

Є. К. Завальнюк; О. Н. Романюк, д-р техн. наук, проф.; І. А. Сацюк

МОДИФІКОВАНА МОДЕЛЬ ВІДБИТТЯ ШЛІКА

У статті запропоновано нову двопротеневу функцію відбивної здатності. Двопротеневі функції відбивної здатності визначають, яка частка випромінювання відбивається у напрямку до ока спостерігача. Ці функції використовуються для відтворення відблисків на поверхнях тривимірних об'єктів. Найбільш поширеними у високопродуктивних системах рендерингу є моделі відбиття Фонга та Блінна. Їхнім недоліком є висока обчислювальна складність реалізації при великих значеннях коефіцієнта спекулярності поверхні. Відомим апроксимаційним виразом є двопротенева функція відбивної здатності Шліка. Функція є обчислювально простим виразом першого степеня, однак характеризується високою похибкою відтворення зони блюмінгу відблиску. Запропоновано нову модель відбиття Шліка на основі кубічного поліному. Наведено обґрунтування отримання формули моделі на основі формування набору числових даних і їх обробки методом поліноміальної регресії. Наведено двовимірні й тривимірні графіки відносної і абсолютної похибок розробленої моделі порівняно з еталонною. Показано, що запропонована модель забезпечує точну апроксимацію еталонної моделі Блінна-Фонга у зонах епіцентру та блюмінгу відблиску порівняно з квадратичною та кубічною моделями відбиття, косинус-степенною моделлю відбиття восьмого степеня, а також з оригінальною моделлю відбиття Шліка. Проаналізовано рівень продуктивності використання запропонованої моделі шляхом розрахунку загальної кількості тактів операцій процесора AMD Zen 4. На основі розробленої моделі відбивної здатності поверхні у програмному засобі `Idx3d` проведено тестування запропонованої моделі з використанням тестових тривимірних фігур, що підтвердило достовірність проведених теоретичних досліджень. Показано, що запропонована модель відбиття світла забезпечує високореалістичну візуалізацію тривимірних сцен. Розроблена модель відбиття може бути використана у високопродуктивних і високореалістичних системах тривимірного рендерингу.

Ключові слова: рендеринг, двопротенева функція відбивної здатності поверхні, модель освітлення, модель відбиття Шліка, кубічна модель відбиття.

Вступ

Важливим завданням під час рендерингу тривимірних сцен [1 – 3] є високореалістичне відтворення візуальних особливостей об'єктів сцен. При цьому, рендеринг є найбільш обчислювально затратним етапом графічного конвеєра формування зображень. Визначення кольору у кожній точці поверхні об'єкта передбачає інтерполяцію й нормалізацію нормалей поверхонь, векторів до джерела освітлення та спостерігача, обчислення моделей відбиття світла від дифузних поверхонь і спекулярних поверхонь. Застосування найбільш складних моделей і алгоритмів під час рендерингу ускладнює високореалістичну візуалізацію сцени у реальному часі.

Наявні моделі й підходи до високопродуктивного рендерингу не завжди забезпечують достатньо високий рівень реалістичності тривимірних зображень. Тому актуальною є розробка моделей для високореалістичного та високопродуктивного рендерингу сцен, зокрема, простих моделей відбиття світла від поверхонь.

Метою цієї статті є розробка модифікації моделі Шліка для підвищення реалістичності формування відблисків на поверхнях об'єктів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

При розрахунку інтенсивності кольору у точці поверхні об'єкта враховуються окремі випадки відбиття світла [4] від неї. Дифузне відбиття світла [4] полягає у різносторонньому

відбитті променів від поверхні, що забезпечує видимість об'єкта. Цей тип відбиття світла є більш характерним для шорстких і матових поверхонь. Спекулярне відбиття світла [4] полягає у сконцентрованому навколо одного напрямку відбитті променів, що забезпечує формування відблисків на поверхнях об'єктів тривимірних сцен. Окрім того, обчислюється питома вага розсіяного світла [4] у кінцеву інтенсивність кольору пікселя. Ця складова подає відбите випромінювання від поверхонь інших об'єктів сцени.

Обчислення спекулярної складової інтенсивності кольору базується на розрахунку двопробових функцій відбивної здатності поверхні [4 – 7]. Двопробова функція відбивної здатності (ДФВЗ, англ. BRDF – bidirectional reflectance distribution function) [4 – 7] визначає, яка частка випромінювання відбивається від матеріалу у напрямку ока спостерігача або об'єктива камери.

ДФВЗ обчислюються згідно з формулою [7]:

$$\frac{dL_v}{dE_i},$$

де L_v – відбита яскравість у вихідному напрямку світла, E_i – опроміненість у вхідному напрямі світла.

Виділяються фізично-точні ДФВЗ, ДФВЗ на основі даних і феноменологічні ДФВЗ [4, 7].

Фізично-точні ДФВЗ [4, 7, 8] базуються на відтворенні поверхонь об'єктів як сукупності мікроскопічних дзеркальних ділянок. Окрім того, можуть враховуватись такі параметри, як довжина хвилі світла. Як правило, фізично-точні ДФВЗ є похідними від ДФВЗ Кука-Торренса:

$$\frac{DFG}{4 \cos \theta_i \cos \theta_o},$$

де D – функція розподілу мікрофасет, F – коефіцієнт Френеля, G – функція ослаблення світла.

D [4] визначає частку орієнтованих у напрямку напіввектора мікрофасет, F [4] визначає залежність особливостей відбиття світла від кута його падіння, G [4] подає частку затінених або перекритих іншими мікрофасет.

Не зважаючи на забезпечення формування високореалістичних зображень, недоліком фізично-точних ДФВЗ є те, що вони не завжди можуть бути застосовані у графічних системах реального часу.

ДФВЗ на основі даних [7] полягають у збереженні великих таблиць вимірів значень моделей відбиття. Для ефективнішого використання вимірних значень, таблиці значень подаються за допомогою спеціальних математичних підходів, наприклад, як зважені добутки або суми функцій, сферичні гармоніки, вейвлети. Прикладом ДФВЗ на основі даних є ДФВЗ Матусіка, де за допомогою спеціальних лінійних і нелінійних підходів було зменшено розмірність таблиці вимірних значень для 130 матеріалів. ДФВЗ на основі даних характеризуються великою обчислювальною складністю та високими вимогами до виділення пам'яті.

Феноменологічні ДФВЗ [7] є емпіричними та простими виразами для подання відбивних властивостей широких груп матеріалів. Оскільки такі моделі є нескладними, вони широко використовуються у високопродуктивних системах рендерингу.

Основною феноменологічною ДФВЗ є функція Блінна-Фонга (f_b) [4, 9], що розраховується за формулою:

$$\cos(x)^n,$$

де n – коефіцієнт спекулярності поверхні, що визначає форму спекулярного відблиска на поверхні об'єкта, $n \in [1, 1000]$.

У якості кута x може бути використаний кут ψ між вектором до спостерігача \vec{V} та вектором дзеркального відбиття світла \vec{R} ($\vec{R} = 2(\vec{L} \cdot \vec{N})\vec{N} - \vec{L}$, \vec{N} – нормаль, \vec{L} – вектор освітлення), а також кут γ між \vec{N} і напіввектором \vec{H} ($\vec{H} = (\vec{L} + \vec{V}) / |\vec{L} + \vec{V}|$) (рис. 1).

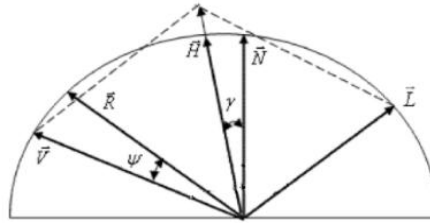


Рис. 1. Вектори для обчислення ДФВЗ Блінна-Фонга [4]

Відносно велике значення степеня n суттєво підвищує складність обчислення функції та не дозволяє ефективно здійснити її апаратну реалізацію.

До апроксимаційних моделей ДФВЗ Блінна-Фонга належать квадратична ДФВЗ [10], кубічна ДФВЗ [10, 11], косинус-степенева ДФВЗ [12], ДФВЗ Гаусса [4], експоненціальна ДФВЗ Лагарде [13], ДФВЗ Шліка [14 – 16].

Квадратична ДФВЗ (f_{kv}) [10] забезпечує максимально просту апроксимацію ДФВЗ Блінна-Фонга виразом другого степеня. Однак, значення ДФВЗ занадто швидко спадають до нульового значення й стають від'ємними. Тому, необхідне здійснення відсікання негативних значень функції. Використовується вираз:

$$0.786n \cos(\gamma)^2 + (1 - 0.786n) \cos(\gamma).$$

Кубічна ДФВЗ [10, 11] дозволяє більш точно апроксимувати ДФВЗ Блінна-Фонга за допомогою використання коефіцієнтів A, B, C . Розрахунок цих коефіцієнтів є обчислювально складним, тому для використання моделі необхідним є виділення додаткових ресурсів пам'яті. Окрім того, необхідне обнулення значень ДФВЗ, що зростають після досягнення нульового рівня. Кубічна ДФВЗ (f_{kub}) обчислюється за формулою:

$$A \cos(\gamma)^3 + B \cos(\gamma)^2 + C \cos(\gamma),$$

де

$$A = \frac{LR(R-L) + GR(1-R) + LQ(L-1)}{L^3(R-R^2) + L^2(R^3-R) - LR^2(R-1)}, \quad B = \frac{GR(R^2-1) + LR(L^2-R^2) + LQ(1-L^2)}{L^3(R-R^2) + L^2(R^3-R) - LR^2(R-1)},$$

$$C = \frac{GR(R-R^2) + L^2Q(L-1) + LR(LR^2-L^2R)}{L^3(R-R^2) + L^2(R^3-R) - LR^2(R-1)}, \quad Q = \cos(t)^n = 0.5, \quad G = \cos(u)^n = \frac{1}{18}, \quad R = \cos(t), \quad L = \cos(u).$$

Косинус-степенева ДФВЗ [12] забезпечує високоточну апроксимацію ДФВЗ Блінна-Фонга на основі високопродуктивного обчислення виразу:

$$\left(\frac{n}{a}(\cos\gamma - 1) + 1\right)^a,$$

де a – число степеня 2.

Використання значень, як $a = 8$ (f_8), є компромісним відносно складності та точності розрахунку.

Однак, значення ДФВЗ зростає після досягнення нульового значення. Причому, розрахунок координати, після якої необхідне обнулення значень функції, є обчислювально складним.

Високоточна апроксимація ДФВЗ Блінна-Фонга досягається при використанні ДФВЗ Гаусса [4], яка обчислюється згідно з виразом:

$$e^{-\frac{n(\angle(\bar{H}, \bar{L}))^2}{2}}$$

Недоліком цієї ДФВЗ є наявність обчислювально складної операції знаходження арккосинуса кута між \bar{H}, \bar{L} .

Схожий апроксимаційний вираз було запропоновано С. Лагардом [13]. Причому, усувається необхідність обчислення арккосинуса кута. Вираз обчислюється:

$$e^{(n+0.775)(\cos \gamma - 1)}$$

Однак, залишається потреба у піднесенні e до високого степеня.

Відомим апроксимаційним виразом ДФВЗ Блінна-Фонга першого степеня є ДФВЗ Шліка [14 – 16] (f_s), що обчислюється за формулою:

$$\frac{\cos(x)}{n - n \cdot \cos(x) + \cos(x)}$$

ДФВЗ Шліка, не зважаючи на невелику обчислювальну складність, не дозволяє достатньо точно відтворити зону затухання відблиску.

Тому актуальною є розробка нової моделі відбиття світла.

Модифікація моделі відбиття Шліка

Апроксимаційний вираз ДФВЗ Блінна-Фонга на основі ДФВЗ Шліка (f_s) подамо у виді:

$$a \cdot f_s^3 + b \cdot f_s^2 + c \cdot f_s + d,$$

де a, b, c, d шукані поліноміальні коефіцієнти

Позначимо цей вираз як f_{bps} .

Сформуємо набір даних для підбору значень a, b, c, d на основі поліноміальної регресії. Для цього з використанням мови C# сформуємо текстовий файл, перша колонка X якого містить значення ДФВЗ Шліка, а друга колонка y – значення ДФВЗ Блінна-Фонга відносно $n \in [1, 1000]$ (крок – 1), $\theta \in [0, 1.57]$ (крок – 0.001 рад). Приклад сформованого набору даних наведено на рис. 2.

```
0.9999500004166653, 0.9999500004166653
0.9999395006100392, 0.9999395006100392
0.9999280008639958, 0.9999280008639958
0.9999155011900349, 0.9999155011900349
0.9999020016006562, 0.9999020016006562
0.9998875021093592, 0.9998875021093592
0.9998720027306434, 0.9998720027306434
0.9998555034800082, 0.9998555034800082
0.9998380043739528, 0.9998380043739528
0.9998195054299763, 0.9998195054299763
```

Рис. 2. Набір даних для підбору коефіцієнтів

Підбір коефіцієнтів здійснимо, використовуючи матричне рівняння поліноміальної регресії [17]:

$$\begin{bmatrix} N & \sum_{i=0}^N X_i & \sum_{i=0}^N X_i^2 & \sum_{i=0}^N X_i^3 \\ \sum_{i=0}^N X_i & \sum_{i=0}^N X_i^2 & \sum_{i=0}^N X_i^3 & \sum_{i=0}^N X_i^4 \\ \sum_{i=0}^N X_i^2 & \sum_{i=0}^N X_i^3 & \sum_{i=0}^N X_i^4 & \sum_{i=0}^N X_i^5 \\ \sum_{i=0}^N X_i^3 & \sum_{i=0}^N X_i^4 & \sum_{i=0}^N X_i^5 & \sum_{i=0}^N X_i^6 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} d \\ c \\ b \\ a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=0}^N y_i \\ \sum_{i=0}^N X_i y_i \\ \sum_{i=0}^N X_i^2 y_i \\ \sum_{i=0}^N X_i^3 y_i \end{bmatrix},$$

де N – кількість рядків сформованого набору даних, X_i – значення f_s , y_i – значення f_b . Розв'язавши рівняння, встановлюємо, що. $a = -1.631$, $b = 2.995$, $c = -0.374$, $d = 2.737 \cdot 10^{-3}$.

Отже, f_{bps} розраховується згідно з виразом:

$$-1.631 \cdot \left(\frac{\cos(x)}{n - n \cdot \cos(x) + \cos(x)} \right)^3 + 2.995 \cdot \left(\frac{\cos(x)}{n - n \cdot \cos(x) + \cos(x)} \right)^2 - 0.374 \cdot \frac{\cos(x)}{n - n \cdot \cos(x) + \cos(x)} + 2.737 \cdot 10^{-3}.$$

На рис. 3 наведено графіки f_{bps} , f_s , f_b при $n = 50$.

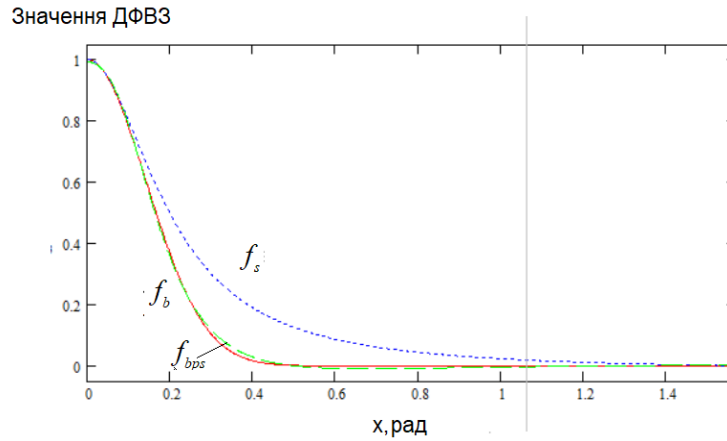


Рис. 3. Графіки f_{bps} , f_s , f_b при $n = 50$

Як видно з рис. 3, використання f_{bps} для апроксимації f_b дозволяє суттєво підвищити точність відтворення зони блюмінгу відблиска порівняно з f_s .

На рис. 4 наведено тривимірний графік f_{bps} відносно $n \in [1, 1000]$, $\theta \in [0, \pi/2]$.

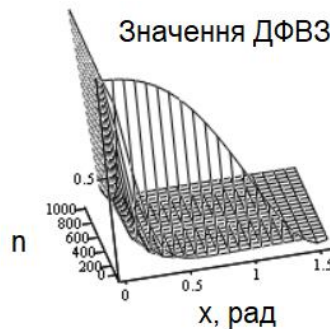


Рис. 4. Тривимірний графік значень f_{bps}

На рис. 5 зображено графіки максимальних відносних похибок δ між f_b і $f_s, f_8, f_{kv}, f_{kub}, f_{bps}$ у зоні епіцентру відблиску для $n \in [8, 1000]$.

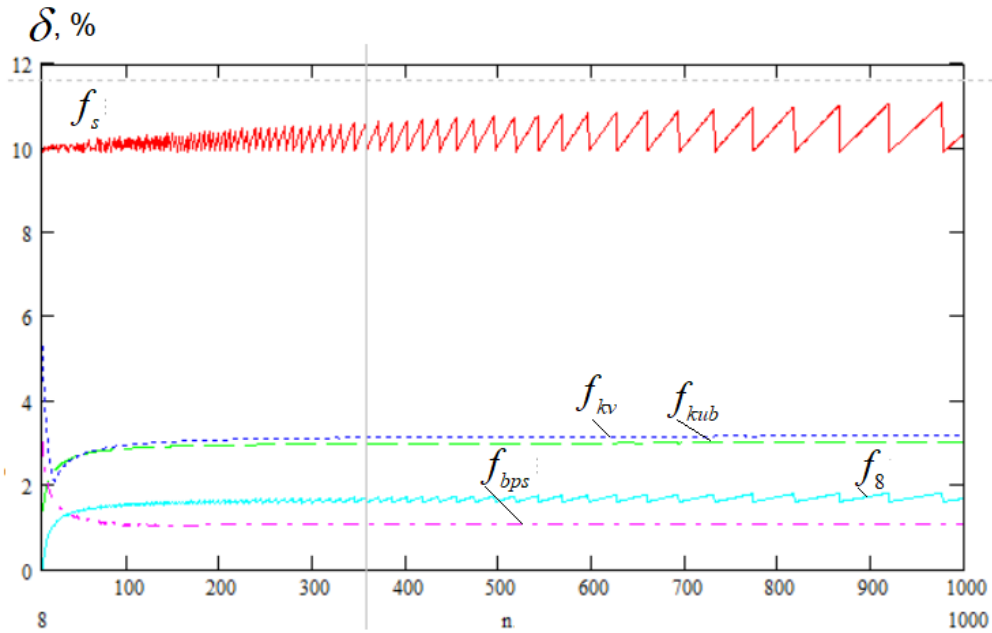


Рис. 5. Графік максимальних δ між f_b і $f_s, f_8, f_{kv}, f_{kub}, f_{bps}$ у зоні епіцентру відблиску

Як показано на рис. 5, f_{bps} на більшій частині проміжку $n \in [8, 1000]$ характеризується найменшою максимальною відносною похибкою апроксимації f_b (1.05%) у зоні епіцентру відблиску порівняно з $f_s, f_8, f_{kv}, f_{kub}$.

На рис. 6 наведено тривимірний графік δ f_{bps} від f_b відносно $n \in [8, 1000]$, $\theta \in [0, x_{per}]$ (x_{per} – найбільша координата точки перегину).

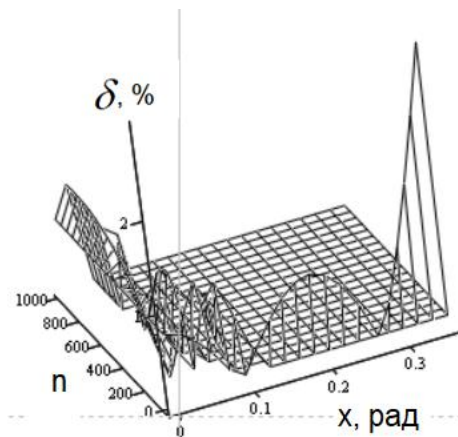


Рис. 6. Тривимірний графік δ між f_b і f_{bps} у зоні епіцентру відблиску

На рис. 7 наведено графіки максимальних абсолютних похибок Δ між f_b і $f_s, f_8, f_{kv}, f_{kub}, f_{bps}$ для $n \in [8, 1000]$.

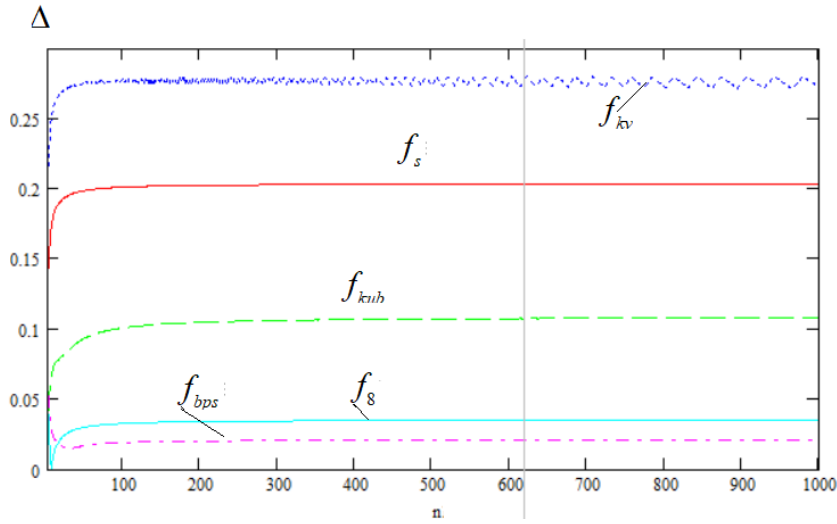


Рис. 7. Графік максимальних Δ між f_b і $f_s, f_8, f_{kv}, f_{kub}, f_{bps}$

Отже, f_{bps} характеризується найменшим значенням максимальної Δ від f_b (0.02) на більшій частині проміжку $n \in [8, 1000]$ порівняно з $f_s, f_8, f_{kv}, f_{kub}$.

На рис. 8 наведено тривимірний графік Δf_{bps} від f_b відносно $n \in [8, 1000]$, $\theta \in [0, \pi/2]$.

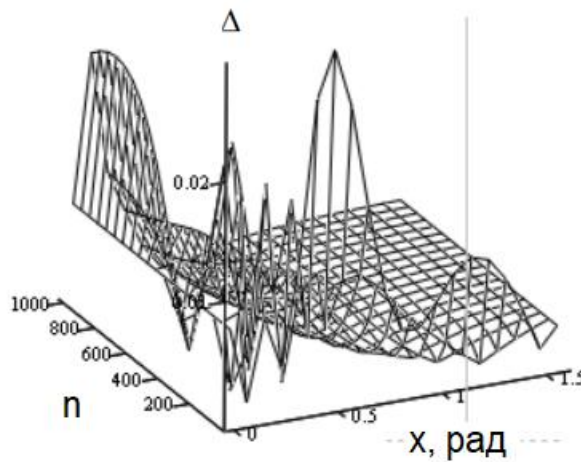


Рис. 8. Тривимірний графік Δ між f_b і f_{bps}

Винесши вирази обчислення f_s за дужки, отримуємо більш просту формулу обчислення f_{bps} :

$$\left(\frac{\cos(x)}{n - \cos(x)(n-1)}\right) \cdot \left(-0.374 + \left(\frac{\cos(x)}{n - \cos(x)(n-1)}\right) \cdot (2.995 - 1.631 \cdot \left(\frac{\cos(x)}{n - \cos(x)(n-1)}\right))\right) + 2.737 \cdot 10^{-3}$$

Порівняємо обчислювальні затрати та точність застосування отриманої формули f_{bps} з іншими апроксимаційними виразами Блінна-Фонга у таблиці 1. У таблиці розглянуто кількості операцій N_{op} різного типу для обчислення $f_s, f_8, f_{kv}, f_{kub}, f_{bps}$, відповідні сумарні кількості тактів операцій процесора AMD Zen 4 (2022) та максимальні відносні похибки апроксимації f_b у зоні епіцентру відблиска. Розглянуті переліки операцій включають операції для обнулення значень функцій.

Порівняння кількості операцій для апроксимаційних виразів Блінна-Фонга

Вираз	N_{op} множення	N_{op} ділення	N_{op} додавання	N_{op} інкремента	N_{op} порівняння	Кількість тактів всього	$\delta, \%$
f_s	1	1	2	0	0	15	11
f_8	4	1	0	2	0	24	1.8
f_{kv}	4	0	2	0	1	15	3
f_{kub}	5	1	2	0	0	27	3
f_{bps}	4	1	4	1	1	28	1.1

Порівняно з оригінальною функцією Шліка f_s , f_{bps} , попри удвічі більшу складність, забезпечує підвищення реалістичності відтворення відблисків на поверхнях об'єктів у 10 разів.

За допомогою програмного засобу `idx3d` було візуалізовано тестову фігуру «Динозавр» на основі f_{bps} . Результати візуалізації зображено на рис. 9.

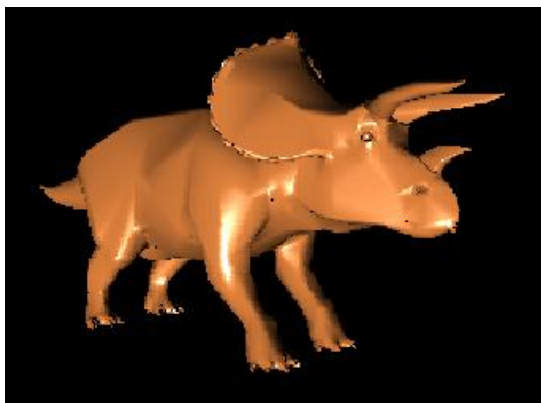


Рис. 9. Приклад формування тестової фігури «Динозавр» на основі f_{bps}

Отже, використання f_{bps} як апроксимаційної функції f_b забезпечує високореалістичну візуалізацію тривимірних об'єктів графічних сцен.

Висновки

У статті запропоновано модифікована модель Шліка для відбиття світла від поверхні, що базується на поліноміальній апроксимації еталонної моделі Блінна-Фонга. На відміну від оригінальної моделі Шліка, запропонована модель забезпечує високоточне відтворення як зони епіцентру відблиску, так і зони блюмінгу відблиску. Порівняно з моделлю Шліка, максимальна відносна похибка апроксимації моделі Блінна-Фонга у зоні епіцентру відблиску є меншою у 10 разів і максимальна абсолютна похибка апроксимації ДФВЗ Блінна-Фонга є меншою у 10 разів. Отримана модель відбиття світла призначена для використання у високореалістичних і високопродуктивних системах рендерингу.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Романюк О. Н., Романюк О. В., Чехмestрук Р. Ю. Комп'ютерна графіка: навчальний посібник. Вінниця : ВНТУ, 2023. 147 с.
2. Akenine-Möller T. Real-Time Rendering. Fourth edition. Boca Raton : Taylor & Francis, CRC Press, 2018. 1198. URL: <https://doi.org/10.1201/b22086> (date of access: 19.10.2024).
3. Shirley P., Marschner S. Fundamentals of Computer Graphics. S. 1. CRC Press LLC, 2021. 700 p.

4. Романюк О. Н. Класифікація дистрибутивних функцій відбивної здатності поверхні. *Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія : Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка*. 2008. Т. 9, № 132. С. 145 – 151.
5. Романюк О. Н., Завальнюк Є. К., Бобко О. Л. Аналіз нових моделей освітлення на основі двопробних функцій відбивної здатності. *Україна та світ: сучасні парадигми розвитку суспільства*. Харків, 2024. С. 16 – 39.
6. The Development of Physically Correct Reflectance Model Based on Logarithm Function. O. Romanyuk et al. *2023 13th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT)*, Wrocław. S. 1., 2023. P. 483 – 487.
7. Guarnera D., Guarnera C. *Virtual Material Acquisition and Representation for Computer Graphics*. Cham: Springer International Publishing, 2018. 93 p. URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-031-02595-2> (date of access: 19.10.2024).
8. Microfacet distribution function for physically based bidirectional reflectance distribution functions. O. N. Romanyuk et al. *Optical Fibers and Their Applications 2012*. Krasnobrod, Poland. S. L., 2013. URL: <https://doi.org/10.1117/12.2019338> (date of access: 19.10.2024).
9. Romanuyk O., Chernij A. Methods for Specular Color Component Accelerate Calculation. *2005 IEEE Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications*. Sofia, Bulgaria. 5 – 7 September 2005. S. 1., 2005. URL: <https://doi.org/10.1109/idaacs.2005.283058> (date of access: 19.10.2024).
10. Optical system visualization of combined reflectance model based on cubic and quadratic functions. Romanyuk O. et al. *Optical Fibers and Their Applications 2023*. Lublin, Poland. 11 – 14 September 2023. ed. by Z. Omiotek, A. Smolarz, W. Wójcik. S. 1., 2023. URL: <https://doi.org/10.1117/12.3023138> (date of access: 19.10.2024).
11. New surface reflectance model with the combination of two cubic functions usage. Romanyuk O. et al. *Informatyka, Automatyka, Pomiar w Gospodarce i Ochronie Środowiska*, 2023. Vol. 13, № 3. P. 101 – 106. URL: <https://doi.org/10.35784/iapgos.5327> (date of access: 19.10.2024).
12. Romanyuk A., Hast A., Lyashenko Y. Efficient Methods for Fast Shading. *Advances in Electrical and Computer Engineering*. 2008. Vol. 8, № 2. P. 82 – 85. URL: <https://doi.org/10.4316/aece.2008.02015> (date of access: 19.10.2024).
13. Lagarde S. Spherical Gaussian approximation for Blinn-Phong. *Phong and Fresnel*. URL: <https://seblagarde.wordpress.com/2012/06/03/spherical-gaussian-approximation-for-blinn-phong-phong-and-fresnel/> (date of access: 19.10.2024).
14. *Graphics gems IV*/ ed. by P. Heckbert. Boston : AP Professional, 1994. 575 p.
15. Розробка модифікованої моделі Шліка для визначення спекулярної складової кольору. Є. К. Завальнюк та ін. *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*. 2022. Вип. 55, №3. С. 4 – 12. URL: <https://doi.org/10.31649/1999-9941-2022-55-3-4-12> (дата звернення: 19.10.2024).
16. Розробка фізично коректної моделі відбиття другого степеня. Є. К. Завальнюк та ін. *Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології*. 2023. Вип. 44, № 2. С. 19 – 25. URL: <https://doi.org/10.31649/1681-7893-2022-44-2-19-25> (дата звернення: 19.10.2024).
17. Que A. Mathematics of Polynomial Regression. *Polynomial Regression PHP class*. URL: <https://polynomialregression.drque.net/math.html> (date of access: 19.10.2024).

Стаття надійшла до редакції 21.10.2024.

Стаття пройшла рецензування 25.11.2024.

Завальнюк Євген Костянтинович – аспірант кафедри програмного забезпечення.

Романюк Олександр Никифорович – д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри програмного забезпечення, e-mail: rom8591@gmail.com.

Сацюк Ірина Андріївна – студентка кафедри програмного забезпечення.

Вінницький національний технічний університет.