

УДК 004.9

## ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ ГЕНЕРАЦІЇ ТІНЕЙ ТРИВИМІРНИХ ОБ'ЄКТІВ МЕТОДОМ КАРТ ТІНЕЙ

Аушева Н.М., д.т.н.,

[nataauscheva@gmail.com](mailto:nataauscheva@gmail.com), ORCID: 0000-0003-0816-2971

Кардашов О.В., магістр,

[alexanderkardashov3@gmail.com](mailto:alexanderkardashov3@gmail.com), ORCID: 0000-0003-1767-7846

*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Україна)*

*Предметом дослідження є комп'ютерні технології для оптимізації обчислення процесу візуалізації моделей освітлення тривимірних об'єктів. Метою статті є визначення основних способів оптимізації процесу освітлення тривимірних сцен в умовах застосування різних емпіричних моделей освітлення, включно з генерацією тіней методом карт тіней.*

*Складність обчислення при генерації тіней тривимірних сцен залежить як від наповнення сцени об'єктами, так і від обраного методу генерації тіней. Під час рендерингу сцени, методи оптимізації обчислення освітлення сцени не мають суттєво впливати на візуальну точність зображення у порівнянні з неоптимізованим процесом обчислення освітлення. Задачею будь-якої системи візуалізації тривимірних зображень є пошук оптимальної складності розрахунків, де враховується як необхідний візуальний результат рендерингу, так і необхідна швидкість роботи системи. У випадку генерації тіней методом карт тіней для направлених динамічних джерел світла можна використовувати різноманітні види інтерполяції, в залежності від характеру руху джерела світла, з метою оптимізації обчислення. Використання інтерполяції для генерації карт тіней дозволяє для більшої частини кадрів не генерувати окрему карту тіней, а замінити її аналітично обчисленими значеннями, що дозволяє спростити загальний процес обчислення освітлення сцени.*

*У статті наводяться порівняння застосованих методів оптимізації процесу обчислення освітлення сцени на основі швидкості роботи системи для візуалізації тривимірних об'єктів. Швидкість роботи системи аналізується на основі даних про кількість згенерованих системою кадрів за секунду. Результати швидкості рендерингу демонструються на прикладі різноманітних комбінацій між такими емпіричними моделями освітлення, як модель Ламберта, Блінна-Фонга, ізотропної моделі Варда та методами лінійної і сферичної інтерполяції під час процесу генерації карт тіней.*

*Ключові слова: емпіричні моделі освітлення, система освітлення, карта тіней, методи оптимізації, сферична інтерполяція, лінійна інтерполяція.*

**Постановка проблеми.** Стрімкий розвиток засобів рендерингу тривимірних сцен ставить задачу одночасного вирішення проблем оптимізації процесу обчислення. Освітлення тривимірних сцен є одним з найбільш ресурсозатратних процесів під час рендерингу. Використання емпіричних моделей освітлення одночасно з методом карт тіней для генерації тіней об'єктів сцени може надати задовільний візуальний результат рендерингу за умови ретельного налаштування параметрів моделей освітлення. Проте, за умов наявності динамічних джерел світла, процес генерації карт тіней на кожному новому кадрі під час роботи системи, може негативно вплинути на швидкість роботи, тобто на кількість згенерованих кадрів системою за секунду. Ця проблема є актуальною для низькопродуктивних обчислювальних машин. Отже, важливо визначити умови роботи системи освітлення, за яких швидкість роботи системи буде залишатися стабільно високою, без суттєвого зниження якості візуального ефекту згенерованого зображення.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У роботі [1] розглянуто модель освітлення Ламберта, Блінна-Фонга, анізотропну модель Варда, і визначено їх, як класичні емпіричні моделі освітлення, котрі використовують емпіричний метод визначення параметрів освітлення сцени, з тією різницею, що анізотропна модель Варда розроблена для коректного обчислення віддзеркалень від поверхонь об'єктів, що імітують анізотропні матеріали. Публікація [2] дає вичерпну інформацію стосовно формування ізотропної моделі Варда, як окремого випадку анізотропної моделі Варда для визначення віддзеркалень від ізотропних матеріалів об'єктів, за якого процес обчислення результуючого кольору є суттєво спрощеним. Метод карт тіней - алгоритм для генерації тіней тривимірних об'єктів сцени, що наведено і описано у роботі [3]. У роботах [4-5] описано лінійну [4] та сферичну [5] інтерполяції.

**Формулювання цілей статті.** Визначення основних способів оптимізації процесу освітлення тривимірних сцен в умовах застосування різних емпіричних моделей освітлення, включно з генерацією тіней методом карт тіней.

**Основна частина.** Задачею процесу обчислення світла сцени є визначення кольору кожного пікселя вікна на кожному кадрі під час рендерингу у реальному часі. При використанні емпіричного підходу до освітлення, для створення найпростішого ефекту об'єму об'єкту на сцені, зазвичай використовується три базових компоненти, котрі є складовими результуючого кольору пікселя об'єкту: фонові компоненти (Ambient), дифузні компоненти (Diffuse), компоненти віддзеркалень (Specular). Модель Ламберта є найпростішою як в реалізації, так і з точки зору складності обчислень світла сцени, оскільки використовує лише дві з вищезазначених компонент освітлення для обчислення результуючого кольору фрагмента – фонову і дифузну [1]:

$$I = I_{ambient} + I_{diffuse} \quad (1)$$

Модель освітлення Блінна-Фонга використовує для обчислення результуючого кольору фрагмента усі три компоненти [1]:

$$I = I_{ambient} + I_{diffuse} + I_{specular} \quad (2)$$

Ізотропна модель Варда є ще одним прикладом емпіричної моделі освітлення, що включає компоненту віддзеркалень. Як і модель Блінна-Фонга, модель Варда використовує за фонову і дифузну компоненти модель освітлення Ламберта [2].

Основною проблемою для реалізації тіней сцени є відсутність інформації про глибину об'єктів на сцені. Один зі способів вирішення цієї проблеми є використання методу карт тіней. Даний метод використовується в багатьох видах програмного забезпечення, що використовують тривимірну графіку, через його відносно невисоку ресурсозатратність при розрахунках.

При встановленні камери спостерігача на координати джерела світла, усі об'єкти сцени будуть освітлені, а усі фрагменти об'єктів, що знаходяться поза прямою досяжністю променів мусять бути затінені. Ідея карт тіней базується на принципі визначення глибини кожного фрагмента сцени з позиції джерела світла. Але, варто зауважити, що метод не враховує множинне відбиття променів світла від об'єктів, від чого тіні можуть з'являтися від об'єктів, що не знаходяться безпосередньо в зоні досяжності променів [3].

Для визначення того, чи знаходиться конкретний фрагмент об'єкта в тіні проводиться промінь між джерелом світла і фрагментом. Після чого порівнюються координати цього фрагмента з іншими координатами фрагментів на цьому промені. Фрагмент буде освітлений, якщо його координати на даному промені і є найближчими до джерела світла порівняно з іншими, і навпаки, буде затінений, якщо при перевірці виявляється ближчий фрагмент об'єкта до джерела світла.

При використанні карт тіней для освітлення сцени динамічним джерелом світла, котре змінює свою позицію при рендерингу кожного кадру ігрового циклу, може виникати проблема зі значним зниженням частоти кадрів на секунду, що видаються у процесі роботи системи освітлення. На персональному комп'ютері достатньої продуктивності подібна проблема є непомітною, оскільки обчислювальних потужностей вистачає для генерації достатньої кількості кадрів на секунду, і в таких умовах майже завжди частота кадрів на секунду набагато перевищує частоту розгортки користувачього монітора.

Для спрощення розрахунків в умовах динамічного джерела світла можна використовувати метод інтерполяції для карт тіней. Ідея полягає в тому, що карта тіней генерується не кожен кадр ігрового циклу, а через певний проміжок часу, коли між моментами генерації нових карт тіней дані для створення тіней об'єктів на сцені обчислюються аналітично за допомогою інтерполяції.

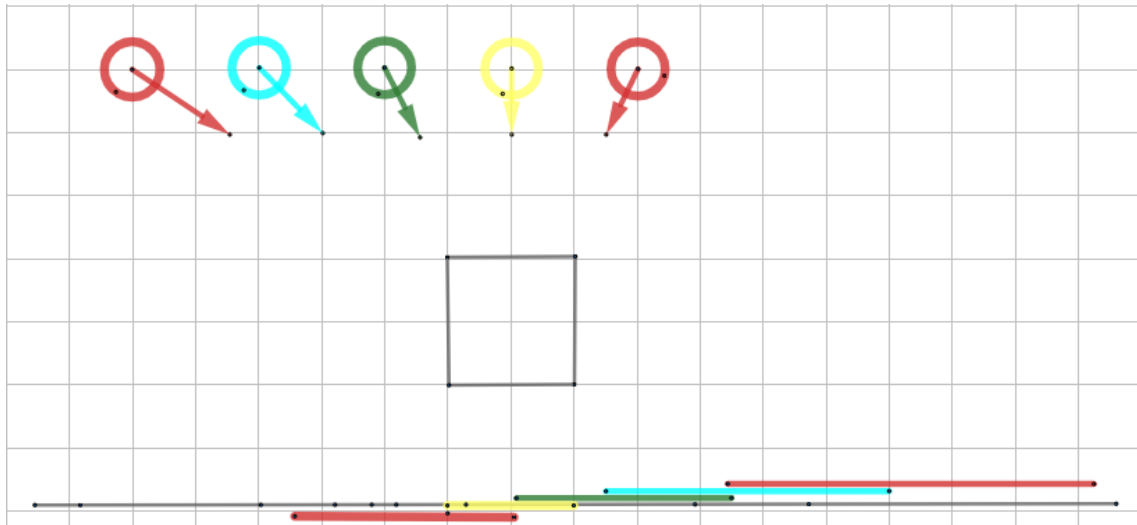


Рис. 1. Схема інтерполяції карт тіней

На рис. 1 зображено червоними векторами карти тіней згенеровані звичайним способом, а між ними результати інтерполяції, котрі обчислюються на більшості ітераціях циклу, замість повторної генерації карт тіней.

Лінійна інтерполяція є найпростішим видом інтерполяції [4], проте її застосування є доречним для певних типів переміщення джерела світла на сцені. Так, лінійна інтерполяція може застосовуватися у тих випадках, коли джерело світла рухається за прямолінійною траєкторією, а отже у процесі розрахунку проміжних значень для карт тіней. За таких умов лінійна інтерполяція здатна спрогнозувати вірну траєкторію руху тіней і уникнути зайвої ступінчатості зображення.

Розраховуються проміжні значення інтенсивності затіненості сцени за допомогою лінійної інтерполяції на основі двох згенерованих карт тіней класичним способом, з певною відстанню між позиціями джерела світла. Кожне проміжне значення обчислюється за формулою:

$$I(t) = I_{begin} \cdot (1 - t) + I_{end} \cdot t \quad (3)$$

$$0 \leq t \leq 1,$$

де  $I_{begin}$  – значення затіненості кожного фрагмента першої карти тіней;  $I_{end}$  – значення затіненості кожного фрагмента другої карти тіней;  $t$  – параметр, значення якого належать проміжку  $[0, 1]$ .

Сферична лінійна інтерполяція (SLERP – Spherical Linear Interpolation) – вид інтерполяції, що використовується як у векторному так і кватерніонному вигляді для розрахунку анімації обертання у тривимірному просторі між двома орієнтаціями [5].

Цей вид інтерполяції доцільно використовувати для розрахунку проміжних значень карт тіней при нелінійному русі джерела світла, наприклад при русі джерела по сфері. У такому випадку зображення тіней не буде деформуватися артефактами або при обчисленні проміжних карт

тіней за допомогою лінійної інтерполяції, тіні від одного об'єкта на різних ітераціях ігрового циклу не будуть утворювати між собою рублені грані при переміщенні джерела світла.

Обчислюються проміжні значення карти тіней майже за аналогічним принципом, як і за лінійної інтерполяції, з тією різницею, що у процес обчислення додається кут між векторами напрямку світла для початкової карти тіней та кінцевої. У загальному вигляді формула обчислення проміжних значень карт тіней з використанням SLERP буде мати наступний вигляд:

$$I(t) = \frac{\sin((1-t) \cdot \theta)}{\sin \theta} I_{begin} + \frac{\sin(t\theta)}{\sin \theta} I_{end} \quad (4)$$

$$0 \leq t \leq 1,$$

де  $I_{begin}$  – значення затіненості кожного фрагмента першої карти тіней;  $I_{end}$  – значення затіненості кожного фрагмента другої карти тіней;  $t$  – параметр, значення якого належать проміжку  $[0, 1]$ ;  $\theta$  – кут між вектором  $I_{begin}$  та вектором  $I_{end}$ .

$$\cos(\theta) = \frac{I_{begin} \cdot I_{end}}{|I_{begin}| \cdot |I_{end}|}, \theta = \cos^{-1}(\cos(\theta)). \quad (5)$$

Одним зі способів оцінити ефективність застосування лінійної та сферичної інтерполяції для генерації карт тіней є отримання даних про кількість згенерованих кадрів на секунду під час роботи програми. Оскільки достатньо продуктивні персональні комп'ютери не дозволяють продемонструвати різницю в частоті кадрів, що генерує програма під час роботи, то для проведення тесту було використано низькопродуктивну, на сьогоднішній день, обчислювальну машину, що складається з наступної конфігурації основних комплектуючих:

- CPU: Intel(R) Core(TM) i5-2450M, 2.50 GHz;
- GPU: NVIDIA GeForce GT 630M;
- RAM: 4 GB, DDR3, 1600 MHz.

Саме така конфігурація дозволяє отримати відчутну різницю під час проведення тестів продуктивності розробленої системи освітлення із застосуванням різних наборів вхідних параметрів.

Для реалізації базового освітлення сцени було застосовано три моделі освітлення: модель освітлення Ламберта, Блінна-Фонга, ізотропну модель Варда. Генерація тіней тривимірних об'єктів здійснюється трьома способами: класичним методом карт тіней, і за допомогою двох методів оптимізації генерації карт тіней – з використанням лінійної і сферичної (SLERP) інтерполяції.

Результати проведення тестів продуктивності розробленої системи подані у вигляді графіків частоти кадрів, що видає система на протязі трьох хвилин роботи:

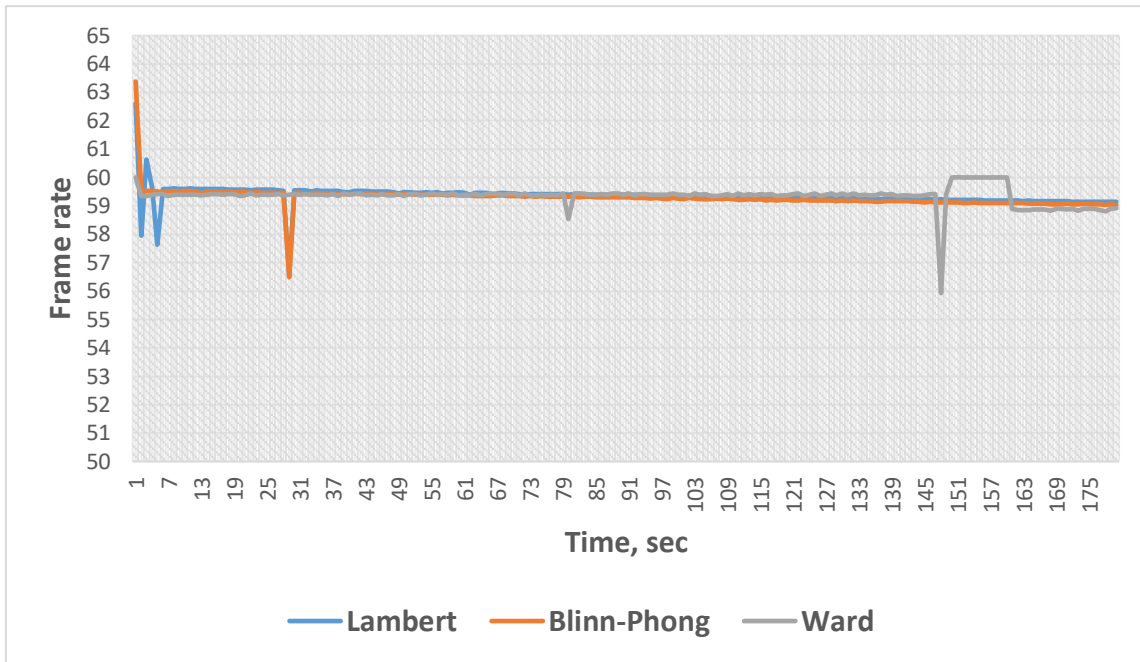


Рис. 2. Графік частоти кадрів з використанням моделей освітлення

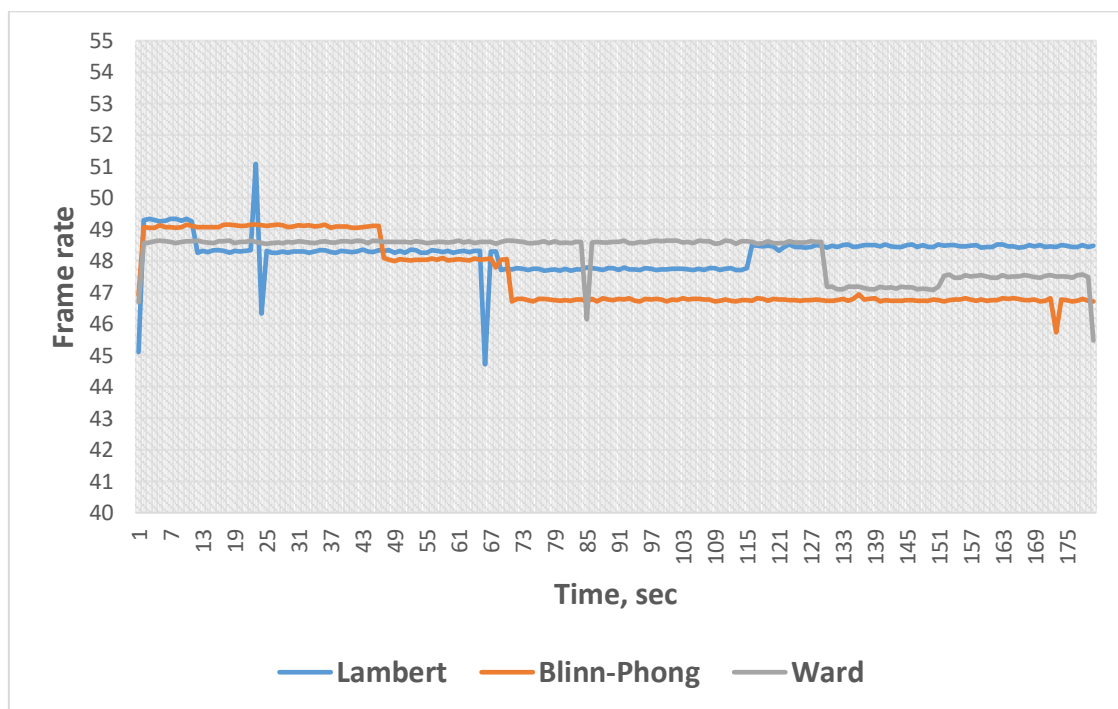


Рис. 3. Графік частоти кадрів з використанням моделей освітлення і класичного методу генерації карт тіней



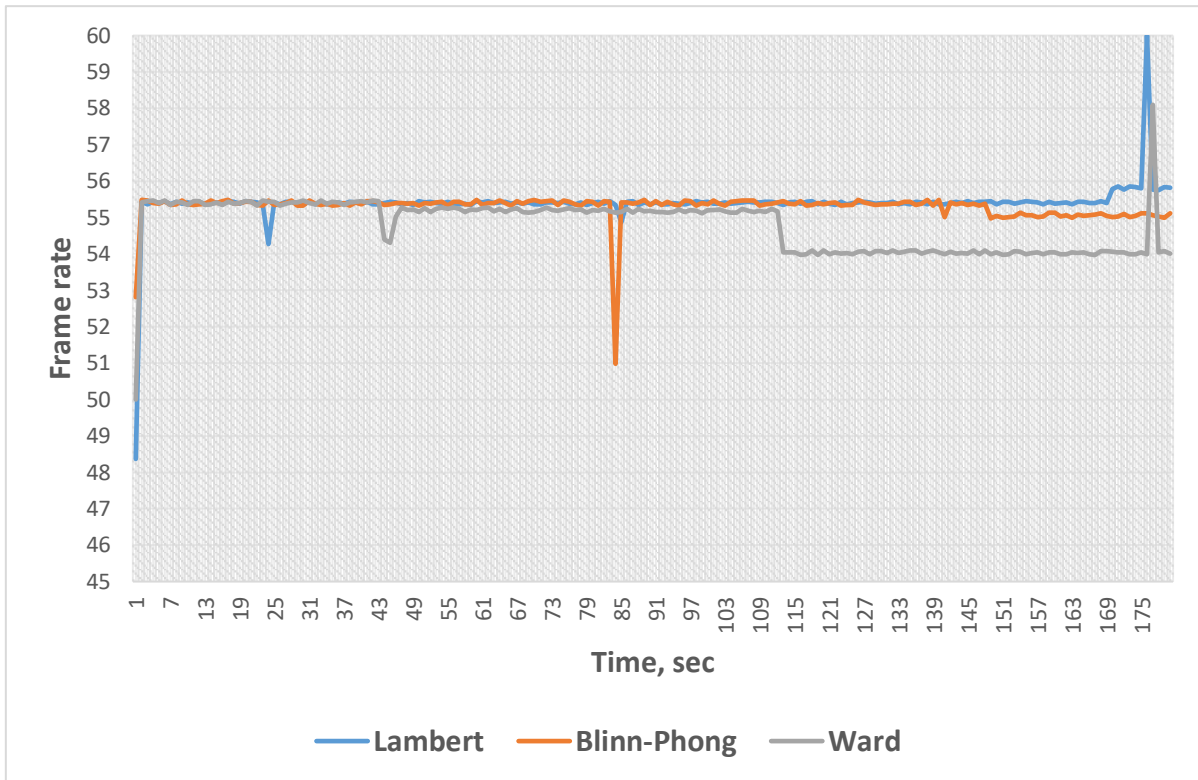


Рис. 4. Графік частоти кадрів з використанням моделей освітлення і лінійною інтерполяцією карт тіней

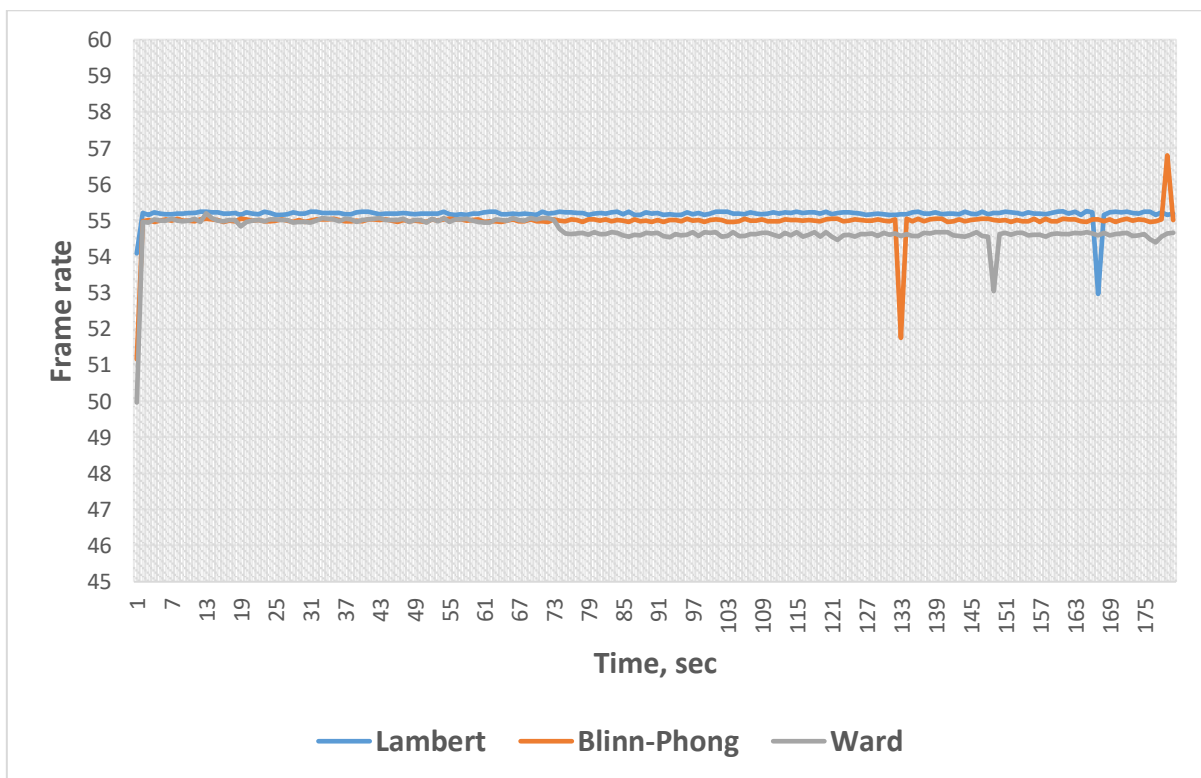


Рис. 5. Графік частоти кадрів з використанням моделей освітлення і лінійною інтерполяцією карт тіней

З першого набору графіків частоти кадрів на секунду (рис. 2), де для освітлення сцени було використано лише моделі освітлення видно, що

після перших секунд роботи програми майже не спостерігається суттєвих спадань частоти кадрів, окрім деяких випадків, а загальна частота кадрів коливається у діапазоні значень, близьких до 59.6, з незначними відхиленнями в більшу або меншу сторону.

На другому наборі графіків частоти кадрів (рис. 3), де, окрім моделей освітлення, для рендерингу сцени було застосовано класичний метод карт тіней для генерації тіней об'єктів, демонструється суттєве спадання частоти кадрів на секунду, у порівнянні з першим набором. Спостерігаються суттєві коливання частоти кадрів у діапазоні 1-2 кадрів, а середня частота знизилася на 11-12 кадрів. Такий характер коливань пояснюється досягненням ліміту продуктивності GPU обчислювальної машини.

На третьому наборі (рис. 4) демонструється частота кадрів, що згенерувала система, після модифікації класичного методу карт тіней, шляхом використання лінійної інтерполяції у процесі генерації карт тіней. Частота кадрів у середньому зросла на 5-6 кадрів, і коливається у діапазоні від 55 до 56 кадрів. Як і під час застосування класичного методу генерації карт тіней, у процесі роботи програми, GPU досягає свого ліміту продуктивності, але спостерігається менше різких просядок та спадань частоти кадрів.

Четвертий набір графіків частоти кадрів (рис. 5) демонструє майже аналогічний метод оптимізації класичного методу генерації карт тіней, але з використанням сферичної інтерполяції. Оскільки процес обчислення сферичної інтерполяції є складнішим за лінійну інтерполяцію, частота кадрів на графіках знизилася на незначні значення 0.3-0.4 кадрів на секунду, і коливається у невеликому діапазоні від значення 55 кадрів на секунду.

**Висновки.** Запропоновано використання методів лінійної та сферичної інтерполяції карт тіней для обчислення тіней від об'єктів тривимірної сцени для оптимізації класичного методу генерації карт тіней. Проведено порівняння продуктивності на основі частоти кадрів, що генеруються під час роботи системи освітлення тривимірної сцени, між освітленням сцени емпіричними моделями освітлення Ламберта, Блінна-Фонга, Варда, освітленням емпіричними моделями із застосуванням класичного методу карт тіней та освітленням емпіричними моделями із застосуванням модифікованого методу генерації карт тіней за допомогою лінійної та сферичної інтерполяції.

### *Література*

1. Dempski K. Advanced lighting and materials with shaders / by Kelly Dempski and Emmanuel Viale. Plano, Texas 75074: Wordware Publishing, Inc., 2005. 340 p.



2. Walter B. Notes on the Ward BRDF. *Technical report PCG-05-06, Program of Computer Graphics, Cornell University*. 2005.
3. Möller T. Real-time rendering / Tomas Akenine-Möller, Eric Haines, Naty Hoffman, Angelo Pesce, Michal Iwanicki, Sebastien Hillaire. 4th ed. Boca Raton: Taylor & Francis, CRC Press, 2018.
4. Лук'яненко С.О. Числові методи в інформатиці: Навч. посіб. К.: НТУУ "КПІ", 2007. 140 с.
5. Shoemake K. Animating Rotation with Quaternion Curves. *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*. 1985. Vol. 19, no. 3. P. 245–254.

## **OPTIMIZATION OF THE SHADOW GENERATION PROCESS OF THREE-DIMENSIONAL OBJECTS USING THE SHADOW MAP METHOD**

Ausheva Natalia, Kardashov Oleksandr

*The subject of the research is computer technologies for optimizing the calculation process of visualization of lighting models of three-dimensional objects. The purpose of the article is to determine the basic methods of optimizing the lighting process of three-dimensional scenes in the terms of the application of various empirical lighting models, including the generation of shadows with the method of shadow maps.*

*The complexity of calculations in the generation shadows process of three-dimensional scenes depends both on the filling of the scene with objects and on the chosen method of shadow generation. When rendering a scene, optimization methods of scene lighting calculation should not significantly affect the visual fidelity of the image compared to a non-optimized lighting calculation process. The task of any three-dimensional image visualization system is to find the optimal complexity of calculations, which takes into account both the necessary visual result of rendering and the necessary speed of the system. In the case of generating shadows with the method of shadow maps for directional dynamic light sources, various types of interpolation can be used, depending on the nature of the movement of the light source, in order to optimize the calculation. The use of interpolation for the generation of shadow maps allows for most frames not to generate an individual shadow map, and replace it with analytically calculated values, which simplifies the overall process of calculating scene lighting.*

*The article compares the applied methods of optimizing the scene lighting calculation process based on the speed of the system for rendering three-dimensional objects. The speed of the system is analyzed based on data on the number of frames generated by the system per second. Rendering speed results are demonstrated using various combinations of empirical lighting models such as Lambert, Blinn-Phong, isotropic Ward model, and linear and spherical interpolation methods during the shadow map generation process.*

*Keywords: empirical lighting models, lighting system, shadow map, optimization methods, spherical interpolation, linear interpolation.*

### **References**

1. Dempski, K. (2005). *Advanced lighting and materials with shaders / by Kelly Dempski and Emmanuel Viale*. Plano, Texas 75074: Wordware Publishing, Inc.
2. Walter, B. (2005) Notes on the Ward BRDF. *Technical report PCG-05-06, Program of Computer Graphics, Cornell University*.
3. Möller, T. (2018). *Real-time rendering / Tomas Akenine-Möller, Eric Haines, Naty Hoffman, Angelo Pesce, Michal Iwanicki, Sebastien Hillaire* (4th. ed.). Boca Raton: Taylor & Francis, CRC Press.
4. Lukianenko, S.O. (2007). *Numerical methods in computer science: Teaching manual*. Kyiv: NTUU “KPI” [in Ukrainian].
5. Shoemake, K. (1985). Animating Rotation with Quaternion Curves. *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*. 245-254.