

УДК 004.92

¹Є. К. Завальнюк, магістрант,¹О. Н. Романюк, д-р техн. наук, проф.,¹А. В. Снігур, к.т.н, доц.,²Р. П. Шевчук, к.т.н, доц.¹Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна²Західноукраїнський національний університет, м. Тернопіль, Україна

qq9272627@gmail.com

rom8591@gmail.com

snigur.anatoliy@vntu.edu.ua

rsh@wunu.edu.ua

Розробка фізично коректної моделі відбиття світла на основі розрахунку кута між векторами

У статті запропоновано нову фізично коректну модель відбиття на основі розрахунку кута між векторами. Проаналізовано особливості основних груп двопробових функцій відбивної здатності. Моделі на основі розрахунку кута дозволяють апроксимувати еталонну модель Блінна функцією малого степеня. Для апроксимованої моделі Блінна підібрано поправочний коефіцієнт з метою підвищення реалістичності формування відблиску в зоні епіцентру. Розроблено комп'ютерну програму для підбору поправочного коефіцієнта модифікованої моделі. Запропоновано нормуючий коефіцієнт модифікованої моделі для дотримання закону збереження енергії. Сформовано набір вхідних даних для підбору формули нормуючого коефіцієнта у програмному засобі TuringBot. Обрано формулу нормуючого коефіцієнта з обчислених варіантів. Абсолютна похибка напівсферичної інтегральної відбивної здатності від 1 не перевищує $2 \cdot 10^{-2}$. Отримана фізично коректна модель відбивної здатності може бути використана у високореалістичних системах комп'ютерної графіки.

Ключові слова: двопробова функція відбивної здатності, нормуючий коефіцієнт, фізично коректні моделі, закон збереження енергії.

DOI: 10.31474/1996-1588-2023-1-36-45-50

Вступ

Серед форм подання інформації особливо ефективною є візуальна форма. Комп'ютерна графіка застосовується у багатьох сферах діяльності, оскільки забезпечує подання інформації для візуального сприйняття.

Основною задачею візуалізації у системах комп'ютерної графіки є максимально реалістичне відображення аспектів реальних об'єктів з використанням мінімального обсягу обчислювальних ресурсів.

Однією з умов формування реалістичних зображень є врахування фізичних законів у моделях відбиття світла. Кількість розсіяного світла не повинна перевищувати кількість світла, що впало на поверхню. Тому актуальною є розробка нових фізично коректних моделей відбивної здатності.

Метою роботи є розробка фізично коректної моделі відбивної здатності на основі розрахунку кута між векторами.

Огляд літератури

При визначенні інтенсивності кольору у точці під час зафарбовування поверхні

розраховуються три складові світла: розсіяна, дифузна, спекулярна [1].

Відбите від зовнішнього середовища світло становить розсіяну складову, відбите у різних напрямках – дифузну складову, відбите під визначеним кутом – спекулярну. За спекулярну складову відповідає двопробова функція відбивної здатності ДФВЗ (BRDF – Bidirectional Reflectance Distribution Function).

ДФВЗ визначають відбиту частку випромінювання, що надійшло з напрямку \vec{L} у напрямку \vec{V} (рисунок 1).

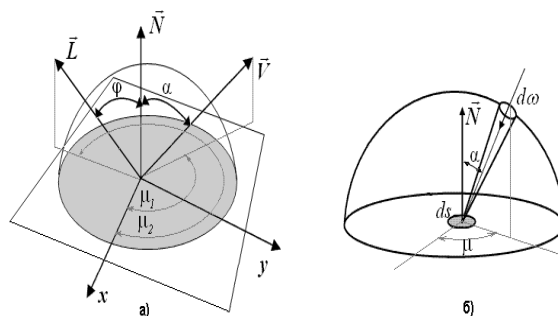


Рисунок 1 – Вихідні дані для розрахунку ДФВЗ

ДФВЗ розраховується за формулою:

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

де $d\omega$ – диференціальний тілесний кут, у межах якого падає променевий потік.

ДФВЗ поділяються на емпіричні та фізично точні [2].

Фізично точні ДФВЗ (моделі Уорда, Ашикмина-Ширлі, Кука-Торренса) більш реалістично відображають відбиття світла від поверхні, полягають у розподілі поверхні на мікрофасети, однак потребують значних обчислювальних витрат.

Емпіричні ДФВЗ є простими та отримані експериментальним способом. Емпіричні ДФВЗ можуть розраховуватись на основі косинуса кута (через скалярний добуток векторів) [3].

До найпопулярніших функцій відбивної здатності поверхні належить ДФВЗ Фонга, що розраховується за формулою [4]:

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

де n – коефіцієнт спекулярності поверхні;

x – кут між вектором відбиття світла \vec{V} і вектором дзеркального відбиття \vec{R} .

У ДФВЗ Блінна (позначимо F_B) замість косинуса кута між $\vec{V} \cdot \vec{R}$ використовують [5]:

$$\cos(x) = \vec{N} \cdot \vec{H}, \text{ де } \vec{H} = (\vec{L} + \vec{V})/|\vec{L} + \vec{V}|.$$

Перевагами ДФВЗ Блінна та Фонга є простота, можливість обчислення косинуса кута на основі скалярного добутку векторів. Недоліком є значна обчислювальна складність при зростанні степеня n .

Емпіричні функції на основі розрахунку кута між векторами характеризуються підвищеною складністю визначення значення кута, можливістю керування швидкістю затухання інтенсивності світла. Вимогою до даної групи ДФВЗ є використання невеликих степенів.

У загальному випадку ДФВЗ на основі визначення кута між векторами, що використовуються для апроксимації ДФВЗ Блінна, обчислюються [6]:

$$\cos(ax)^k,$$

де a – коефіцієнт;

k – степінь, $k < n$.

Перевагою підходу є можливість апроксимації ДФВЗ великого степеня n формулою малого степеня k .

Один із варіантів ДФВЗ на основі визначення кута (позначимо F_{or}) розраховується за формулою :

$$\cos(\sqrt{\frac{n}{k}} \cdot x)^k$$

На рисунку 2 зображено графіки F_{or} степенів 2, 5, що апроксимують F_B степеня 300.

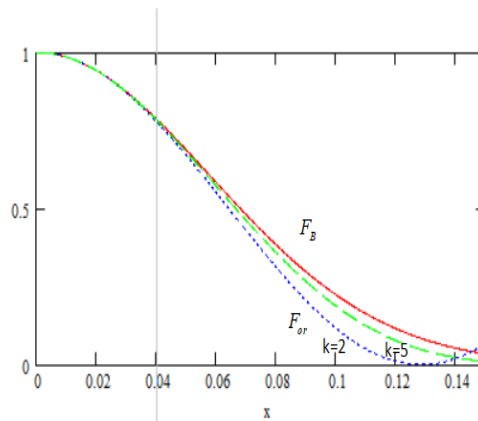


Рисунок 2 – Графіки F_{or} ($k = 2,5$), F_B при $n = 300$

Перевагою F_{or} є можливість простої апаратної реалізації. Існує потреба у розрахунку нормуючого коефіцієнта для дотримання закону збереження енергії та забезпеченні більш точного відтворення відблисків у зоні епіцентру.

Модифікація моделі відбивної здатності на основі розрахунку кута між векторами

Підберемо коефіцієнт для підкоренових змінних F_{or} з метою підвищення реалістичності відтворення епіцентру відблиску. Позначимо нову модель F_{mod} . Модель розраховується за формулою

$$\cos(\sqrt{\frac{a \cdot n}{k}} \cdot x)^k,$$

де a – шуканий коефіцієнт.

Можливі значення коефіцієнта a належать проміжку [0.05,2]. Крок між значеннями проміжку встановимо 0.05.

Для визначення значення коефіцієнта розроблено комп'ютерну програму. У циклі відносно кожного можливого значення a обчислюється функція відхилення (ErrorWithBlinn) між F_{mod} і F_B у зоні епіцентру. Обирається a , що забезпечує найменше значення функції відхилення. Граф-схему обчислення функції відхилення ErrorWithBlinn зображено на рисунку 3.

Масив можливих значень k (kvals) ініціалізується цілими числами проміжку [1,5], оскільки доцільний вибір найменших значень k замість відносно великих n . Для збереження кінцевого значення помилки використовується змінна errtotal.

У подвійному циклі відносно n і кута deg визначається значення F_B (змінна oldval). Для кожного n розраховано значення точки перегину F_B (змінна gran), що є граничною точкою розрахунку для зони епіцентру відблиску.

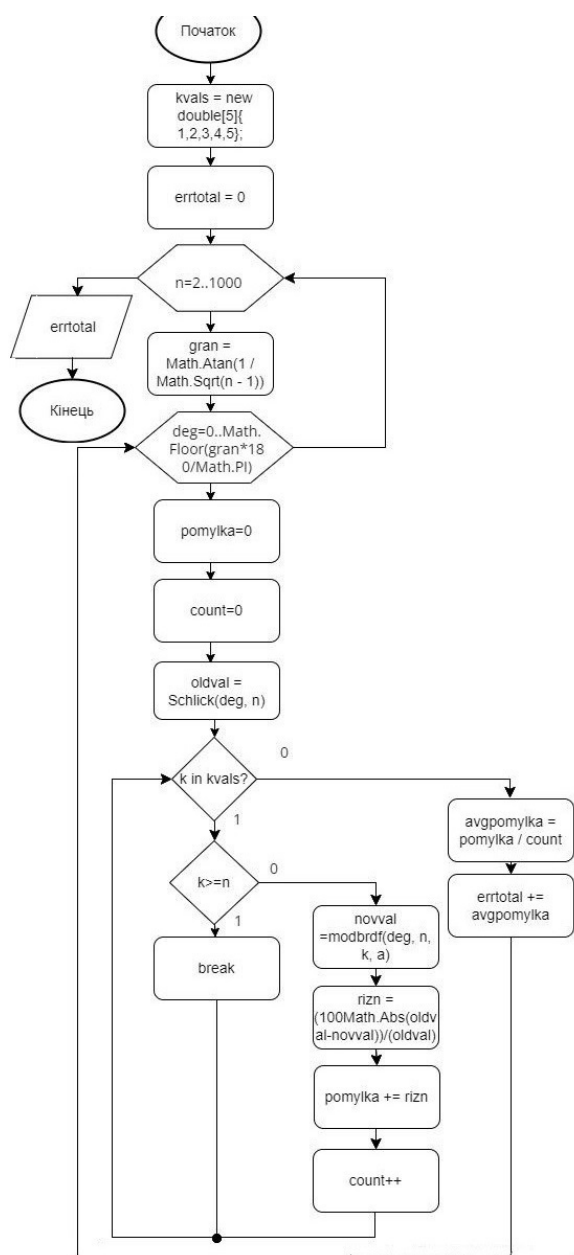


Рисунок 3 – Граф-схема обчислення функції відхилення ErrorWithBlinn між F_{mod} і F_B

Для масиву $k \in [1,5]$ всередині подвійного циклу визначаються значення F_{mod} (змінна novval). Якщо k досягає значення n , ітерація через масив k закінчується. У змінну rizn записуються відносні похибки між F_{mod} з різними k і F_B . Змінна pomylka є сумою rizn, avgpomylka – середнім значенням rizn. Середні значення відносної похибки додаються до кінцевого значення помилки errtotal.

В результаті роботи програми встановлено оптимальне значення a , що дорівнює 0.95. Тоді F_{mod} обчислюється за формулою:

$$\cos\left(\sqrt{\frac{0.95n}{k}}x\right)^k.$$

На рисунку 4 зображено графіки F_{mod} , F_{or} , F_{78} ($a = \frac{7}{8}$), F_B у зоні епіцентру відблиску при $n = 300, k = 3$.

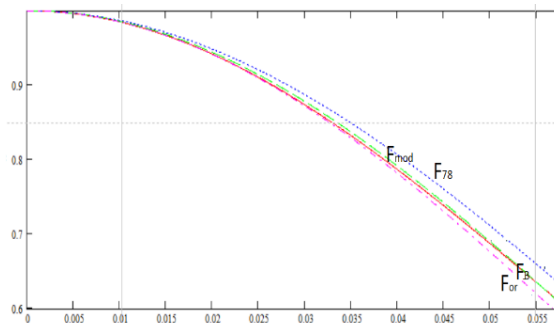


Рисунок 4 – Графіки F_{mod} , F_{or} , F_{78} , F_B у зоні епіцентру при $n = 300, k = 3$

На рисунку 5 зображено графіки максимальних відносних похибок (δ) у зоні епіцентру між F_{mod} , F_{or} , F_{78} і F_B відносно $n \in [6,1000], k \in [1,5]$.

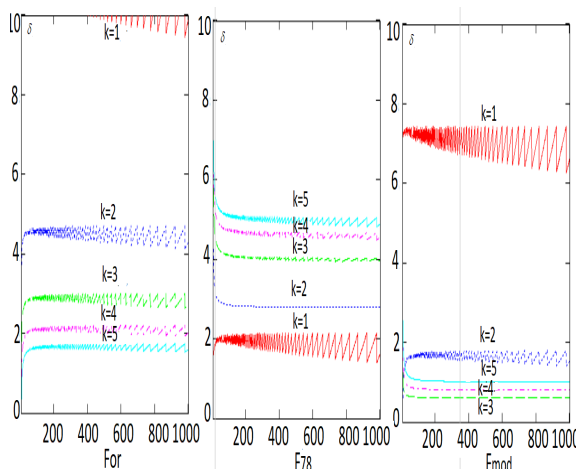


Рисунок 5 – Максимальні δ F_{or} , F_{78} , F_{mod} від F_B відносно $n \in [6,1000], k \in [1,5]$

Отже, для F_{or} найменша максимальна δ відносно $n \in [6,1000], k \in [1,5]$ при $k = 5$ (1.7%), для F_{mod} при $k = 3$ (0.8%).

F_{mod} забезпечує більш точне формування відблисків у зоні епіцентру відблиску, ніж F_{or} .

Знаходження формули нормуючого коефіцієнта для модифікованої моделі на основі розрахунку кута між векторами

Для забезпечення дотримання закону збереження енергії модель відбивної здатності поверхні повинна відповідати умові [7]:

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

де $d\omega$ – тілесний кут, обчислюється: $\sin(\theta)d\theta d\varphi$, $f_r(\omega, \omega_r)$ – двопротенева функція відбивної здатності поверхні.

Дотримання закону збереження енергії для моделі відбиття світла забезпечується за рахунок введення нормуючого коефіцієнта. Знайдемо вираз розрахунку нормуючого коефіцієнта для модифікованої моделі на основі розрахунку кута між векторами.

Рівняння для знаходження нормуючого коефіцієнта має вигляд [8]:

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

де $\text{coef}(n, k)$ – шуканий коефіцієнт.

Замість $f_r(\omega, \omega_r)$ підставляємо формулу моделі на основі розрахунку кута між векторами. Значення $\text{gran}(n, k)$ аргументу, при якому модель досягає нуля, розраховується за формулою:

$$\text{gran}(n, k) = \frac{1.612}{\left(\frac{n}{k}\right)^{\frac{1}{2}}}.$$

Рівняння у сферичній системі координат набуває вигляду:

$$\text{coef}(n, k) \int_0^{2\pi} \int_0^{\text{gran}(n, k)} \cos\left(\sqrt{\frac{0.95n}{k}}\theta\right)^k \times$$

$$\times \cos(\theta) \sin(\theta) d\theta d\varphi = 1.$$

Здійснюємо інтегрування лівої частини рівняння у по $d\varphi$. Отримуємо вираз:

$$\text{coef}(n, k) 2\pi \int_0^{\text{gran}(n, k)} \cos\left(\sqrt{\frac{0.95n}{k}}\theta\right)^k \times$$

$$\times \cos(\theta) \sin(\theta) d\theta = 1.$$

Позначимо інтеграл рівняння як $\text{Int}(n, k)$:

$$\text{Int}(n, k) =$$

$$= \int_0^{\text{gran}(n, k)} \cos\left(\sqrt{\frac{0.95n}{k}}\theta\right)^k \cos(\theta) \sin(\theta) d\theta.$$

Отримуємо рівняння знаходження нормуючого коефіцієнта для модифікованої моделі на основі розрахунку кута між векторами:

$$\text{coef}(n, k) * 2\pi * \text{Int}(n, k) = 1.$$

Значення $\text{coef}(n, k)$ для однієї пари n, k визначається за формулою:

$$\text{coef}(n, k) = \frac{1}{2\pi * \text{Int}(n, k)}.$$

Для n на проміжку $n \in [2, 1000]$, k на проміжку $k \in [1, n-1]$ розраховано значення $\text{coef}(n, k)$. Вибрані 50 значень $n, k, \text{coef}(n, k)$ збережено у текстовому файлі (рисунок 6).

$n, k, \text{coef}(n, k)$
2, 1, 0.701
3, 1, 0.957
3, 2, 0.809
5, 1, 1.481
9, 2, 2.029
5, 3, 1.129
5, 4, 1.092
20, 1, 5.447
25, 2, 5.321
29, 3, 5.605
21, 4, 3.921

Рисунок 6 – Вибірка значень $n, k, \text{coef}(n, k)$

Значення текстового файлу використано для підбору формули $\text{coef}(n, k)$ у програмному засобі TuringBot. Метрика помилки – середньоквадратичне відхилення (RMS error, рисунок 7).

Рисунок 7 – Вибір вхідних даних і метрики помилки для підбору формули $\text{coef}(n, k)$ у TuringBot

Отримано набір можливих формул $\text{coef}(n, k)$ (рисунок 8). Вибрано останній вираз зі списку, враховуючи найменше значення метрики помилки.

Size	Error	Function
1	68,393486	63.9013
3	19,278193	0.190961*n
5	18,358105	0.198771*(n-k)
7	16,155554	((0.204499+(-0.000496315*k))^n)
8	0,429636	((0.113777/k)+0.150481)*n
10	0,143631	((0.105896/(-0.0694905+k))+0.151319)*n
12	0,061396	((0.105837/(-0.0699328+k))+0.151066)*n+0.180739
14	0,059692	((0.105868/(-0.0702525+k))+0.151038)*(n-0.48627)+0.278514

Рисунок 8 – Варіанти формул обчислення $\text{coef}(n, k)$ у TuringBot

Отже, формула розрахунку $coef(n, k)$ для модифікованої моделі на основі розрахунку кута між векторами має вигляд

$$coef(n, k) = \left(\frac{0.11}{k - 0.07} + 0.15 \right) (n - 0.48) + 0.28$$

На рисунках 9-10 зображено максимальні абсолютні відхилення Δ виразу $coef(n, k)2\pi \ln t(n, k)$ від 1 для $k = 1, 5$ на проміжках $n \in [k + 1, 1000]$.

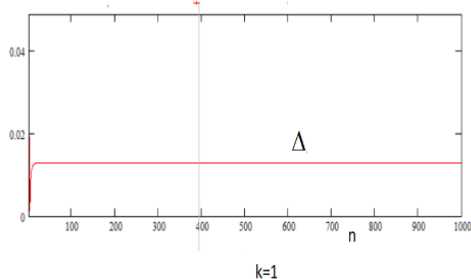


Рисунок 9 – Залежність Δ від n для $k = 1$

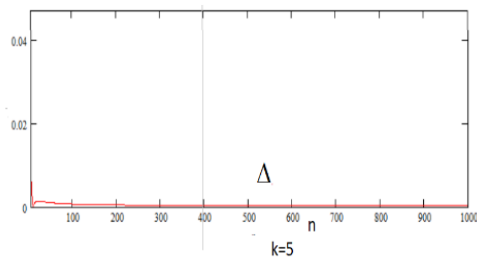


Рисунок 10 – Залежність Δ від n для $k = 5$

Максимальне Δ для $k \in [1, 999]$ на проміжках $n \in [k + 1, 1000]$ становить 210^{-2} .

Висновки

У статті розроблено фізично коректну модель відбиття на основі обчислення кута між векторами. Запропонована модель порівняно з оригінальною забезпечує точніше відтворення відблисків у зоні епіцентру та відповідає закону збереження енергії.

Список літератури

1. Романюк О.Н. Комп'ютерна графіка: навчальний посібник. Вінниця: ВНТУ, 1999. 130с.
2. Романюк О.Н. Класифікація дистрибутивних функцій відбивної здатності поверхні. Наукові праці Донецького національного технічного університету, 2008. №9. С. 145-151.
3. Розробка модифікованої моделі Шліка для визначення спекулярної складової кольору / Завальнюк Є.К. та ін. Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія, 2022. № 3. С. 4-12.
4. Phong B.T., Illumination for Computer Generated Pictures. Communicaions of the ACM, 1975. №6. P. 311-317.
5. Blinn J.F., «Models of light reflection for computer synthesized pictures», ACM SIGGRAPH Computer Graphics, 1977. Vol. 11, №2. P. 192-198.
6. Романюк О.Н., Чорний А.В. Високопродуктивні методи та засоби зафарбовування тривимірних графічних об'єктів. Вінниця: УНІВЕСУМ-Вінниця, 2006.
7. Моделирование спекулярного складника кольору з використанням енергетичнокоректних моделей відбивних здатностей поверхонь / Романюк О.Н., Абрамчук І.В., Кирилашук С.А., Романюк С.О. Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія «Технічні науки», 2019. №3. С. 153-157.
8. Розробка фізично коректної моделі відбиття другого степеня / Завальнюк Є.К. та ін. Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології, 2022. вип. 44, №2. С. 19-25.

References

1. Romaniuk, O.N. (1999), *Computer graphics: Tutorial [Kompiuterna hrafika: Navchalnyi posibnyk]* Vinnytsia, Ukraine: VNTU, 130p.
2. Romaniuk, O.N. (2008), Classification of distribution functions of surface reflectivity [Klasyfikatsiia dystributyvnykh funktsii vidbyvnoi zdatnosti poverkhni], *Scientific works of Donetsk National Technical University. Ser.: Informatics, cybernetics and computer technology*, №9, pp. 145–151.
3. Zavalniuk, Y.K., Romaniuk, O.N., Voitko, V.V., Romaniuk, O.V., Snigur, A.V. (2022), Development of a modified Schlick model for determining the specular component of color [Rozrobka modyfikovanoi modeli Shlika dlia vyznachennia spekuliarnoi skladovoi koloru], *Information technologies and computer engineering*, № 3, pp. 4-12.
4. Phong, B.T. (1975), Illumination for Computer Generated Pictures, *Communicaions of the ACM*, №6, pp. 311–317.
5. Blinn, J.F. (1977), Models of light reflection for computer synthesized pictures», *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, Vol. 11, №2, pp. 192–198.
6. Romaniuk, O. N., Chorny, A.V. (2006), *High-performance methods and tools for painting three-dimensional graphic objects [Vysokoproduktyvni metody ta zasoby zafarbovuvannia tryvymirnykh hrafichnykh ob'iektiv]*, Vinnytsia, Ukraine: UNIVESUM-Vinnytsia.

7. Romaniuk, O.N., Abramchuk, I.V., Kyrylashchuk, S.A., Romaniuk, S.O. (2019), Specular color component modelling using energetically correct surface reflectivity models [Modeliuvannia spekuliarnoho skladnyka koloru z vykorystanniam enerhetychnokorektnykh modelei vidbyvnykh zdatnosti poverkhon], *V.I. Vernadsky Taurida National University Academic Notes. Series "Technical sciences"*, №3, pp. 153–157.
8. Zavalniuk, Y.K., Romaniuk, O.N., Pavlov, S.V., Shevchuk, R.P., Korobeinikova, T.I. (2022), The development of second degree physically correct reflectance model [Rozrobka fizychno korektnoi modeli vidbyttia druhoho stepenia], *Optoelectronic information-power technologies*, Vol. 44, №2, pp. 19 – 25.

Надійшла до редакції 13.12.2022

¹Y. ZAVALNIUK, ¹O. ROMANIUK, ¹A. SNIGUR, ²R. SHEVCHUK

¹Vinnitsia National Technical University, Vinnitsia, Ukraine

²West Ukrainian National University, Ternopil, Ukraine

qq9272627@gmail.com

rom8591@gmail.com

snigur.anatoliy@vntu.edu.ua

rsh@wunu.edu.ua

THE DEVELOPMENT OF PHYSICALLY CORRECT LIGHT REFLECTANCE MODEL BASED ON ANGLE CALCULATION BETWEEN VECTORS

The new physically correct reflectance model based on angle calculation between vectors is proposed in this article. The main bidirectional reflectance distribution functions groups characteristics are analyzed. The models based on angle calculations allow to approximate the etalon Blinn model with low degree function. The approximated Blinn model was modified with correction coefficient in order to increase the realism level of the epicenter zone glow formation. The computer program for the modified model correction coefficient calculation was developed. The modified model normalizing coefficient for the energy conservation law adherence was proposed. The dataset for the coefficient formula selection using TuringBot software was created. The normalizing coefficient formula was selected from calculated variants. The absolute error value between 1 and hemispherical integral reflectivity value is not bigger than 210^{-2} . The developed physically correct reflectance model can be used in high realism level computer graphics systems.

Keywords: *bidirectional reflectance distribution function, normalizing coefficient, physically correct model, energy conservation law*