

УДК 004.92

О. Н. Романюк, О. О. Дудник, Д. А. Озерчук

ПІДВИЩЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ ЗАФАРБОВУВАННЯ ПРИ ВИКОРИСТАННІ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ІНТЕНСИВНОСТЕЙ КОЛЬОРУ ПОВЕРХНІ ДРУГОГО ПОРЯДКУ

Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця

Анотація. Підвищення реалістичності відтворення графічних сцен передбачає не тільки збільшення рівня деталізації поверхонь об'єктів реального світу але й використання більш складних моделей освітлення. Це гостро ставить питання про підвищення продуктивності графічних систем, особливо при формуванні динамічних зображень у реальному часі та в інтерактивному режимі, коли передбачається, що траєкторії руху об'єктів не задано заздалегідь, а визначаються діями користувача в процесі взаємодії із системою.

До високопродуктивних методів зафарбовування відносять метод зафарбовування з використанням поверхні другого порядку для визначення інтенсивностей кольорів. Цей метод передбачає розрахунок нормалізованих векторів не для всіх, а тільки для декількох точок поверхні.

Отримано нові аналітичні залежності для визначення інтенсивності кольору точки рядка rasterизації через інтенсивності кольорів сусідніх точок. Отримані залежності не використовують довготривалі мікрооперації множення. Виведено формулу для визначення інтенсивностей кольорів в кінцевих точках цифрових сегментів, на які розбито рядок rasterизації. Наведено структурні схеми для визначення інтенсивностей кольорів. Отримано порівняльні оцінки підвищення продуктивності.

Результати досліджень можуть бути використані у високопродуктивних системах тривимірної графіки.

Ключові слова: зафарбовування, rasterизація, поверхні другого порядку, інтенсивність кольору, тривимірне моделювання, метод Фонга, метод Гуро.

Аннотация. Повышение реалистичности воссоздания графических сцен предусматривает не только увеличение уровня детализации поверхностей объектов реального мира, но и использование более сложных моделей освещения. Это остро ставит вопрос о повышении продуктивности графических систем, особенно при формировании динамических изображений в реальном времени и в интерактивном режиме, когда предполагается, что траектории движения объектов не заданы заранее, а определяются действиями пользователя в процессе взаимодействия с системой.

К высокопроизводительным методам закраски относят метод закраски с использованием для определения интенсивностей цвета поверхности второго порядка. Этот метод предусматривает определение нормализованных векторов не для всех, а только для некоторых точек поверхности.

Получено новые аналитические зависимости для определения интенсивности цвета в точке строки rasterизации через интенсивность цвета соседних точек. Полученные зависимости не используют длинные микрооперации. Выведено формулу для определения интенсивности цвета в конечных точках цифровых сегментов, на которые разбита строка rasterизации. Предоставлено структурные схемы для определения интенсивности цвета. Получено сравнительные оценки повышения производительности.

Полученные результаты могут быть использованы в высокопроизводительных системах трехмерной графики.

Ключевые слова: закраска, rasterизация, поверхности второго порядка, интенсивность цвета, трехмерное моделирование, метод Фонга, метод Гуро.

Abstract. Increasing the realism of the reproduction of graphic scenes involves not only increasing the level of detail of the surfaces of real-world objects, but also the use of more complex lighting models. This raises the question of improving the performance of graphics systems, especially in the formation of dynamic images in real time and interactively, when it is assumed that the trajectory of objects is not set in advance, but determined by user actions in interaction with the system.

High-performance shading methods include the method of shading with the use of second-order surface to determine color intensities. This method involves the calculation of normalized vectors not for all, but only for a few points on the surface.

New analytical dependencies for calculating the color intensity of a point on a rasterization row using color intensity of neighboring points are obtained. The obtained dependencies do not use long-term multiplication microoperations. A formula for computing color intensities at the endpoints of digital segments into which the rasterization string is divided is derived. Structural diagrams for determining color intensities are given. Comparative estimates of productivity increase are obtained.

Obtained results can be used in high-performance three-dimensional graphics systems.

Key words: shading, rasterization, surface of the second order, color intensity, 3D modeling, Phong shading, Gourand shading.

DOI: <https://doi.org/10.31649/1999-9941-2021-51-2-51-59>.

Вступ

Етап зафарбовування [1-6] – це етап кінцевої візуалізації, на якому згідно з даними, отриманими на етапі геометричних перетворень, формуються пікселі зображення, для яких визначаються екранні координати та інтенсивності кольору. Цей етап вважається найбільш трудомістким у графічному конвеєрі, оскільки пов'язаний із попіксельними діями, складними обчисленнями та передбачає врахування багатьох параметрів. Рендеринг у загальному обсязі обчислень із формування тривимірних сцен складає 60-80 % [2], тому в значній мірі визначає продуктивність графічних систем.

Підвищення реалістичності відтворення графічних сцен передбачає не тільки збільшення рівня деталізації поверхонь для коректної апроксимації об'єктів реального світу але й використання більш складних моделей освітлення. Це гостро ставить питання про підвищення продуктивності графічних систем, особливо при формуванні динамічних зображень у реальному часі та в інтерактивному режимі, коли передбачається, що траєкторії руху об'єктів не задано заздалегідь, а визначаються діями

користувача в процесі взаємодії із системою. Недостатня продуктивність графічних систем є також завадою до моделювання у сценах фізичних процесів і збільшення кількості динамічних об'єктів.

Оскільки традиційні методи, засоби та підходи не задовольняють вимогам по продуктивності для багатьох галузей застосування тривимірної комп'ютерної графіки, то існує важлива науково-прикладна задача – розробка теоретичних основ високопродуктивного рендерингу тривимірних графічних зображень.

У роботі розглянуто питання використання поверхні другого прядку для високопродуктивного зафарбовування поверхонь тривимірних графічних сцен.

Аналіз методів зафарбовування

Методи, які використовуються для моделювання освітлення, оперують із розсіяним і відбитим світлом [2, 5]. Відбите світло у своєму складі має дві компоненти: дифузну [2, 7] та спекулярну [2, 5, 7]. Розсіяне (фонове) світло – це світло, яке відбивається від навколишнього середовища. Точне моделювання даної складової світла вимагає великих обчислювальних витрат, а тому воно при використанні локальних моделей освітлення апроксимується [8].

Для врахування фонового освітлення можна припустити, що всі поверхні повністю освітлюються розсіяним світлом I_a . При цьому фоновий вклад у дифузне відбиття в будь-якій точці поверхні буде дорівнювати [2, 5, 7] $I_{am} = I_a \cdot k_a$, де k_a – коефіцієнт відбиття розсіяного світла ($0 \leq k_a \leq 1$).

Дифузне відбиття характерно для матових і шорстких поверхонь із хаотичними нерівностями, розміри яких співставні з довжиною хвилі або перевищують її [2, 5, 7]. Дифузне відбиття визначає видимість навколишніх тіл, оскільки кожна точка освітленої поверхні випромінює відбиті промені в усі сторони.

При наявності в сцені точкового джерела світла [1, 2] інтенсивність дифузного відбиття пропорційна косинусу кута між нормаллю до поверхні й напрямком на джерело світла \vec{L} . У цьому випадку для обчислення інтенсивності дифузного відбиття застосовують закон косинусів Ламберта [2, 7]

$$I_d = I_0 \cdot k_d \cdot \cos \varphi,$$

де I_0 – інтенсивність джерела світла, $k_d \in [0,1]$ – коефіцієнт дифузного відбиття, φ – кут між вектором \vec{L} і нормаллю \vec{N} до поверхні (рис. 1).

На рис. 1 відображено також вектор \vec{V} до спостерігача, серединний вектор

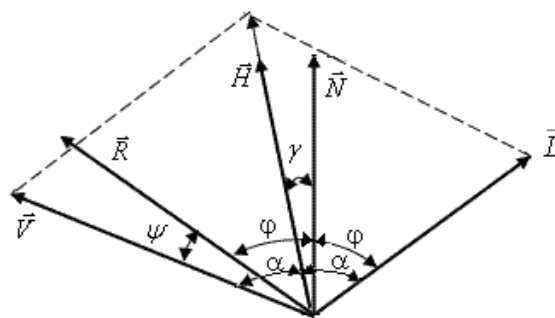


Рисунок 1 – Вектори нормалей до точки поверхні

Історично першим методом зафарбовування був метод однотонного зафарбовування [2], згідно з яким для кожного плоского трикутника визначався вектор нормалі, а на його основі – колір. Складові трикутники об'єкта заповнювалися одним кольором без його градації, що призводило до різкої зміни інтенсивності кольору на межах трикутників. Однотонне зафарбовування вимагає найменших обчислювальних затрат. Воно хоча й має низьку якість, але внесено до функцій Direct3D і підтримується тривимірними акселераторами.

До найпоширеніших методів зафарбовування відносять метод Гуро [1, 2, 4, 9], який забезпечує прийнятний компроміс між швидкодією формування тривимірних зображень та їх якістю. Процес зафарбовування має такі стадії [2]: а) розраховують вектори нормалей до кожної грані; б) шляхом усереднення нормалей усіх граней, яким належить вершина, розраховують нормалі у вершинах трикутника (багатокутника); с) визначають інтенсивності кольору у вершинах багатокутника, використовуючи значення нормалей; д) зафарбовують ділянку, обмежену багатокутником, шляхом

лінійної інтерполяції інтенсивностей кольорів вздовж ребер, а потім і між ребрами вздовж кожного рядка растеризації. Останнім часом затінення за Гуро часто використовують як проміжну стадію з інтерактивного формування 3D-зображення, покладаючи побудову повноцінної сцени на етап фінального рендерингу.

До недоліків методу Гуро можна віднести [2]: а) метод використовує для визначення інтенсивностей кольору лінійну інтерполяцію, в той час як дифузна та спекулярна складові кольору мають нелінійний характер зміни; б) не враховується локальна кривизна поверхні, оскільки вектори нормалей визначаються тільки для вершин трикутника; в) відблиски відтворюються тільки в разі, якщо вершини трикутників знаходяться в їх зоні (відблиск, який не має спільних точок із вершинами трикутників, або розташований усередині трикутника, не буде сформовано); г) на межах двох трикутників проявляються смуги Маха [2, 5], які пов'язані з літеральним гальмуванням на сітківці ока; д) має місце зміна інтенсивності кольору зображення від кадру до кадру, що виражається в миготінні, особливо відблисків, оскільки при формуванні динамічних зображень змінюється структура та положення вузлів триангуляційної мережі; е) наявність артефакту типу "зірка", який полягає у тому, що відблиск, який повинен мати форму еліпса, має форму зірки. Це пояснюється тим, що ділянки відблиску формуються в різних трикутниках і проявляється ефект смуг Маха; ж) метод не враховує перспективу об'єкта.

При зафарбовуванні за методом Фонга інтенсивність кольору точок визначають за формулою [1, 2, 5, 10]:

$$I = I_a k_a + I_l (k_d \cos \psi + k_s \cos^n \lambda) \quad (1)$$

де I_a, I_l – інтенсивності відповідно розсіяного і направлено джерел світла, k_a, k_d, k_s – коефіцієнти розсіяного, дифузійного і дзеркального світла, ψ – кут між напрямком світла і вектором нормалі, λ – кут між відбитим напрямком світла і спостерігачем, n – коефіцієнт яскравості поверхні, $\cos^n \lambda$ – дистрибутивна функція (BRDF) [8], яка відповідає за оптичні характеристики поверхні.

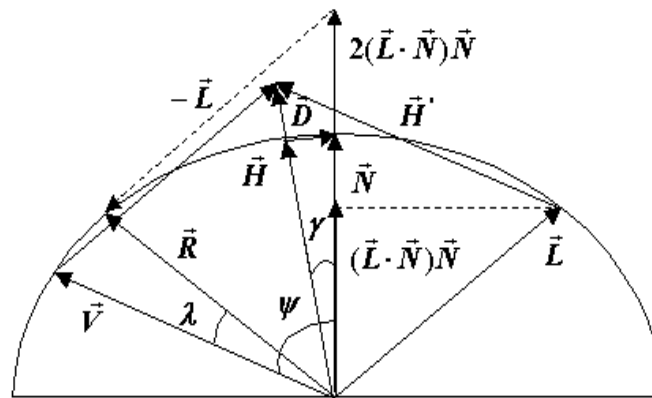


Рисунок 2 – Визначення кутів для моделей освітлення Фонга і Бліна

У більшості випадків при реалізації зафарбовування за Фонгом використовуються моделі освітлення Бліна та Фонга [2, 5, 7, 10].

При використанні моделі освітлення Фонга (рис.2) у формулі (1) $\cos \lambda = \vec{R} \cdot \vec{V} = 2(\vec{L} \cdot \vec{V})(\vec{N} \cdot \vec{V}) - \vec{V} \cdot \vec{L}$. Для моделі освітлення Бліна $\cos \lambda$ заміняють на $\cos \gamma = \vec{H} \cdot \vec{L}$, де $\vec{H} = (\vec{L} + \vec{V}) / |\vec{L} + \vec{V}|$.

Модель освітлення Фонга вважається точнішою, однак потребує більшого обсягу обчислень. Продуктивність зафарбовування при використанні моделі Бліна значно вища порівняно з моделлю Фонга. Це пояснюється тим, що у випадку, коли джерело світла та спостерігач розташовані на нескінченній відстані від об'єкта (найпоширеніший випадок у комп'ютерній графіці), значення вектора \vec{H} для моделі освітлення Бліна розраховується один раз для кожного кадру зображення. При використанні ж моделі освітлення Фонга для кожної точки поверхні знаходять вектор \vec{R} . У подальшому будемо використовувати модель освітлення Бліна як таку, що має меншу обчислювальну складність.

При зафарбовуванні 3D-об'єктів за методом Фонга визначають нормовані вектори до поверхні об'єкта, джерела світла й спостерігача, а також допоміжні вектори залежно від вибору моделі освітлення. Нормалізація вектора [2, 5, 11, 12] потребує виконання трьох операцій ділення, трьох операцій множення, двох операцій додавання та операцію знаходження квадратного кореня, виконання яких достатньо трудомістке. У зв'язку з цим актуальним питанням є зменшення при зафарбовуванні кількості використаних нормалізованих векторів.

Один з таких методів зафарбовування передбачає використання для визначення інтенсивності кольору поверхні другого порядку, для якої нормалізовані вектори визначаються тільки в деяких точках. Інтенсивність кольору в точці на поверхні другого порядку задано поліномом [13]

$$I(x, y) = A \cdot x^2 + B \cdot y^2 + C \cdot x \cdot y + D \cdot x + E \cdot y + F.$$

Із рівняння видно, що необхідно визначити шість невідомих A, B, C, D, E, F . Це передбачає формування й розв'язання системи із шести рівнянь. Оскільки для трикутника задаються інтенсивності кольору тільки в трьох його вершинах, то найпростіше до визначити інтенсивності кольору в середніх точках на ребрах трикутника, що дасть можливість скласти систему із шести рівнянь.

Знаходження невідомих A, B, C, D, E, F наведено в [13]. У подальшому метод, який використовує для визначення інтенсивності кольору наведену формулу, будемо називати «прямим».

Мета статті – підвищення продуктивності зафарбовування при використанні для визначення інтенсивностей кольору поверхні другого порядку за рахунок використання нових аналітичних залежностей.

Модифікований метод зафарбовування

Розглянемо рядок пастеризації (рис. 3), паралельний осі абсцис.

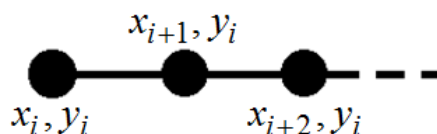


Рисунок 3 – Рядок rasterизації, паралельний осі абсцис

Для поточної точки (x_i, y_i) інтенсивність кольору визначаємо за формулою

$$I(x_i, y_i) = Ax_i^2 + By_i^2 + Cx_i y_i + Dx_i + Ey_i + F. \quad (2)$$

Виконаємо крокове переміщення по осі x і знайдемо інтенсивність кольору в точці (x_{i+1}, y_i)

$$\begin{aligned} I(x_{i+1}, y_i) &= A(x_i + 1)^2 + By_i^2 + C(x_i + 1)y_i + D(x_i + 1) + Ey_i + F = \\ &= Ax_i^2 + 2Ax_i + A + By_i^2 + Cx_i y_i + Cy_i + Dx_i + D + Ey_i + F = \\ &= I(x_i, y_i) + 2Ax_i + A + Cy_i + D. \end{aligned} \quad (3)$$

Для рядка rasterизації значення Cy_i не змінюється, тому його доцільно обчислювати тільки один раз і в подальшому використовувати як операнд.

При зміщенні на дві точки (x_{i+2}, y_i) , інтенсивність кольору дорівнює

$$\begin{aligned} I(x_{i+2}, y_i) &= A(x_i + 2)^2 + By_i^2 + C(x_i + 2)y_i + D(x_i + 2) + Ey_i + F = \\ &= Ax_i^2 + 4Ax_i + 4A + By_i^2 + Cx_i y_i + 2Cy_i + Dx_i + 2D + Ey_i + F = \\ &= I(x_i, y_i) + 4Ax_i + 4A + 2Cy_i + 2D. \end{aligned} \quad (4)$$

З формул (3) і (4) видно, що інтенсивність кольору в поточній точці можна визначити через інтенсивності кольору в двох попередніх точках:

$$\begin{aligned}
 I(x_{i+2}, y_i) &= I(x_i, y_i) + 4Ax_i + 4A + 2Cy_i + 2D = \\
 &= 2[I(x_i, y_i) + 2Ax_i + A + Cy_i + D] - I(x_i, y_i) + 2A = \\
 &= 2I(x_{i+1}, y_i) - I(x_i, y_i) + 2A.
 \end{aligned} \tag{5}$$

Розрахунок за формулою (5) для визначення інтенсивності кольору в точці (x_{i+2}, y_i) значно простіший порівняно з формулою (2), оскільки передбачається використання тільки двох мікрооперацій зсуву та двох мікрооперацій додавання. При цьому не використовується «довга» операція множення.

На рис. 4 наведено структурну схему для визначення $I(x_{i+2}, y_i)$.

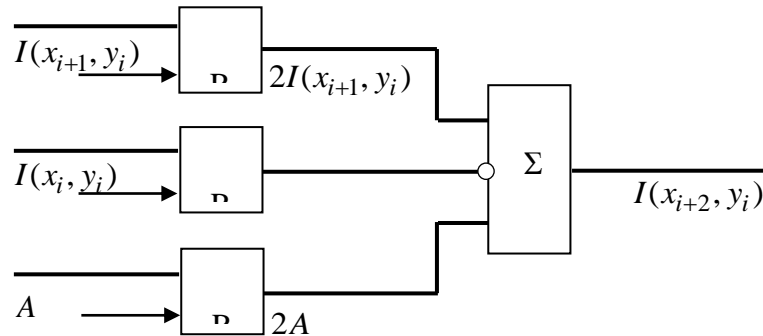


Рисунок 4 – Структурна схема блоку для визначення $I(x_{i+2}, y_i)$

Знайдемо значення інтенсивності кольору в точці (x_{i+1}, y_i) через інтенсивності кольорів в двох найближчих сусідніх точках. Для цього використаємо формулу (5).

$$I(x_{i+1}, y_i) = \frac{I(x_i, y_i) + I(x_{i+2}, y_i) - 2A}{2}. \tag{6}$$

Порівняння формул (5) і (6) показує, що їхня обчислювальна складність однакова.

При зміщенні на три точки, інтенсивність кольору в точці (x_{i+3}, y_i) дорівнює

$$\begin{aligned}
 I(x_{i+3}, y_i) &= A(x_i + 3)^2 + By_i^2 + C(x_i + 3)y_i + D(x_i + 3) + Ey_i + F = \\
 &= Ax_i^2 + 6Ax_i + 7A + By_i^2 + Cx_i y_i + 3Cy_i + Dx_i + 3D + Ey_i + F = \\
 &= I(x_i, y_i) + 6Ax_i + 9A + 3Cy_i + 3D.
 \end{aligned}$$

На жаль, в останній формулі необхідно використовувати операції множення, що, безумовно, впливає на продуктивність рендерингу.

Інтенсивність кольору в точці можна виразити через інтенсивність кольору в трьох попередніх точках згідно виразу

$$\begin{aligned}
 I(x_{i+3}, y_i) &= I(x_i, y_i) + 6Ax_i + 9A + 3Cy_i + 3D = \\
 &= [I(x_i, y_i) + 4Ax_i + 4A + 2Cy_i + 2D] + \\
 &+ [I(x_i, y_i) + 2Ax_i + A + Cy_i + D] - I(x_i, y_i) + 4A = \\
 &= I(x_{i+2}, y_i) + I(x_{i+1}, y_i) - I(x_i, y_i) + 4A.
 \end{aligned} \tag{7}$$

Визначимо інтенсивність кольору $I(x_{i+3}, y_i)$ виключно через значення інтенсивностей кольорів. Для цього знайдемо значення $4A$ через інтенсивність кольору в трьох сусідніх точках, використавши формулу (5).

$$4A = 2 \cdot 2A = 2[I(x_{i+2}, y_i) - 2I(x_{i+1}, y_i) + I(x_i, y_i)] = \\ = 2I(x_{i+2}, y_i) - 4I(x_{i+1}, y_i) + 2I(x_i, y_i).$$

Підставивши отримане значення у формулу (7) знайдемо, що

$$I(x_{i+3}, y_i) = I(x_{i+2}, y_i) + I(x_{i+1}, y_i) - I(x_i, y_i) + \\ + 2I(x_{i+2}, y_i) - 4I(x_{i+1}, y_i) + 2I(x_i, y_i) = \\ = 3I(x_{i+2}, y_i) - 3I(x_{i+1}, y_i) + I(x_i, y_i). \quad (8)$$

Множення на 3 можна замінити на операції додавання та зсуву. Наприклад, $3I(x_{i+2}, y_i) = 2I(x_{i+2}, y_i) + I(x_{i+2}, y_i)$.

$$\text{Тоді } I(x_{i+3}, y_i) = 2I(x_{i+2}, y_i) + I(x_{i+2}, y_i) - 2I(x_{i+1}, y_i) - I(x_{i+1}, y_i) + I(x_i, y_i).$$

У наведеній формулі використовуються виключно операції додавання та зсуву. На рис. 5 наведено структурну схему блоку для визначення інтенсивності кольору $I(x_{i+3}, y_i)$

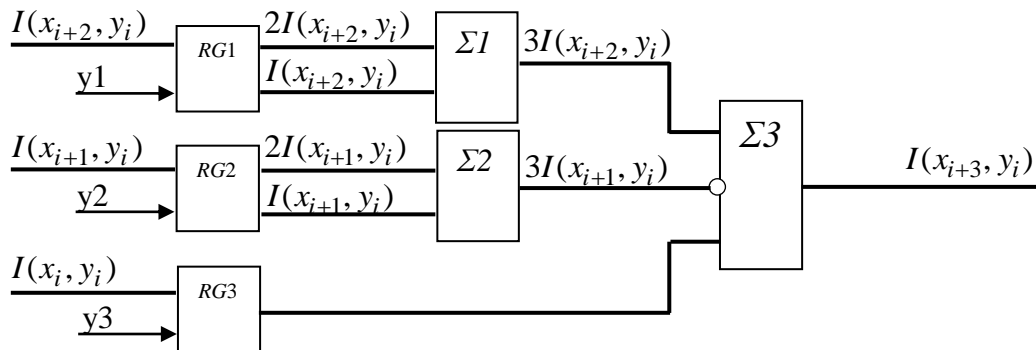


Рисунок 5 – Структурна схема блоку для визначення $I(x_{i+3}, y_i)$

У роботі [2] запропоновано розбивати рядок rasterизація на цифрові сегменти довжиною 2^k і визначати інтенсивності кольору в його кінцевих точках. Значення інтенсивності кольору в проміжних точках сегменту у подальшому визначають з використанням кодової лінійної інтерполяції.

Розглянемо визначення інтенсивності кольору в кінцевих точках цифрового сегменту довжиною 2^k

$$I(x_{i+2^k}, y_i) = A(x_i + 2^k)^2 + By_i^2 + C(x_i + 2^k)y_i + D(x_i + 2^k) + Ey_i + F = \\ = Ax_i^2 + 2 \cdot 2^k Ax_i + (2^k)^2 A + By_i^2 + Cx_i y_i + 2^k Cy_i + Dx_i + 2^k D + Ey_i + F = \\ = I(x_i, y_i) + 2^{k+1} Ax_i + 2^{2k} A + 2^k Cy_i + 2^k D.$$

Наведена формула має меншу обчислювальну складність порівняно з використанням формули (2) для визначення інтенсивностей кольору кінцевих точок. Дійсно, в цьому випадку використовується десять операцій множення та п'ять операцій додавання. При використанні отриманої формули для визначення $I(x_{i+2^k}, y_i)$ використовується тільки дві операції множення, чотири операції додавання та $(k+1) + 2k + k + k = 5k + 1$ операцій зсуву.

Порівняємо ресурсні затрати отриманих методів. Як критерій можна використати кількість операцій (множення, додавання/віднімання, зсув). Операція множення є однією з найбільш ресурснозатратних. Множення на числа типу 2^n замінюють зсувом на n розрядів.

Приведемо формулу (2) до вигляду

$$I(x_i, y_i) = x_i(Ax_i + Cy_i + D) + y_i(By_i + E) + F. \quad (9)$$

Тоді для обчислення інтенсивності кольору в точці потрібно буде виконати п'ять операцій множення та п'ять операцій додавання. Використовуючи «прямий» метод для знаходження інтенсивності кольору в n точках потрібно виконати $5n$ операцій множення та $5n$ операцій додавання.

Незалежно від методу, інтенсивність кольору в першій точці рядка растреризації завжди доведеться знаходити «прямим» методом.

Проаналізуємо знаходження інтенсивності кольору з використанням формули (3). Обчислення інтенсивності кольору в кожній точці, починаючи з другої, потребує однієї операції множення, чотирьох операцій додавання та однієї операції зсуву. Тоді для знаходження інтенсивності кольору в n точках потрібно виконати $5+(n-1)=n+4$ операцій множення, $5+4(n-1)=4n+1$ операцій додавання, $(n-1)$ операцій зсуву.

Проаналізуємо обчислення інтенсивності кольору, використовуючи формулу (5). Для кожної точки, починаючи з третьої, знаходження інтенсивності кольору потребує двох операцій зсуву, однієї операції додавання та однієї операції віднімання. Вважаючи, що для знаходження інтенсивності кольору в другій точці рядка растреризації використано попередній метод, для знаходження інтенсивності кольору в n точках потрібно виконати $5+1=6$ операцій множення, $5+4+(n-2)=n+7$ операцій додавання та $(n-2)$ операцій віднімання (оскільки віднімання реалізується через додавання, то потрібно виконати $(n+7)+(n-2)=2n+5$ операцій додавання), $1+2(n-2)=2n-3$ операцій зсуву.

Якщо обчислювати інтенсивність кольору в точці, використовуючи формулу (7), то для кожної точки, починаючи з четвертої, потрібно виконати дві операції додавання та одну операцію віднімання (тобто три операції додавання), а також дві операції зсуву. Якщо інтенсивність кольору в першій точці рядка растреризації знаходити з формули (9), у другій точці – з формули (3), у третій точці – з формули (5), то для обчислення інтенсивності кольору в n точках потрібно виконати 6 операцій множення, $5+4+2+3(n-3)=3n+2$ операцій додавання та $1+2+2(n-3)=2n-3$ операцій зсуву.

Формула (8) у неоптимізованому вигляді містить дві операції множення, операцію додавання та операцію віднімання (дві операції додавання). У випадку, коли інтенсивність кольору в перших трьох точках знаходимо аналогічно до попереднього методу, для знаходження інтенсивності кольору в n точках потрібно виконати $5+1+2(n-3)=2n$ операцій множення, $5+4+2+2(n-3)=2n+5$ операцій додавання та 3 операції зсуву.

Оптимізована формула (8) містить дві операції додавання, дві операції віднімання (всього – чотири операції додавання), дві операції зсуву. У такому випадку, для визначення інтенсивності кольору в n точках потрібно виконати 6 операцій множення, $5+4+2+4(n-3)=4n-1$ операцій додавання та $1+2+2(n-3)=2n-3$ операцій зсуву.

При використанні процесора Intel Xeon Phi [14] операція множення потребує 8 тактів ЦП, операції додавання, віднімання та зсуву – по одному такту ЦП. Щоб отримати загальну кількість тактів ЦП для кожного методу було прийнято $n=16$ та домножено отримані значення на «вартість» операції. Результати вимірювань показано в табл. 1.

Таблиця 1 – Кількість тактів ЦП, потрібних для обчислення значень інтенсивності кольору в 16 точках

Тип формули	Множення, тактів	Додавання, тактів	Зсув, тактів	Всього
Формула (2)	1280	80	0	1360
Формула (9)	640	80	0	720
Формула (3)	160	65	15	240
Формула (5)	48	37	29	114
Формула (7)	48	50	29	127
Формула (8)	256	37	3	296
Оптимізована формула (8)	48	63	29	140

При використанні формули (3) досягається підвищення продуктивності на 67% порівняно з формулою (9), при використанні формули (5) – на 84%.

Висновки

Отримано нові аналітичні залежності для визначення інтенсивності кольору точки рядка растреризації через інтенсивності кольору сусідніх точок. Формули не використовують довготривалі мікрооперації множення. Виведено формулу для визначення інтенсивностей кольору в кінцевих точках цифрових сегментів, на які розбито рядок растреризації. Наведено структурні схеми для визначення

інтенсивностей кольору. Отримано порівняльні оцінки підвищення продуктивності. Результати проведених досліджень можуть бути використані у високопродуктивних системах тривимірної графіки.

Список літератури

- [1] О. Н. Романюк, *Комп'ютерна графіка: навчальний посібник*. Вінниця, Україна: ВДТУ, 2001. 130 с.
- [2] О. Н. Романюк, та А. В. Чорний, *Високопродуктивні методи та засоби зафарбовування тривимірних графічних об'єктів. Монографія*. Вінниця, Україна: УНІВЕСУМ-Вінниця, 2006. 190 с.
- [3] О. Н. Романюк, та О. О. Дудник, "Підвищення реалістичності зафарбовування тривимірних графічних об'єктів," *Вісник ХНТУ*, № 3, с. 269-272, 2016.
- [4] А. Н. Романюк, и Т. А. Замковой, "Алгоритмы рендеринга," *Компьютеры+программы*, № 6, с. 54-57, 1998.
- [5] Д. Херн, и М. П. Бейкер, *Компьютерная графика и стандарт OpenGL*, 3-е издание. Москва, Россия: Издательский дом «Вильямс», 2005, 1168 с.
- [6] О. Н. Романюк, "Метод прискороного зафарбовування тривимірних поверхонь з урахуванням їх локальної кривизни," *Вісник Східноукраїнського національного університету*, № 12, с. 166-172, 2008.
- [7] О. Н. Романюк, "Новий підхід до визначення спекулярної складової кольору," *Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології*, № 2, с. 85-92, 2004.
- [8] О. Н. Романюк, "Класифікація дистрибутивних функцій відбивної здатності поверхні," *Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія «Інформатика, кібернетика і обчислювальна техніка»*, Випуск 9 (132), с. 145-151, 2008.
- [9] О. Н. Романюк, "Новий підхід до підвищення реалістичності зафарбовування тривимірних об'єктів за методом Гуро," *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*, № 2, с. 106-109, 2005.
- [10] О. Н. Романюк, та А. В. Чорний, "Новий підхід до реалізації процедури зафарбовування за методом Фонга," *Вісник Херсонського державного технічного університету*, Вип. 22, с. 154-160, 2003.
- [11] О. Н. Романюк, та А. А. Шаманський, "Метод зафарбовування тривимірних графічних об'єктів без нормалізації векторів нормалей," *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*, № 2 (6), с. 111-115, 2006.
- [12] О. Н. Романюк, "Використання квадратичної інтерполяції для зафарбовування тривимірних графічних об'єктів," *Реєстрація, зберігання і обробка даних*, т. 8, № 4, с. 31-37, 2006.
- [13] O. A. Romanyuk, and A. Nast, "A method for accelerated computation of color intensities for shading of three-dimensional graphics objects", in *Współczesne problemy informatyki. Algorytmy i modelowanie*. Legnica, Polska: Wydawnictwo Wyższej Szkoły Menedżerskiej, pp. 213-227, 2007.
- [14] A. Fog, *Instruction tables: Lists of instruction latencies, throughputs and micro-operation breakdowns for Intel, AMD and VIA CPUs*. Kongens Lyngby, Denmark: Technical University of Denmark, 2021.

Стаття надійшла: 30.08.2021.

References

- [1] O. N. Romaniuk, *Kompiuterna hrafika: navchalnyi posibnyk*. Vinnytsia, Ukraina: VDTU, 2001. 130s.
- [2] O. N. Romaniuk, ta A. V. Chorny, *Vysokoproduktyvni metody ta zasoby zafarbovuvannia tryvymirnykh hrafichnykh obiektiv*. Monohrafiia. Vinnytsia, Ukraina: UNIVESUM-Vinnytsia, 2006. 190 s.
- [3] O. N. Romaniuk, ta O. O. Dudnyk, "Pidvyshchennia realistychnosti zafarbovuvannia tryvymirnykh hrafichnykh obiektiv," *Visnyk KhNTU*, № 3, s. 269 272, 2016.
- [4] A. N. Romanjuk, i T. A. Zamkovej, "Algoritmy renderinga," *Computers programs*, № 6, pp. 54–57, 1998.
- [5] D. Hern, i M. P. Bejker, *Komp'juternaja grafika i standart OpenGL*, 3-e izdanie. Moskva, Rossija: Izdatel'skij dom «Vil'jams», 2005, 1168 s.
- [6] O. N. Romaniuk, "Metod pryskorenoho zafarbovuvannia tryvymirnykh poverkhon z urakhuvanniam yikh lokalnoi kryvyzny," *VISNIK of the East Ukrainian National University*, № 12, pp. 166–172, 2008.
- [7] O. N. Romaniuk, "Novyi pidkhid do vyznachennia spekuliarnoi skladovoi koloru," *Optoelectronic information-power technologies*, № 2, pp. 85–92, 2004.
- [8] O. N. Romaniuk, "Klasyfikatsiia dystributyvnykh funktsii vidbyvnoi zdatnosti poverkhni," *Naukovi pratsi Donetskoho natsionalnogo tekhnichnogo universytetu. Serii «Informatyka, kibernetyka i obchysliuvalna tekhnika»*, Vypusk 9 (132), pp. 145–151, 2008.

- [9] O. N. Romaniuk, "Novyi pidkhdid do pidvyshchennia realistychnosti zafarbovuvannia tryvymirnykh ob'ektiv za metodom Huro," *Information Technologies and Computer Engineering*, № 2, pp. 106–109, 2005.
- [10] O. N. Romaniuk, ta A. V. Chornyi, "Novyi pidkhdid do realizatsii protsedury zafarbovuvannia za metodom Fonha," *Visnyk Khersonskoho derzhavnoho tekhnichnoho universytetu*, Vyp. 22, pp. 154–160, 2003.
- [11] O. N. Romaniuk, ta A. A. Shamanskyi, "Metod zafarbovuvannia tryvymirnykh hrafichnykh ob'ektiv bez normalizatsii vektoriv normaliei," *Information Technologies and Computer Engineering*, № 2 (6), pp. 111–115, 2006.
- [12] O. N. Romaniuk, "Vykorystannia kvadratychnoi interpoliatsii dlia zafarbovuvannia tryvymirnykh hrafichnykh ob'ektiv," *Reiestratsiia, zberihannia i obrobka danykh*, t. 8, № 4, pp. 31–37, 2006.
- [13] O. A. Romanyuk, and A. Hast, "A method for accelerated computation of color intensities for shading of three-dimensional graphics objects", in *Współczesne problemy informatyki. Algorytmy i modelowanie*. Legnica, Polska: Wydawnictwo Wyższej Szkoły Menedżerskiej, pp. 213-227, 2007.
- [14] A. Fog, *Instruction tables: Lists of instruction latencies, throughputs and micro-operation breakdowns for Intel, AMD and VIA CPUs*. Kongens Lyngby, Denmark: Technical University of Denmark, 2021.

Відомості про авторів

Романюк Олександр Никифорович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри програмного забезпечення.

Дудник Олександр Олександрович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри програмного забезпечення.

Озерчук Дмитро Анатолійович – магістрант кафедри програмного забезпечення.

A. N. Romanyuk, A. A. Dudnik, D. A. Ozerchuk

ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ЗАКРАСКИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ЦВЕТА ПОВЕРХНОСТИ ВТОРОГО ПОРЯДКА

Винницкий национальный технический университет, г. Винница

O. N. Romanyuk, O. O. Dudnik, D. A. Ozerchuk

IMPROVING THE PERFORMANCE OF SHADING WHILE USING THE SECOND ORDER SURFACES TO DETERMINE COLOR INTENSITIES

Vinnitsia National Technical University, Vinnitsia