in the formation of highly realistic biomedical images", Measurement and computing technology in technological processes No. 3, 2016. P. 161-167,
6. Olexander N. Romanyuk, Sergii V. Pavlov, and etc. "A function-based approach to real-time visualization using graphics processing units", Proc. SPIE 11581, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments 2020, 115810E (14 October 2020); <https://doi.org/10.1117/12.2580212>.
7. Leonid I. Timchenko, Natalia I. Kokriatskaia, Sergii V. Pavlov, and etc. "Q-processors for real-time image processing", Proc. SPIE 11581, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments 2020, 115810F (14 October 2020); <https://doi.org/10.1117/12.2580230>.
8. E. K. Zavalnyuk., O. N. Romanyuk., V. V. Voitko, O. V. Romanyuk, A. V. Snigur. Development of a modified Schlick model for determining the specular component of color, Information technologies and computer engineering, 2022, no. 3, P. 4-12.

Надійшла до редакції 25.09.2022р.

ЗАВАЛЬНЮК ЄВГЕН КОСТЯНТИНОВИЧ – студент, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна, [e-mail: qq9272627@gmail.com](mailto:qq9272627@gmail.com)

РОМАНИУК ОЛЕКСАНДР НИКИФОРОВИЧ – д.т.н., професор, завідувач кафедри програмного забезпечення, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна, [e-mail: rom8591@gmail.com](mailto:rom8591@gmail.com)

ПАВЛОВ СЕРГІЙ ВОЛОДИМИРОВИЧ – д.т.н., професор кафедри біомедичної інженерії та оптико-електронних систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна, [e-mail: psv@yntu.edu.ua](mailto:psv@yntu.edu.ua)

ШЕВЧУК РУСЛАН ПЕТРОВИЧ – к.т.н., доцент кафедри комп'ютерних наук, Західноукраїнський національний університет, Тернопіль, Україна, [e-mail: rsh@wunu.edu.ua](mailto:rsh@wunu.edu.ua)

КОРОБЕЙНИКОВА ТЕТЯНА ІВАНІВНА - к.т.н., доцент кафедри безпеки інформаційних технологій, Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна, [e-mail: tetianatroianovska@gmail.com](mailto:tetianatroianovska@gmail.com)