
СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

УДК 004.92

Є. К. ЗАВАЛЬНЮК, О. Н. РОМАНЮК, В.С. ПАВЛОВ, О.Л. БОБКО, О.О. НОВОСЕЛЬЦЕВ

НОВА АРХІТЕКТУРА ПРОГРАМНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ ВИСОКОРЕАЛІСТИЧНОГО ТА ВИСОКОПРОДУКТИВНОГО РЕНДЕРИНГУ 3D-ЗОБРАЖЕНЬ

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

Анотація. У статті запропоновано нову архітектуру системи 3D-рендерингу. Проаналізовано переваги та недоліки наявних систем візуалізації, таких як Eevee, Cycles, BRDF Explorer, Mitsuba, Idx3d, V-Ray, RenderMan, UnrealEngine. Обґрунтовано необхідність розробки нової архітектури системи рендерингу. Розглянуто особливості основних складових запропонованої архітектури. Описано підсистеми обробки вхідних даних, геометричних перетворень, визначення оптимальної кількості трикутників, що забезпечують високоефективну підготовку сцени до візуалізації. Досліджено особливості реалізації концепції гібридного рендерингу на основі поєднання підсистем растеризації, трасування променів і нейронного рендерингу. Особливу увагу приділено архітектурним блокам на основі запропонованих моделей відбивної здатності, методів нормалізації векторів, інтелектуальних методів 3D-рендерингу, інтеграція яких забезпечує підвищення продуктивності та реалістичності формування зображень у режимі реального часу. Побудовано структурну схему запропонованої системи 3D-рендерингу.

Ключові слова: програмна система, рендеринг, інтелектуальна система.

Abstract. A new architecture of a 3D rendering system is proposed in the article. The advantages and disadvantages of existing visualization systems, such as Eevee, Cycles, BRDF Explorer, Mitsuba, Idx3d, V-Ray, RenderMan, UnrealEngine, are analyzed. The need to develop a new architecture of a rendering system is justified. The features of the main components of the proposed architecture are considered. The subsystems of input data processing, geometric transformations, and determination of the optimal number of triangles are described, which ensure highly efficient preparation of the scene for visualization. The features of implementing the concept of hybrid rendering based on a combination of rasterization, ray tracing, and neural rendering subsystems are investigated. Particular attention is paid to architectural blocks based on the proposed reflectance models, vector normalization methods, and intelligent 3D rendering methods, the integration of which provides increased productivity and realism of image formation in real time. A structural scheme of the proposed 3D rendering system is created.

Keywords: program system, rendering, intellectual system.

DOI: 10.31649/1681-7893-2026-51-1-97-107

ВСТУП

При формуванні 3D-зображень [1-2] програмна система рендерингу повинна забезпечити максимально реалістичну візуалізацію об'єктів. Водночас, поширеною вимогою до систем рендерингу є візуалізація кадрів у режимі реального часу. Оскільки вимоги до якості зображень, а також до складності полігональних моделей, зростають, важливим є забезпечення високопродуктивного формування зображень. Незважаючи на наявність великої кількості систем 3D-рендерингу різного спрямування, вони, як правило, не дозволяють максимально ефективно поєднати фізично-точне формування зображень і найвищу продуктивність рендерингу, не забезпечують достатньо гнучкий вибір моделей освітлення, потребують складного апаратного забезпечення, недостатньо ефективно використовують інтелектуальні методи оптимізації процесу візуалізації. Отже, необхідною є розробка нових архітектур систем рендерингу.

© Є. К. ЗАВАЛЬНЮК, О.Н. РОМАНЮК, В.С. ПАВЛОВ, О. Л. БОБКО, О. О. НОВОСЕЛЬЦЕВ, 2026

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

Відомими системами рендерингу 3D-зображень є Blender Eevee, Blender Cycles [3], BRDF Explorer [4], Mitsuba [5], Idx3d [6], V-Ray [7], RenderMan [8], рендерер Unreal Engine [9].

Особливістю 3D-засобу Blender від Blender Foundation є використання двох систем візуалізації – Eevee та Cycles [3]. Eevee є системою рендерингу, що забезпечує високопродуктивне формування зображень у режимі реального часу. Система базується переважно на алгоритмі растеризації, інтегрована з вузловою системою описів матеріалів. Проте можливості високореалістичного формування зображень є обмеженими. Cycles базується на трасуванні шляху та дозволяє отримати фотореалістичні зображення зі складними ефектами освітлення. Однак, продуктивність рендерингу є суттєво нижчою. Загалом, поєднання кількох систем візуалізації може відповідати концепції гібридного рендерингу, однак більш зручною для користувача є її реалізація в межах єдиної системи. Окрім того, набір моделей відбивної здатності в обох системах є переважно фіксованим, відсутні вбудовані методи вибору оптимальних моделей відбивної здатності та інтелектуальної оптимізації полігональних моделей, системи потребують інтеграції з модулями нейронного рендерингу.

BRDF Explorer [4] – програмна система візуалізації від Disney, орієнтована на тестування моделей відбиття світла на основі двоприменевих функцій відбивної здатності (ДФВЗ). Перевагами є широкий вибір ДФВЗ різного типу, зручні інструменти для досліджень, можливість додання власних ДФВЗ. Однак, система не дозволяє повноцінно налаштувати процес рендерингу, не інтегровані інтелектуальні методи візуалізації. Графічний інтерфейс засобу містить лише одне вікно візуалізації сцени, що ускладнює порівняння різних моделей відбивної здатності.

Mitsuba 3 [5] – система фізично-точної візуалізації, розроблена В. Джейкобом та ін., переважно спрямована на наукові дослідження. Особливістю є використання високорівневого інтерфейсу в середовищі мови Python. Перевагою є широкий набір реалізованих алгоритмів фізично-точного рендерингу, зокрема, алгоритмів трасування шляху, диференційованого рендерингу, зворотного рендерингу. Однак, система менш орієнтована на високопродуктивний рендеринг у реальному часі. Для реалізації алгоритмів фізично-точного рендерингу необхідні значні обчислювальні затрати, можливості гібридного рендерингу є обмеженими, бракує автоматичного підбору моделей відбивної здатності, опанування програми є досить складним.

Idx3d [6] – система візуалізації реального часу, розроблена П. Валзером. Особливостями є кросплатформність, «легковагова» візуалізація 3D-сцен, компактність і зручність редагування відкритого коду, відсутність потреби у наявності графічного процесора (GPU). Недоліками є обмежений набір моделей відбивної здатності, що не забезпечують необхідний рівень продуктивності й реалістичності візуалізації, відсутність інтегрованих підсистем трасування променів і нейронного рендерингу, апаратної оптимізації обчислень.

V-Ray [7] – комерційна система фізично-точної візуалізації, розроблена компанією Chaos. Систему найчастіше застосовують для рендерингу в таких 3D-засобах, як 3DS Max, Maya, Cinema 4D, SketchUp. Перевагами є забезпечення високоякісного рендерингу 3D-сцен з відтворенням ефектів глобального освітлення, оптимізована реалізація трасування променів, можливість гібридного поєднання ресурсів центрального процесора (CPU) і GPU, широка бібліотека матеріалів, інтелектуальне покращення якості зображень. Однак, час рендерингу 3D-сцен з глобальним освітленням є значним, складно забезпечити максимальну продуктивність рендерингу, інтеграція моделей нейронного рендерингу є недостатньою.

RenderMan [8] – комерційне програмне забезпечення для фотореалістичного рендерингу від Pixar для 3D-засобів, таких як Houdini, Maya, Blender. Особливостями є підтримка різних типів трасування шляху, інтелектуальне знешумлення зображень, гібридні обчислення на базі CPU і GPU, використання фізично-точних моделей відбиття світла. Засіб більше орієнтований на офлайн-рендеринг сцен фільмів, тому не забезпечує найвищий рівень продуктивності рендерингу.

Засіб розробки 3D-ігор Unreal Engine [9] від Epic Games передбачає використання вбудованого рендерера для фотореалістичної візуалізації в режимі реального часу. Поєднуються підсистеми Nanite для автоматизації управління деталізацією полігональних моделей і Lumen для високопродуктивного моделювання глобального освітлення. Недоліками є необхідність використання спеціалізованого апаратного забезпечення, обмежений і недостатньо гнучкий вибір моделей відбивної здатності, складність опанування, обмежене використання інтелектуальних методів.

Отже, існуючі системи 3D-рендерингу мають ряд недоліків: мають обмежену швидкість, не дозволяють відтворити складні ефекти освітлення, потребують значних ресурсів, не забезпечують адаптивний підбір моделей відбивної здатності, обмеженість набору моделей відбивної здатності, недостатня інтеграція із засобами штучного інтелекту. Тому актуальною є розробка архітектури системи рендерингу.

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

Мета статті – розробка архітектури програмної системи 3D-рендерингу для підвищення продуктивності та реалістичності формування зображень.

2. ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Запропонована система рендерингу містить підсистеми обробки вхідних даних, геометричних перетворень, визначення оптимальної кількості трикутників, блок розподілу завдань рендерингу, підсистеми растеризації, визначення нормалізованих векторів, адаптивного вибору моделі освітлення, визначення дистрибутивної функції, блок накладання текстур, підсистему визначення інтенсивності кольору, блок антиаліазингу, підсистеми нейронного рендерингу та трасування променів, блок комбінування результатів формування зображення [17].

Підсистема обробки вхідних даних (рис. 1) призначена для програмної обробки даних про основні об'єкти сцени: 3D-моделі, камери, джерела світла. Блок завантаження 3D-моделей забезпечує збереження даних об'єктів, таких як координати і нормалі вершин, у відповідних структурах даних. Блок установки джерел світла використовується для збереження даних про визначені користувачем кількість, координати та інтенсивності джерел світла. Також, за допомогою блоку установки камери зберігаються дані про визначене користувачем положення камери.

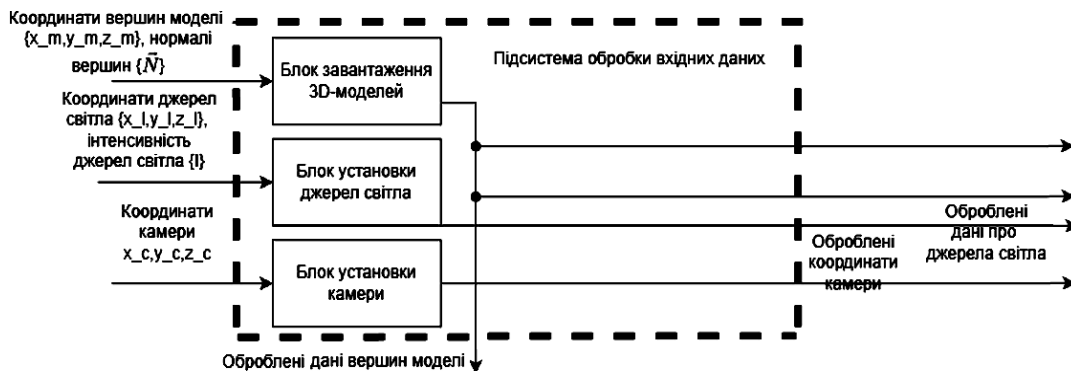


Рисунок 1 – Структурна схема підсистеми обробки вхідних даних

Підсистема геометричних перетворень (рис. 2) призначена для формування й оптимізації полігональних моделей, здійснення MVP-перетворень для координат вершин, вилучення полігонів, орієнтованих у протилежну від камери сторону. Оптимізація моделі об'єкта полягає у зменшенні кількості трикутників до найменшого числа, при якому втрати у якості візуалізації не є суттєвими. Для цього викликається підсистема визначення оптимальної кількості трикутників.

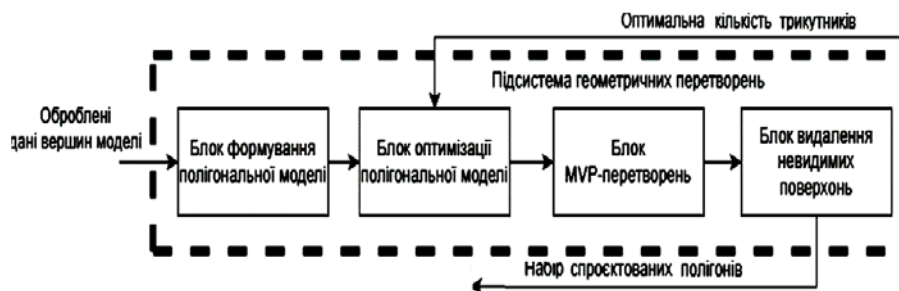


Рисунок 2 – Структурна схема підсистеми геометричних перетворень

Підсистема визначення оптимальної кількості трикутників (рис. 3) [10] базується на аналізі форми 3D-моделі та аналізі взаємного розташування моделі, камери й джерела світла. Блок формування воксельного тензора призначений для побудови воксельного подання поверхні 3D-моделі. Даний тензор використовується для неймережевого вивчення локальних характеристик поверхні фігури. Блок аналізу сцени призначений для систематизації і подальшого неймережевого аналізу даних про положення об'єкта відносно камери й джерела світла, а також про початкову кількість трикутників моделі. Блок неймережевого прогнозування поєднує вихідні дані з обох блоків для визначення оптимальної кількості трикутників поверхні об'єкта.

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

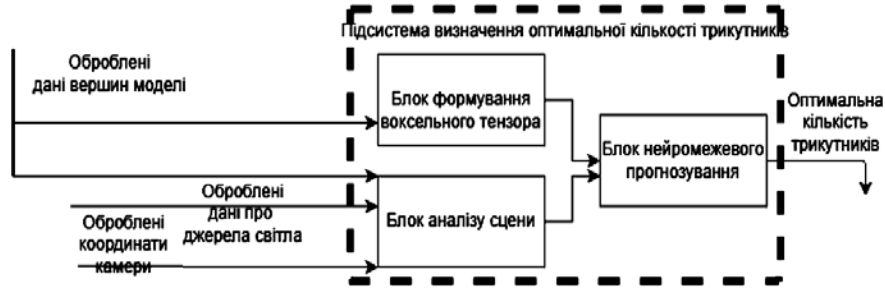


Рисунок 3– Структурна схема підсистеми визначення оптимальної кількості трикутників

Блок розподілу завдань рендерингу (рис. 4) призначений для забезпечення формування зображення на основі концепції гібридного рендерингу, визначаючи, які складові сцени формуються на основі растеризації, трасування променів, нейронного рендерингу. Для цього аналізуються кількість об'єктів, їх геометрична складність, типи матеріалів, видимість і розмір об'єктів, вимоги до продуктивності формування сцени.

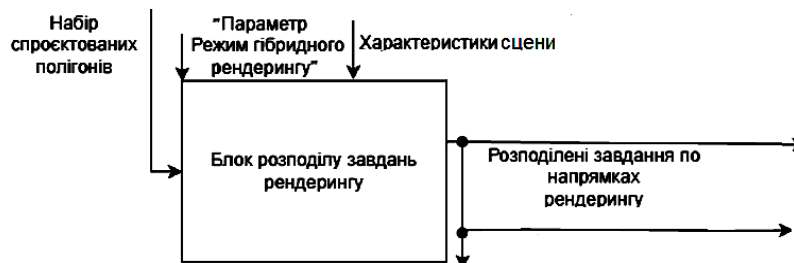


Рисунок 4– Структурна схема блоку розподілу завдань рендерингу

Реалізація формування зображення на основі растеризації базується на використанні підсистем растеризації, визначення нормалізованих векторів, адаптивного вибору моделі освітлення, визначення дистрибутивної функції, блоку накладання текстур, підсистеми визначення інтенсивності кольору, блоку антиаліазингу.

Підсистема растеризації (рис. 5) забезпечує формування фрагментів у межах спроектованих у двовимірний простір трикутників. Підсистема містить блоки для сортування вершин, визначення координатних пристовів, формування фрагментів, вилучення невидимих фрагментів на основі алгоритму z-буфера.

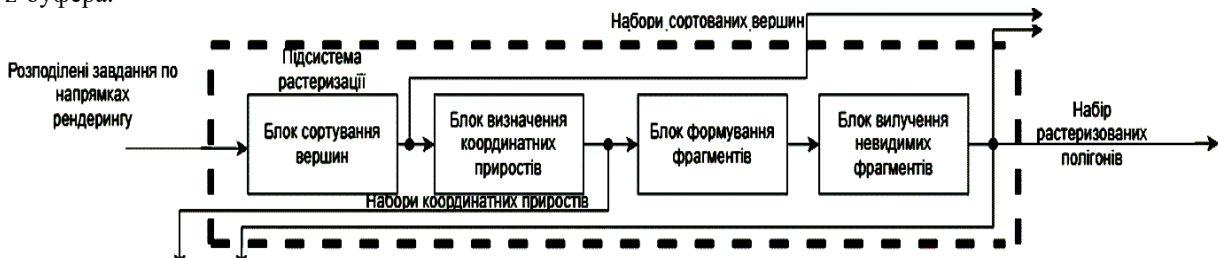


Рисунок 5– Структурна схема підсистеми растеризації

Підсистема визначення нормалізованих векторів (рис. 6) призначена для розрахунку одиничних векторів в точках полігонів. За допомогою блоку визначення векторів вектори $\vec{L}_i, \vec{V}_i, \vec{H}_i, \vec{N}_i, \vec{D}_i$ визначають у вершинах, інтерполюють по ребрах трикутника, а далі обчислюють вздовж рядків растеризації. Блок нормалізації (рис. 7a) забезпечує обчислення нормалізованих векторів $\vec{L}_{ipn}, \vec{V}_{ipn}, \vec{H}_{ipn}, \vec{N}_{ipn}, \vec{D}_{ipn}$. Нормалізація векторів здійснюється на основі одного з методів з переліку, що включає запропоновані [11] комбінований метод нормалізації векторів, методи на основі застосування поліноміальної регресії, рядів Тейлора, підбору поліноміальних коефіцієнтів. Також може бути використаний блок прямого визначення одиничних векторів (рис. 7b) для безпосередньої інтерполяції нормалізованих векторів. Блок теж базується на використанні одного методу з переліку, зокрема, запропонованого методу із використанням розпаралеленої сферично-кутової інтерполяції.

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ



Рисунок 6 – Структурна схема підсистеми визначення нормалізованих векторів

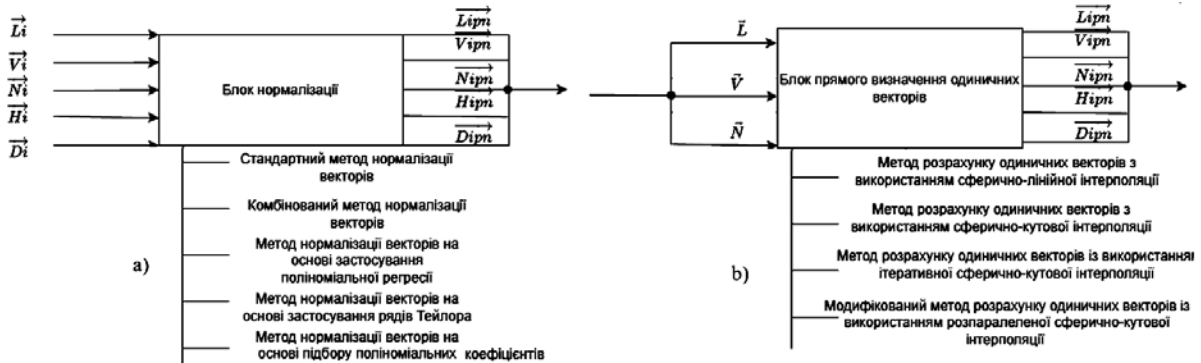


Рисунок 7 – Структурно-ієрархічні схеми блоку нормалізації (а) та блоку прямого визначення одиничних векторів (b)

Підсистема адаптивного вибору моделі освітлення (рис. 8) [12] забезпечує підбір оптимальної аналітичної моделі освітлення для візуалізації об'єкта сцени, враховуючи цільовий результат рендерингу та характеристики поверхні об'єкта. Підсистема викликається, якщо відмічено відповідну радіокнопку інтерфейсу. Блок аналізу задачі візуалізації призначений для обробки визначеного користувачем параметра напрямку візуалізації (висока продуктивність або фізична реалістичність), параметрів матеріалу (коефіцієнти спекулярності поверхні n , дифузного відбиття k_d і спекулярного відбиття k_s).

Залежно від напрямку візуалізації викликається блок вибору спекулярної емпіричної ДФВЗ або блок вибору ДФВЗ для фізично-точного рендерингу. Блок вибору спекулярної емпіричної ДФВЗ призначений для визначення найбільш продуктивної емпіричної ДФВЗ, що забезпечує встановлений користувачем прийнятний рівень точності апроксимації ДФВЗ Блінна. На виході з блоку визначається індекс обраної ДФВЗ. Блок вибору ДФВЗ для фізично-точного рендерингу на основі даних про тип (загальний, тканина, волосся, багат шарова поверхня) і шорсткість матеріалу α дозволяє визначити тип ДФВЗ (фізично-точна для гладких поверхонь, фізично-точна для шорстких поверхонь, спрощена фізично-точна для шорстких поверхонь, спеціального типу поверхні), а також індекс підбраної ДФВЗ.



Рисунок 8 – Структурна схема підсистеми адаптивного вибору моделі освітлення

Підсистема визначення дистрибутивної функції (рис. 9) призначена для обчислення значення двопроменевої функції відбивної здатності, підбраної за допомогою підсистеми вибору адаптивної

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

моделі освітлення. Для подальшого розрахунку ДФВЗ використовують блоки визначення $\cos(\vec{L}, \vec{N})$, $\cos(\vec{N}, \vec{H})$, $\cos(\vec{N}, \vec{V})$. Блок розрахунку емпіричної ДФВЗ (рис. 10) застосовується, якщо користувачем визначено напрям високопродуктивної візуалізації. Розраховується значення функції, відповідної підбраному індексу спекулярної емпіричної ДФВЗ. До переліку можливих функцій належать запропоновані апроксимована ДФВЗ Блінна-Фонга, модифіковані ДФВЗ Шліка, косинус-квадратичні ДФВЗ, ДФВЗ на основі розрахунку кута між векторами, комбіновані ДФВЗ, енергетично-коректні ДФВЗ [13-15]. Якщо користувачем обрано напрям фізично-точного рендерингу, залежно від підбраного індексу типу ДФВЗ викликається блок розрахунку мікрофасетної ДФВЗ або блок розрахунку ДФВЗ спеціальних поверхонь.

Блок розрахунку мікрофасетної ДФВЗ базується на обробці вихідних значень блоку обчислення D (розподілу мікрофасет, рис. 11 а), блоку обчислення F (коефіцієнта Френеля, рис. 11 б) та блоку обчислення G (коефіцієнта затінення-маскування, рис. 11 с). Кожна зі зазначених складових обчислюється залежно від визначеного індексу конкретної фізично-точної ДФВЗ. Зазначені складові можуть бути розраховані, використовуючи запропоновані спрощені вирази обчислення коефіцієнта Френеля та функції затінення-маскування для GGX-розподілу [16].

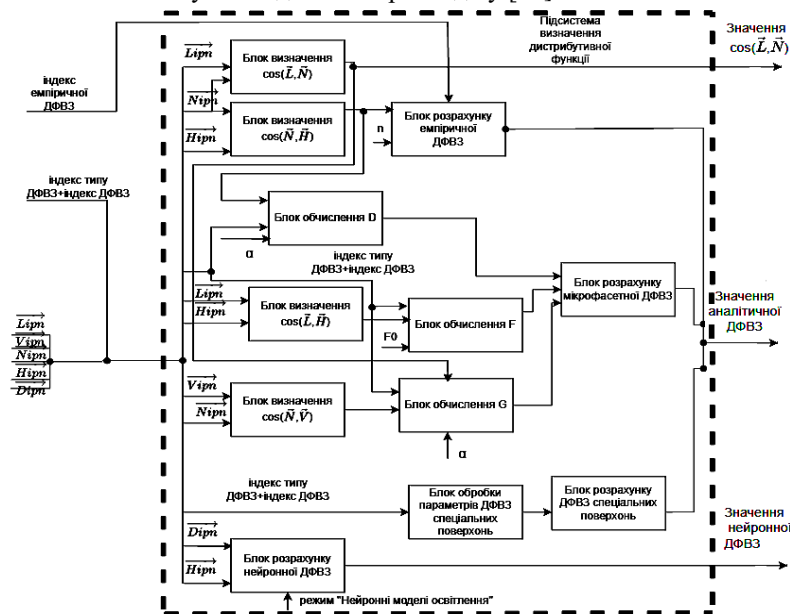


Рисунок 9 – Структурна схема підсистеми визначення дистрибутивної функції

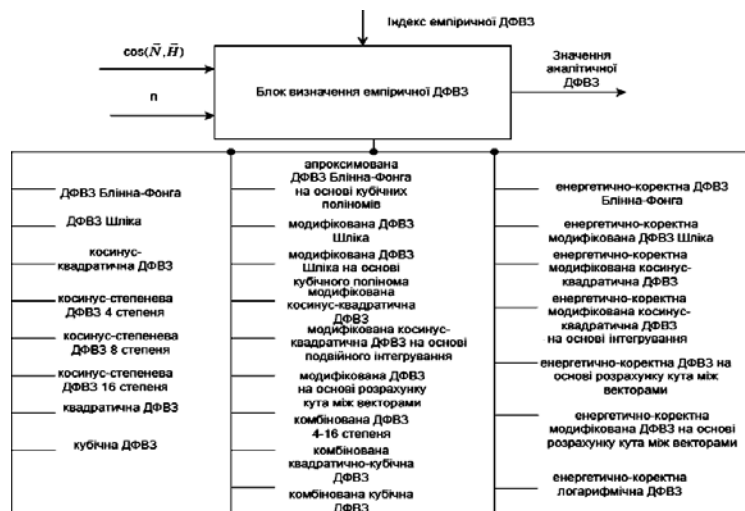
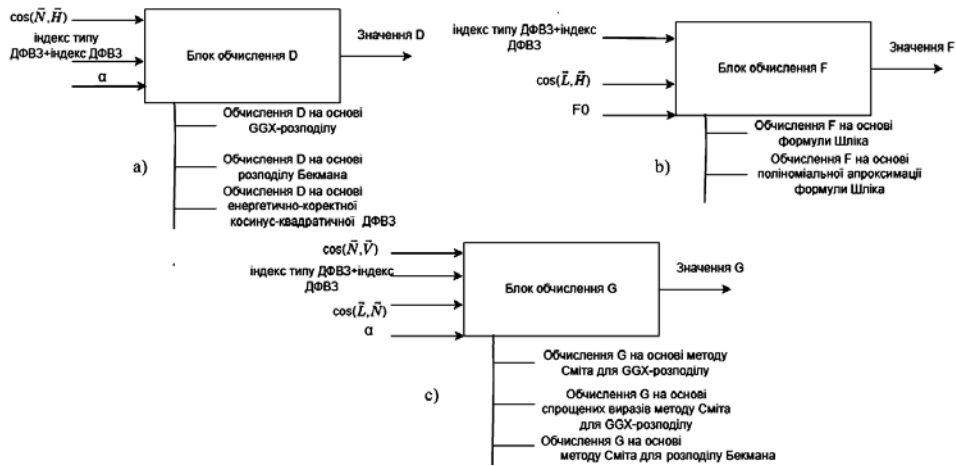


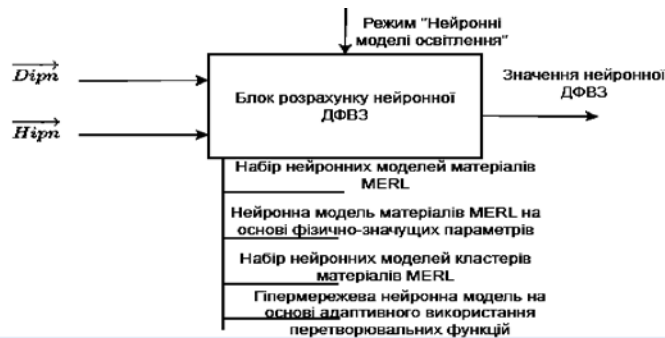
Рисунок 10 – Структурно-ієрархічна схема блоку розрахунку емпіричної ДФВЗ

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

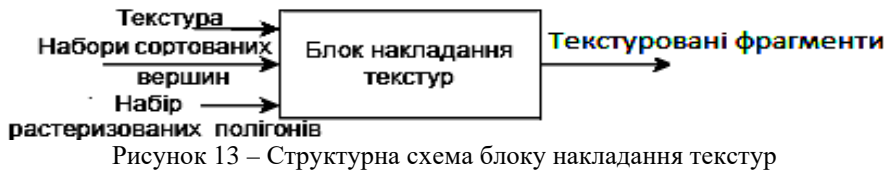


Блок розрахунку ДФВЗ спеціальних поверхонь використовує вихідні дані блоку обробки параметрів ДФВЗ спеціальних поверхонь. Даний блок на основі індексу ДФВЗ зчитує значення параметрів відповідної функції, наприклад, ДФВЗ для волосся.

Блок розрахунку нейронної ДФВЗ (рис. 12) забезпечує реалізацію прогнозування значення ДФВЗ на основі багаточарового перцептрона. До моделей, що можуть використовуватись, належать запропоновані нейронна модель на основі фізично-значущих параметрів, нейронні моделі кластерів матеріалів MERL, гіпермережева модель на основі адаптивного використання перетворювальних функцій. Даний блок використовується, якщо відмічено радіокнопку «Нейронні моделі освітлення».



Блок накладання текстур (рис. 13) призначений для встановлення відповідностей між ділянками текстури і кожним сформованим фрагментом.



Підсистема визначення інтенсивності кольору (рис. 14) призначена для розрахунку інтенсивностей кольору пікселів I_p . Блок визначення інтенсивності кольору пікселя поєднує вихідні значення блоків визначення фонові, дифузної та спекулярної складових, текстурні дані. Вхідними даними цих блоків є коефіцієнти фонового освітлення k_a , дифузного (k_d) і спекулярного (k_s) відбиття світла, інтенсивності фонового освітлення I_a та джерела світла I , значення $\cos(\vec{L}, \vec{N})$. При застосуванні нейронної ДФВЗ використовується блок для спільного визначення дифузної та спекулярної складових. Блок антиаліазингу оновлює інтенсивності кольору пікселів I_{ap} після згладження контурів зображення.

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

Підсистема трасування променів (рис. 15) призначена для відтворення складних ефектів багаторазового відбиття світла, заломлення, каустик, складних тіней. Підсистема за допомогою відповідних блоків реалізує побудову ієрархії обмежувальних об'ємів (BVH – Bounding Volume Hierarchies), генерацію променів, обхід BVH і відсікання вузлів сцени, перевірки перетинів променів із примітивами, рекурсивне оновлення інтенсивності кольору, знешумлення сформованого зображення.

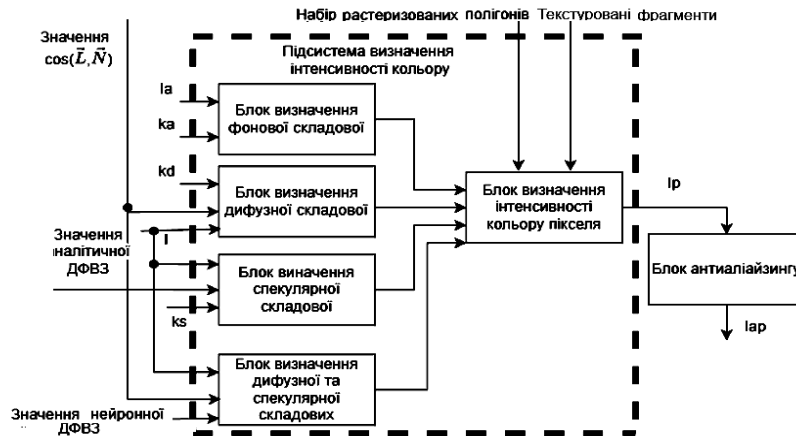


Рисунок 14 – Структурна схема підсистеми визначення інтенсивності кольору



Рисунок 15 – Структурна схема підсистеми трасування променів

Підсистему нейронного рендерингу (рис. 16) доцільно застосовувати для високопродуктивної візуалізації складних оптичних і об'ємних ефектів, віддалених об'єктів, динамічних кадрів, що суттєво не відрізняються між собою. Вона включає блок перетворення об'єктів для нейронної обробки, блок аналізу словесного опису завдання, блок нейронних перетворень для формування відповідної частини сцени.

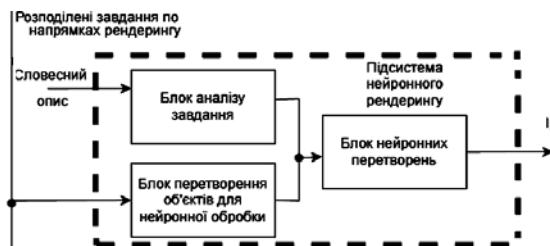


Рисунок 16 – Структурна схема підсистеми нейронного рендерингу

Блок комбінування результатів формування зображення (рис. 17) забезпечує поєднання вихідних даних з трьох гілок системи гібридного рендерингу й формування кінцевого скомпанованого зображення.

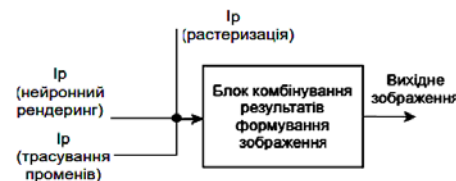


Рисунок 17 – Структурна схема блоку комбінування результатів формування зображення

На рис. 18 наведено загальну структурну схему запропонованої системи.

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

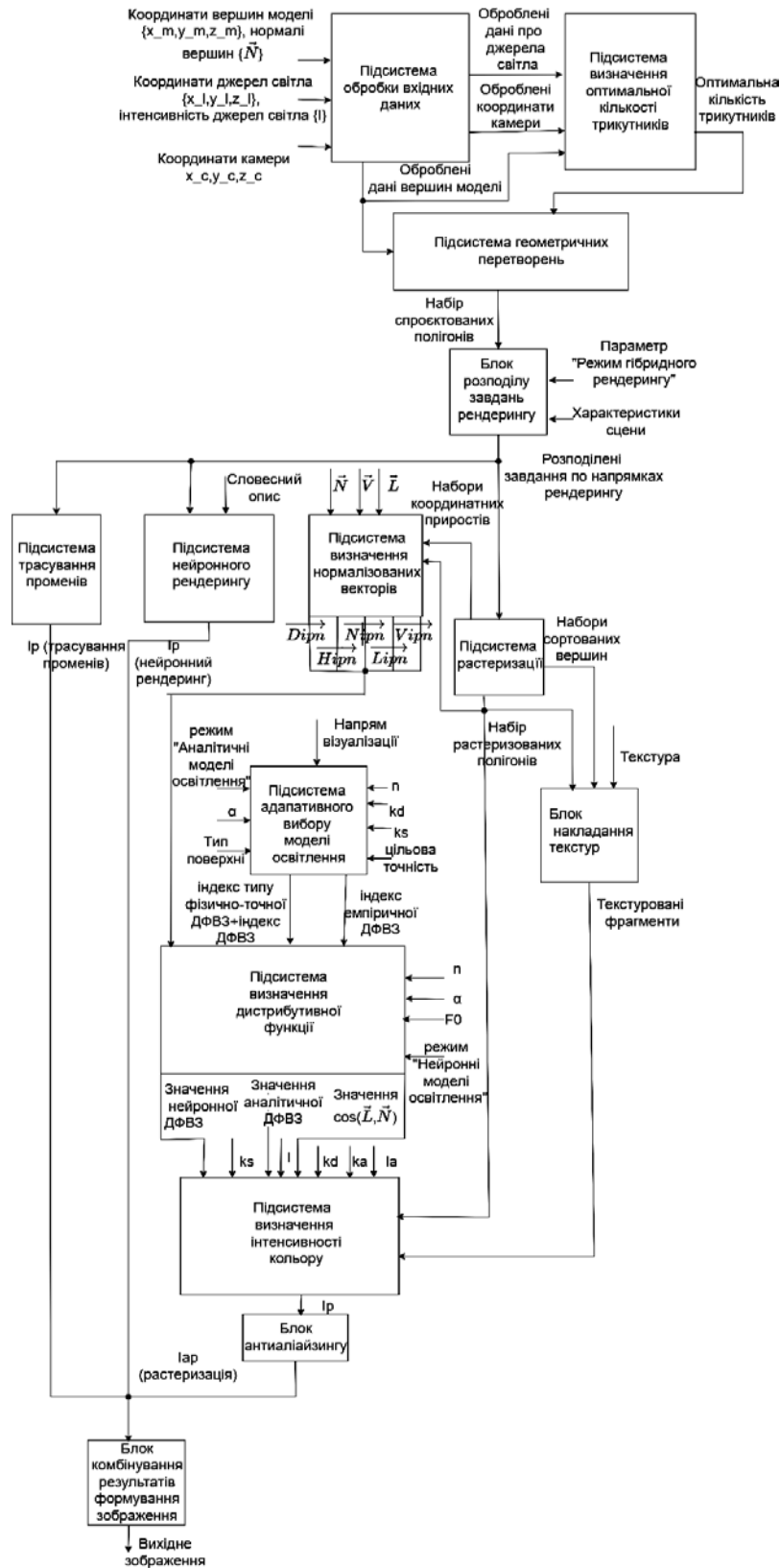


Рисунок 18 – Структурна схема запропонованої системи 3D-рендерингу

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

На відміну від відомих архітектур програмних систем рендерингу, розроблена архітектура полягає в інтеграції програмних блоків, що реалізують запропоновані аналітичні та нейронні моделі відбивної здатності, методи нормалізації векторів, визначення оптимальної кількості трикутників і адаптивного вибору ДФВЗ, разом із підсистемами растеризації, трасування променів і нейронного рендерингу. Нова архітектура системи рендерингу забезпечує більш ефективне та високоякісне формування 3D-зображень.

ВИСНОВКИ

Запропоновано нову архітектуру системи 3D-візуалізації, що базується на концепції гібридного рендерингу та поєднує підсистеми растеризації, трасування променів і нейронного рендерингу. Особливістю розробленої архітектури є інтеграція блоків на основі нових моделей відбиття світла, інтелектуальних методів рендерингу та методів нормалізації векторів. Це дозволяє підвищити реалістичність і продуктивність формування зображень у режимі реального часу.

ПОДЯКИ

Дослідження виконано за підтримки проекту (№ держреєстрації 0124U001134) Міністерства освіти і науки України

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

1. M. Pharr, W. Jakob, and G. Humphreys, *Physically Based Rendering, fourth edition: From Theory to Implementation 4th Edition*. Cambridge, MA, USA: The MIT Press, 2023.
2. S. Marschner and P. Shirley, *Fundamentals of Computer Graphics: International Student Edition 5th Edition*. Boca Raton, FL, USA: CRC Press / Taylor & Francis Group, 2021.
3. J. M. Blain, *The complete guide to Blender graphics, computer modeling and animation. Fifth edition*. Boca Raton, FL, USA: CRC Press / Taylor & Francis Group, 2019.
4. "BRDF". GitHub.com. <https://github.com/wdas/brdf> (accessed May 09, 2026).
5. "Mitsuba 3". Mitsuba.readthedocs.io. <https://mitsuba.readthedocs.io/en/stable/index.html#> (accessed May 09, 2026).
6. Borges. "IDX3D". GitHub.com. <https://github.com/AlessandroBorges/IDX3D/tree/master/source/idx3d> (accessed May 09, 2026).
7. "V-Ray for SketchUp — Key features". Chaos.com. <https://www.chaos.com/vray/sketchup/features> (accessed May 09, 2026).
8. "Modern Physically-Based Rendering". RenderMan.Pixar.com. <https://renderman.pixar.com/tech-specs> (accessed May 09, 2026).
9. "Features". UnrealEngine.com. <https://www.unrealengine.com/features> (accessed May 09, 2026).
10. O. Romanyuk and Y. Zavalniuk, "Deep Learning-Based Determination of Optimal Triangles Number of Graphic Objects Polygonal Model", in *5th International Workshop on Intelligent Information Technologies and Systems of Information Security*, Khmelnytskyi, 2024, pp. 39–51.
11. O. Romanyuk, Y. Zavalniuk, P. Mykhaylov, R. Chekhmestruk, N. Titova, and S. Romanyuk, "Accelerated Vector Normalization for Rendering Tasks", in *2024 14th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT)*, Ceske Budejovice, 2024, pp. 640–644.
12. Y. K. Zavalniuk and O. N. Romanyuk, "Adaptive surface reflectance model selection for rendering tasks", *Scientific works of Donetsk National Technical University. Series: "Informatics, Cybernetics and Computer Science"*, vol. 39, no. 2, pp. 18-30, 2024.
13. O. Romanyuk, Y. Zavalniuk, O. Romanyuk, S. Kotlyk, O. Bobko, and O. Melnyk, "New Illumination Model for Rendering", in *2025 15th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT)*, Sibenik, 2025, pp. 723–727.
14. O. Romanyuk et al., "Optical system visualization of combined reflectance model based on cubic and quadratic functions", in *Optical Fibers and Their Applications 2023*, Lublin, 2023, Art. no. 129850C.
15. O. Romanyuk, Y. Zavalniuk, O. Romanyuk, A. Snigur, N. Titova, and V. Maidaniuk, "The development of physically correct reflectance model based on logarithm function", in *2023 13th international conference on advanced computer information technologies (ACIT)*, Wrocław, 2023, pp. 483–487.
16. Y. K. Zavalniuk, O. N. Romanyuk, O. Y. Stakhov, and O. V. Romanyuk, "A new microfacet light reflection model based on the GGX distribution", *Scientific works of Donetsk National Technical University. Series: "Informatics, Cybernetics and Computer Science"*, vol. 40, no. 1, pp. 70-79, 2025.
17. Bisikalo, O., Kharchenko, V., Kovtun, V., Krak, I., Pavlov, S. Parameterization of the Stochastic Model for Evaluating Variable Small Data in the Shannon Entropy Basis, *Entropy*, 2023, 25(2), 184

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

Дата надходження: 10.03.2026

Дата прийняття до друку після рецензування: 15.05.2026

Дата публікації: 18.06.2026

*Ця робота ліцензується відповідно до
[Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)*

ЗАВАЛЬНЮК ЄВГЕН КОСТЯНТИНОВИЧ – аспірант кафедри програмного забезпечення, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна, *e-mail: qq9272627@gmail.com*
<https://orcid.org/0009-0005-1202-4653>

РОМАНЮК ОЛЕКСАНДР НИКИФОРОВИЧ – д.т.н., професор, завідувач кафедри програмного забезпечення, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна,
e-mail: rom8591@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2245-3364>

ПАВЛОВ ВОЛОДИМИР СЕРГІЙОВИЧ – Ph.D., старший науковий співробітник кафедри біомедичної інженерії та оптико-електронних систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна, *e-mail: machinehead6926@gmail.com*, <https://orcid.org/0000-0002-0717-7082>

БОБКО ОЛЕКСІЙ ЛЕОНІДОВИЧ – аспірант кафедри програмного забезпечення, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна, *e-mail: oleksii.bobko@gmail.com*,
<https://orcid.org/0009-0000-1753-279X>

НОВОСЕЛЬЦЕВ ОЛЕКСАНДР ОЛЕКСАНДРОВИЧ – аспірант кафедри програмного забезпечення, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна,
e-mail: sasha_novoseltsev@icloud.com, <https://orcid.org/0009-0005-3152-1794>

**Yevhen ZAVALNIUK, Oleksandr ROMANYUK, Volodymyr PAVLOV, Oleksii BOBKO,
Oleksandr NOVOSELTSEV**

**NEW SOFTWARE SYSTEM ARCHITECTURE FOR HIGHLY, REALISTIC
AND HIGH-PERFORMANCE RENDERING OF 3D IMAGES**

Vinnytsia National Technical University