

УДК 004.925

О. Н. Романюк, М. С. Курінний, О. О. Дудник, А. В. Снігур, С. О. Романюк

МОДИФІКАЦІЯ МЕТОДУ А-БУФЕРА ДЛЯ
ЗГЛАДЖУВАННЯ ТРИВИМІРНИХ ЗОБРАЖЕНЬ

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

Анотація. Згідно з методом А-буфера для антиаліазингу тривимірних зображень використовується динамічний список фрагментів полігонів, які покривають піксел. Метод А-буфера використовує менший об'єм пам'яті порівняно із методами додаткової вибірки, однак необхідність динамічного розподілу пам'яті ускладнює його апаратну реалізацію у системах комп'ютерної графіки. При використанні фіксованої кількості фрагментів на один піксел зображення спрощується апаратна реалізація методу А-буфера, однак пам'ять використовується неефективно, оскільки кількість фрагментів для розрахунку інтенсивності кольору пікселя може суттєво відрізнятися для різних пікселів. Було запропоновано використати комбінований статично-динамічний принцип організації пам'яті, який полягає у введенні загального буфера фрагментів. Розроблено нові модифікації методу А-буфера, у яких використано:

- комбінований статично-динамічний підхід до організації пам'яті, який полягає у введенні загального буфера для зберігання надлишкових фрагментів. Запропонована модифікація має більш просту апаратну реалізацію порівняно з динамічним розподілом пам'яті та потребує менших обсягів пам'яті для зберігання фрагментів полігонів ніж фіксований розподіл;

- новий підхід до зменшення похибки обчислень інтенсивності кольору, яка має місце внаслідок відкидання фрагментів полігонів, яким не вистачило місця у буфері фрагментів. Суть підходу полягає у тому, що два найбільш віддалені від спостерігача фрагменти об'єднуються у один.

Розроблено структурну схему підсистеми растеризації тривимірних графічних об'єктів, у якій використано модифікований метод А-буфера. Розроблено комп'ютерну програму для моделювання та тестування методів згладжування, основаних на методі Абуфера. Моделювання показало, що використання запропонованого принципу розподілу пам'яті дозволяє зменшити у 1,3-3,1 рази об'єми пам'яті, необхідні для згладжування тривимірних зображень за методом А-буфера, порівняно із фіксованим розподілом пам'яті. Результати моделювання показали, що запропоноване рішення, основане на комбінуванні надлишкових фрагментів, забезпечує менше значення нормованої середньоквадратичної похибки порівняно з підходом, у якому надлишкові фрагменти відкидаються. При використанні нового методу до обробки фрагментів полігонів, згладжування навіть складних сцен за методом А-буфера можливо виконувати з використанням лише трьох фрагментів на один піксель зображення, що дозволяє зменшити об'єми пам'яті, необхідні для зберігання фрагментів полігонів.

Ключові слова: ефект аліазингу, крайовий антиаліазинг, растеризація, метод А-буфера, статично-динамічна організація пам'яті, інтенсивність кольору.

Анотація. Согласно метода А-буфера для антиалиазинга трехмерных изображений используется динамический список фрагментов полигонов, которые покрывают пиксел. Метод А-буфера использует меньший объем памяти по сравнению с методами дополнительной выборки, однако необходимость динамического распределения памяти усложняет его аппаратную реализацию в системах компьютерной графики. При использовании фиксированного количества фрагментов на один пиксел изображения упрощается аппаратная реализация метода А-буфера, однако память используется неэффективно, поскольку количество фрагментов для расчета интенсивности цвета пикселя может существенно отличаться для разных точек. Было предложено использовать комбинированный статически- динамический принцип организации памяти, который заключается во введении общего буфера фрагментов. Разработаны новые модификации метода А-буфера, в которых использованы:

- комбинированный статически- динамический подход к организации памяти, который заключается во введении общего буфера для хранения избыточных фрагментов. Предложенная модификация имеет более простую аппаратную реализацию по сравнению с динамическим распределением памяти и требует меньших объемов памяти для хранения фрагментов полигонов чем фиксированное распределение;

- новый подход к уменьшению погрешности вычислений интенсивности цвета, которая имеет место в результате отбрасывания фрагментов полигонов, которым не хватило места в буфере фрагментов. Суть подхода заключается в том, что два наиболее удаленные от наблюдателя фрагменты объединяются в один.

Разработана структурная схема подсистемы растеризации трехмерных графических объектов, в которой использовано модифицированный метод А-буфера. Разработана компьютерная программа для моделирования и тестирования методов сглаживания, основанных на методе Абуфера. Моделирование показало, что использование предложенного принципа распределения памяти позволяет уменьшить в 1,3-3,1 раза объемы памяти, необходимые для сглаживания трехмерных изображений методом А-буфера, по сравнению с фиксированным распределением памяти. Результаты моделирования показали, что предложенное решение, основанное на комбинировании избыточных фрагментов, обеспечивает меньшее значение нормированной среднеквадратической погрешности по сравнению с подходом, в котором избыточные фрагменты отбрасываются. При использовании нового метода к обработке фрагментов полигонов, сглаживание даже сложных сцен по методу А-буфера можно выполнять с использованием только трех фрагментов на один пиксель изображения, что позволяет уменьшить объемы памяти, необходимые для хранения фрагментов полигонов.

Ключевые слова: алиазинг, краевой антиалиазинг, растеризация, метод А-буфера, статически-динамическая организация памяти, интенсивность цвета.

Abstract. According to the A-buffer method, a dynamic list of polygon fragments that cover a pixel is used for antialiasing of three-dimensional images. The A-buffer method uses less memory than the additional sampling method, but the need for dynamic memory allocation complicates its hardware implementation in computer graphics systems. Using a fixed number of fragments per pixel of the image simplifies the hardware implementation of the A-buffer method, but memory is used inefficiently because the number of fragments to calculate the pixel color intensity can differ significantly for different pixels. It was proposed to use a combined static-dynamic principle of memory organization, which is to introduce a common fragment buffer. New modifications of the A-buffer method have been developed, which use:

- a combined static-dynamic approach to memory organization, which consists in the introduction of a common buffer for storing redundant fragments. The proposed modification has a simpler hardware implementation compared to dynamic memory allocation and requires less memory to store fragments of polygons than a fixed allocation;

- a new approach to reducing the error of color intensity calculations, which occurs due to the rejection of fragments of polygons that did not have enough space in the fragment buffer. The essence of the approach is that the two most distant fragments from the observer are combined into one.

The block diagram of the rasterization subsystem of three-dimensional graphic objects is developed, in which the modified A-buffer method is used. A computer program for modeling and testing smoothing methods based on the A-buffer method has been developed. The simulation showed that the use of the proposed principle of memory allocation allows to reduce by 1.3-3.1 times the amount of memory required for smoothing three-dimensional images using the A-buffer method, compared with fixed memory allocation. The simulation results showed that the proposed solution, based on the combination of redundant fragments, provides a smaller value of the normalized standard error compared to the approach in which excess fragments are discarded. When using the new method to process polygon fragments, smoothing even complex scenes with the A-buffer method can be performed using only three fragments per pixel of the image, which reduces the amount of memory required to store fragments of polygons.

Key words: aliasing effect, edge antialiasing, rasterization, A-buffer method, static-dynamic memory organization, color intensity.

DOI: <https://doi.org/10.31649/1999-9941-2020-49-3-54-65>.

Вступ

Підвищення інформативності комп'ютерної графіки досягають за рахунок формування зображень, які точно відтворюють конструктивні та візуальні особливості об'єкту [1-3]. При формуванні таких зображень необхідно відображати графічні сцени з великою деталізацією, тому на даному етапі розвитку комп'ютерної графіки особлива увага приділяється не лише швидкодії формування графічних зображень, але і їх якості.

Ефект аліаїзingu [3-7] суттєво впливає на якість і реалістичність сформованого зображення, тому для забезпечення реалістичності синтезованих зображень у системах комп'ютерної графіки використовують спеціальні методи та засоби усунення ступінчастого ефекту.

При згладжуванні тривимірних зображень, окрім площі частини піксела, яка покривається графічним об'єктом, на інтенсивність кольору піксела впливає розташування полігонів по відношенню до спостерігача [8-11]. Тому для антиаліаїзingu тривимірних трикутників необхідно видалення невидимих поверхонь на рівні піксела. На даному етапі розвитку комп'ютерної графіки найбільш перспективним методом антиаліаїзingu тривимірних зображень вважається метод А-буфера [7, 11-13]. Метод А-буфера використовує менший обсяг пам'яті порівняно із методами додаткової вибірки, однак необхідність динамічного розподілу пам'яті ускладнює його апаратну реалізацію.

Основні роботи по вдосконаленню методу А-буфера направлені на розробку нових способів організації зберігання фрагментів полігонів, які б дозволили спростити апаратну реалізацію та зменшити обсяги додаткової пам'яті.

Актуальність

При використанні фіксованої кількості фрагментів на один піксел зображення спрощується апаратна реалізація методу А-буфера, однак пам'ять використовується неефективно, оскільки кількість фрагментів для розрахунку інтенсивності кольору піксела може суттєво відрізнятись для різних пікселів. Тому доцільно використати комбінований статично-динамічний принцип організації пам'яті, який полягає у введенні загального буфера фрагментів.

На інтенсивність кольору піксела впливає розташування полігонів по відношенню до спостерігача [8, 10, 13, 14]. Тому для антиаліаїзingu тривимірних трикутників необхідно видалення невидимих поверхонь на рівні піксела.

Е. Катмул [15] запропонував точний метод усунення ступінчастого ефекту та видалення невидимих поверхонь, оснований на методі скануючого рядка [16]. Для усунення аліаїзingu використовується квадратна модель піксела [4]. Всі полігони, які покривають піксел, відсікаються до меж піксела. Визначається видимість кожного зі сформованих фрагментів за допомогою сортування по глибині. Значення інтенсивності кольору кожного видимого фрагмента множиться на його площу та додається до результуючої інтенсивності кольору піксела. Даний метод потребує сортування полігонів перед кожним рендерингом [1] сцени та використовує відносно складну процедуру відсікання, що обумовлює його велику обчислювальну складність.

У методі А-буфера [17] замість точного визначення площі покриття використовуються бітові маски. Для визначення площі фрагментів полігонів піксел задається бітовою маскою розмірами 4 на 8. Площі субпіксельних фрагментів обчислюються за допомогою булевої операції нерівнозначності. Формування фінальної маски фрагмента полігона з бітових масок його ребер зображено на рис. 1.

За методом А-буфера в пам'яті зберігаються пов'язані списки фрагментів полігонів всередині кожного піксела. Фрагменти сортуються за значенням z-координати для підтримки правильного відображення прозорих поверхонь. При перекритті по z-координаті різних фрагментів та належності їх до одного об'єкту, вони об'єднуються в один елемент.

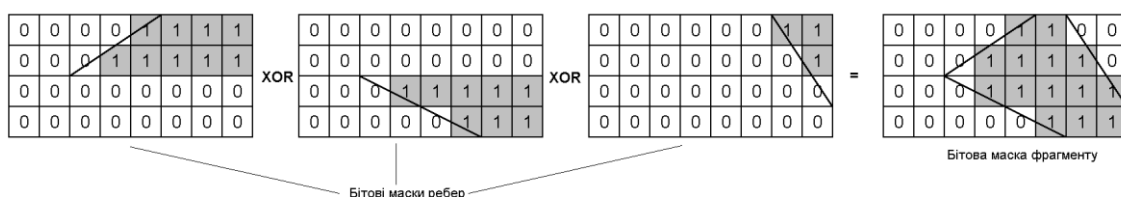


Рисунок 1 – Утворення маски фрагмента полігона з бітових масок його ребер

Для кожного фрагмента окрім мінімального значення z-координати зберігається також максимальне значення глибини. Для фрагментів, що перетинаються (рис 1.12), розрахунок видимої частини виконується за формулою [17]:

$$Vis_{front} = \frac{Z_{max_next} - Z_{min_front}}{(Z_{max} - Z_{min})_{front} + (Z_{max} - Z_{min})_{next}}, \quad (1)$$

де Vis_{front} – коефіцієнт, що визначає, яка частина найближчого до спостерігача фрагмента не закрита від спостерігача; Z_{max_front} , Z_{min_front} – відповідно максимальне та мінімальне значення z-координати ближнього фрагмента; Z_{max_next} , Z_{min_next} – відповідно максимальне та мінімальне значення z-координати наступного фрагмента.

Кінцева інтенсивність кольору області перетину знаходиться за виразами [17]:

$$\alpha = Vis_{front} \cdot Opacity_{front} + (1 - Vis_{front}) \cdot Opacity_{next},$$

$$I = \alpha \cdot I_{front} + (1 - \alpha) \cdot I_{next},$$

де $Opacity_{front}$ – коефіцієнт прозорості фронтального фрагмента; $Opacity_{next}$ – коефіцієнт прозорості наступного фрагмента; I_{front} – інтенсивність кольору фронтального фрагмента; I_{next} – інтенсивність кольору наступного фрагмента.

Формула (1) справедлива для випадку, коли фрагменти, які перекриваються по z-координаті, нахилені протилежно. Це складає лише окремий випадок, тому метод А-буфера може генерувати зображення з артефактами у місцях перетину поверхонь [16, 18].

Для отримання результуючого кольору пікселя розглядаються всі фрагменти, починаючи з найближчого до спостерігача. Використовуючи субпіксельні бітові маски визначається внесок кожного фрагмента у кінцевій інтенсивності кольору пікселя.

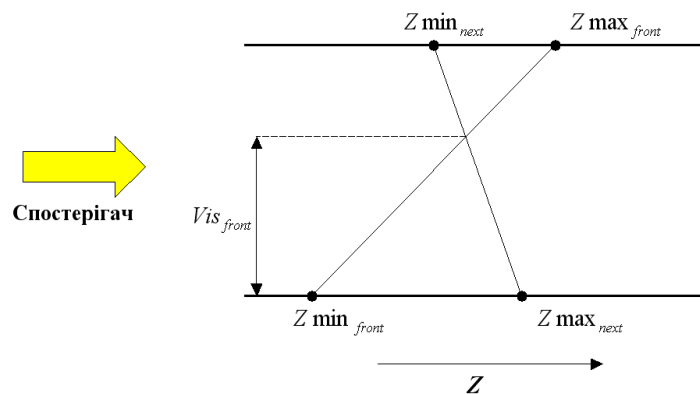


Рисунок 2 – Визначення видимої частини для фрагментів, що перетинаються

У методі А-буфера важко спрогнозувати необхідні об'єми пам'яті, адже не можливо заздалегідь визначити, до яких розмірів може зрости список фрагментів полігонів [13, 18]. Крім того, обчислювальні витрати на формування одного пікселя зображення залежать від складності сцени і не можуть бути передбачені. Вказані недоліки ускладнюють апаратну реалізацію методу А-буфера.

А. Шилінг [18] запропонував для підвищення якості згладжування окрім бітової маски зберігати точне значення площі пікселя, що покривається полігоном. Однак кількість випадків, для яких можна застосувати точне значення площі, є обмеженою.

У роботі [11] запропоновано використовувати лише фіксований об'єм пам'яті для зберігання фрагментів полігонів, що покривають піксел. Фрагменти, для збереження яких не вистачає місця в пам'яті, відкидаються [11]. Даний підхід дозволяє спростити апаратну реалізацію методу А-буфера, однак призводить до появи артефактів при візуалізації сцен зі складною геометрією [13]. Інший підхід полягає у тому, що для зберігання надлишкових фрагментів додатково використовується системна пам'ять [19].

Основним недоліком даного підходу є збільшене навантаження на системну шину, обумовлене необхідністю передачі надлишкових фрагментів.

С. Уінер [13] запропонував модифікацію методу А-буфера, яка полягає у тому, що для випадку, коли в пам'яті не вистачає місця для зберігання фрагментів полігонів, виконуються додаткові проходи для комбінування надлишкових фрагментів. Основним недоліком такого підходу є зниження швидкості формування зображення, обумовлене необхідністю виконувати додаткові проходи для розрахунку геометрії сцени.

Аналіз показав, що основні роботи щодо вдосконалення методу А-буфера направлені на розробку нових підходів до зменшення об'ємів пам'яті, необхідних для зберігання фрагментів полігонів.

Мета

Метою даної розробки є модифікація методу А-буфера за рахунок розробки нових підходів до зменшення об'ємів пам'яті, необхідних для зберігання фрагментів полігонів.

Розв'язання задач

У класичному методі А-буфера використовується наближений підхід для видалення невидимих поверхонь всередині пікселя, який призводить до появи артефактів для поверхонь, які перетинаються або дотикаються [11,15]. Пропонується новий підхід до видалення невидимих поверхонь, який правильно розраховує видимість для всіх випадків взаємного розташування полігонів всередині пікселя. При цьому використовуються бітові маски видимості. Кожен біт маски видимості визначає, який з двох полігонів в заданій точці є ближчим до спостерігача. Розглянемо формування маски видимості.

Для кожного фрагмента полігона пропонується зберігати значення координати z у центрі пікселя та значення приростів координати z вздовж осі x і y . У більшості графічних систем зазначені параметри використовуються при растеризації полігонів, отже їх не потрібно буде обчислювати додатково. Значення координати z у точці, яка розташована в середині пікселя, знаходиться за формулами:

$$z_A(x_u + a, y_u + b) = a \cdot \Delta z_{x,A} + b \cdot \Delta z_{y,A} + z_{u,A}, \quad z_B(x_u + a, y_u + b) = a \cdot \Delta z_{x,B} + b \cdot \Delta z_{y,B} + z_{u,B}.$$

Значення біта маски видимості, який відповідає дискретній точці з координатами $(x_u + a, y_u + b)$, можна розрахувати за виразом:

$$M_\epsilon(x_u + a, y_u + b) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } z_A(a, b) - z_B(a, b) \geq 0; \\ 0, & \text{якщо } z_A(a, b) - z_B(a, b) < 0. \end{cases} \quad (2)$$

Біт маски видимості, що розрахована згідно з останнім виразом, дорівнює одиниці для точок, у яких фрагмент A є ближчим до спостерігача порівняно з фрагментом B . Запишемо вираз для розрахунок різниці значень координат z двох фрагментів полігонів у заданій точці:

$$\begin{aligned} z_A(a, b) - z_B(a, b) &= a \cdot \Delta z_{x,A} + b \cdot \Delta z_{y,A} + z_{u,A} - a \cdot \Delta z_{x,B} - b \cdot \Delta z_{y,B} - z_{u,B} = \\ &= a(\Delta z_{x,A} - \Delta z_{x,B}) + b(\Delta z_{y,A} - \Delta z_{y,B}) + (z_{u,A} - z_{u,B}). \end{aligned}$$

Як видно з останнього виразу, вибір значень a та b кратними степені двійки дозволяє значно спростити апаратну реалізацію обчислення масок видимості, оскільки при цьому операція множення замінюється операцією додавання та зсуву.

Для визначення видимості фрагмента полігона його бітова маска покриття модифікується у відповідно до з маски видимості. Якщо задана точка покрита полігоном B (відповідний біт маски покриття дорівнює одиниці) і в даній точці полігон B ближчий до спостерігача (відповідний біт маски видимості дорівнює нулю), і дана точка покрита полігоном A , то відповідний біт маски покриття фрагмента A встановлюється рівним нулю. Зазначена перевірка може бути записана з використанням булевих операцій:

$$M_A = M_A \cdot \overline{M_A \cdot M_B \cdot M_{вид}}.$$

Для фрагмента B булевий вираз модифікації маски покриття має вигляд:

$$M_B = M_B \cdot \overline{M_A \cdot M_B \cdot M_{вид}} .$$

Розглянемо процедуру обробки фрагментів при використанні масок видимості.

Під час растеризації формується фрагмент полігона, який містить такі параметри: бітову маску покриття [10]; інтенсивність кольору полігона; значення координати z полігона у точці, яка розташована в центрі пікселя; значення приростів координати z вздовж осі x та y . Разом зазначені параметри задають просторове положення фрагмента полігона, який відсічено до меж пікселя, та його внесок у інтенсивність кольору пікселя.

Якщо буфер фрагментів порожній, то новоутворений фрагмент записується до буфера фрагментів.

У випадку, коли в буфері фрагментів присутні раніше сформовані фрагменти, відбувається порівняння нового фрагмента з кожним із існуючих. Для цього виконується формування маски видимості за виразами (2). Бітова маска покриття кожного з фрагментів, що перевіряються, модифікується відповідно з процедурою, що була описана вище.

Якщо після перетворень бітова маска покриття нового фрагмента стала рівною нулю, то новий фрагмент повністю закритий від спостерігача існуючим фрагментом і виключається з подальших обчислень. У випадку, коли після перетворень бітова маска покриття існуючого фрагмента стала рівною нулю, існуючий фрагмент видаляється з буфера фрагментів.

Після того, як новий фрагмент було порівняно з усіма існуючим фрагментами, він записується в буфер фрагментів. Місце для запису фрагмента обирається таким чином, щоб усі фрагменти були відсортовані за значенням z_u у порядку зростання.

Після того, як у буфер було додано всі фрагменти, виконується розрахунок інтенсивності кольору пікселя за формулою:

$$I_p = \frac{\sum_{i=1}^n I_i \cdot K_i}{K_{заг}} ,$$

де n – кількість згенерованих фрагментів, I_i – інтенсивність кольору i -го фрагмента, K_i – кількість одиничних бітів у масці покриття i -го фрагмента, $K_{заг}$ – загальна кількість біт у масці покриття.

Як видно з опису процедури обробки фрагментів, використання масок видимості дозволяє на ранній стадії визначати фрагменти, які можуть бути виключені з подальших обчислень, що зменшує об'єми пам'яті необхідної для зберігання фрагментів.

У роботі [11] було запропоновано використати фіксовану кількість фрагментів на один піксел. Ті фрагменти, для яких не вистачило місця в буфері фрагментів, відкидаються. При цьому виконується сортування та відкидаються найвіддаленіші від спостерігача фрагменти з меншою площею покриття. Для зменшення похибки обчислень перед видаленням фрагмента проводиться розрахунок кольору пікселя з урахуванням усіх наявних фрагментів. Такий підхід має просту апаратну реалізацію, однак приводить до появи артефактів у випадках, коли для пікселя згенеровано фрагментів більше ніж виділено пам'яті для їх зберігання.

Пропонується новий підхід до зменшення похибки обчислень інтенсивності кольору, яка має місце внаслідок відкидання фрагментів полігонів, яким не вистачило місця у буфері фрагментів. Суть підходу полягає у тому, що два найбільш віддалені від спостерігача фрагменти об'єднуються у один. Розглянемо процедуру формування нового фрагмента.

Нехай задано два фрагменти A і B , які найбільш віддалені від спостерігача. Фрагмент A розташовано ближче до спостерігача порівняно з фрагментом B . Маска покриття нового фрагмента утворюється додаванням масок покриття вихідних фрагментів.

Значення координати z нового фрагмента у центрі пікселя обирається таким чином, щоб воно було ближчим до значення координати z_u фрагмента, який має більшу площу покриття пікселя.

Значення z_u визначається за формулою:

$$z_y = z_{y,A} + (z_{y,B} - z_{y,A}) \frac{K_B}{K_{заг}}$$

де $z_{y,A}$, $z_{y,B}$ – відповідно значення координати z фрагментів A і B у центрі піксела, K_B – кількість одиничних бітів у масці покриття піксела фрагмента B , $K_{заг}$ – загальна кількість бітів у масці покриття.

Фрагменти полігона, які мають менше абсолютне значення приростів координати z , як правило, мають більшу площу покриття [13], а отже є більш інформативними, тому для нового фрагмента обираються прирости Δz_x і Δz_y вихідних фрагментів з меншим абсолютним значенням. Значення Δz_x і Δz_y нового фрагмента розраховуються за формулою:

$$\Delta z_x = \begin{cases} \Delta z_{x,B}, & \text{якщо } |\Delta z_{x,A}| \geq |\Delta z_{x,B}|; \\ \Delta z_{x,A}, & \text{якщо } |\Delta z_{x,A}| < |\Delta z_{x,B}|. \end{cases}$$

Значення інтенсивності кольору нового фрагмента розраховується за значеннями інтенсивностей кольору вихідних фрагментів пропорційно до площі покриття піксела кожним фрагментом:

$$I = \frac{(I_A \cdot K_A + I_B \cdot K_B)}{K_{заг}}$$

При формуванні зображення за методом А-буфера кількість фрагментів, які сформовані для різних пікселів, може суттєво відрізнятись. Тому не можливо заздалегідь визначити об'єми пам'яті, які необхідно мати для зберігання фрагментів полігонів, що ускладнює апаратну реалізацію методу. При виділенні фіксованої кількості пам'яті на кожен піксел [11] апаратна реалізація суттєво спрощується, однак пам'ять використовується неефективно, оскільки для частини пікселів фрагментів генерується менше, ніж виділено пам'яті, а для іншої частини пікселів – більше.

Пропонується використати комбінований статично-динамічний принцип організації пам'яті, який має просту апаратну реалізацію та дозволяє більш ефективно використати пам'ять, що виділяється для зберігання фрагментів полігонів. Він полягає у тому, що крім основного буфера фрагментів, виділяється загальний буфер фрагментів (рис. 3).

В основному буфері фрагментів на кожен піксел виділяється блок пам'яті фіксованого розміру для зберігання $N_{осн}$ фрагментів полігонів та $N_{доод}$ адрес, які визначають номер фрагмента у загальному буфері фрагментів. Для загального буфера фрагментів виділяється фіксований блок пам'яті для зберігання $N_{заг}$ фрагментів.

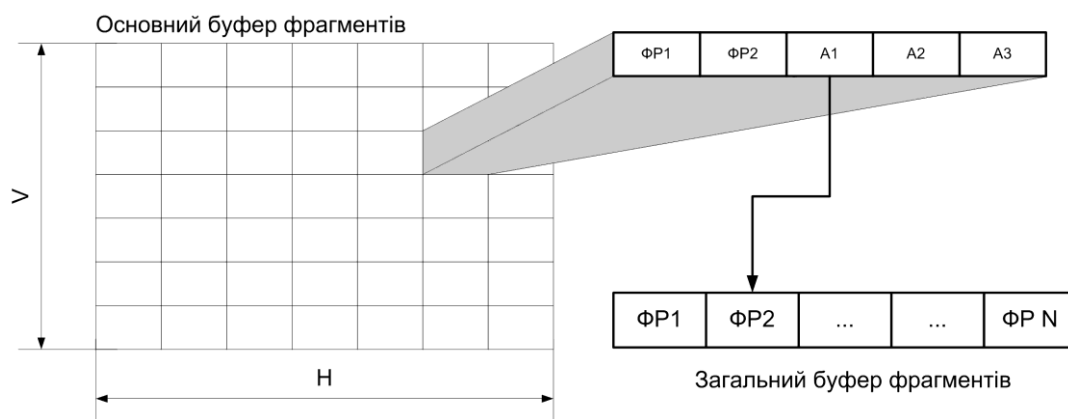


Рисунок 3 – Розподіл пам'яті при використанні загального буфера фрагментів

Якщо кількість фрагментів, які згенеровано для даного пікселя перевищує $N_{осн}$, то надлишкові фрагменти зберігаються в загальному буфері фрагментів. У випадку, коли кількість фрагментів перевищила $N_{осн} + N_{доод}$ або загальний буфер фрагментів повністю заповнений, то виконується комбінування надлишкових фрагментів згідно з процедурою, що була описана раніше.

Запропонований підхід порівняно з фіксованим розподілом пам'яті дозволяє більш ефективно використати оперативну пам'ять за рахунок того, що місце у загальному буфері фрагментів виділяється лише для «складних» пікселів, які потребують великої кількості фрагментів для визначення інтенсивності кольору.

Оцінімо різницю між об'ємами пам'яті, які потрібні для формування зображення з використанням загального буфера фрагментів, і при фіксованому розподілу пам'яті. Кількість фрагментів на один буфер для фіксованого розподілу пам'яті приймемо рівною:

$$N_{фікс} = N_{осн} + N_{доод}$$

Об'єм пам'яті, який виділяється для формування зображення з використанням загального буфера можна знайти за формулою:

$$M_{заг.б.} = H \cdot V (N_{осн} M_{фр} + N_{доод} M_{адр}) + N_{заг} M_{фр},$$

де $M_{фр}$ – об'єм пам'яті, необхідний для зберігання одного фрагмента; $M_{адр}$ – об'єм пам'яті, необхідний для зберігання адреси фрагмента у додатковому буфері; H, V – відповідно розмір зображення по горизонталі та вертикалі.

Об'єм пам'яті для формування зображення з використанням фіксованого розподілу пам'яті знаходимо за формулою:

$$M_{фікс} = H \cdot V \cdot N_{фікс} \cdot M_{фр}$$

З урахуванням останніх виразів отримуємо формулу для визначення різниці між об'ємами пам'яті:

$$\begin{aligned} M_{фікс} - M_{заг.б.} &= H \cdot V \cdot N_{фікс} \cdot M_{фр} - H \cdot V (N_{осн} M_{фр} + N_{доод} M_{адр}) + N_{заг} M_{фр} = \\ &= H \cdot V \cdot N_{доод} (M_{фр} - M_{адр}) - N_{заг} M_{фр} \end{aligned}$$

З останнього виразу випливає, що економія пам'яті залежить від розміру загального буфера фрагментів; різниці між об'ємами пам'яті, які необхідні для зберігання фрагмента полігона та адреса фрагмента у загальному буфері, та кількості додаткових фрагментів $N_{доод}$.

Для тестування запропонованих модифікацій методу А-буфера розроблені програмні засоби для моделювання та тестування методів згладжування, які основані на методі А-буфера.

Оцінювання якості згладжування проводилось шляхом порівняння із зображенням, яке було отримано методом А-буфера з необмеженим буфером фрагментів. Візуальна відмінність між двома зображеннями оцінювалася за нормованою середньоквадратичною похибкою (NMSE) [1].

Найчастіше в якості базової фігури використовується фігура «x-wing» [11, 13, 18]. Останнім часом для тестування також додатково використовують моделі з високою щільністю триангуляційної сітки (35-40 тис. трикутників) і моделі підвищеної деталізації (понад 100 тис. трикутників).

На рис. 4 зображено типові тестові фігури, які було використано для тестування розроблених методів антиаліазингу.

Для моделювання та тестування запропонованих модифікацій методу А-буфера розроблено програмний, інтерфейс якого наведено на рис. Оцінювання якості згладжування проводилось шляхом порівняння із зображенням, яке було отримано методом А-буфера з необмеженим буфером фрагментів. Візуальна відмінність між двома зображеннями оцінювалася за нормованою середньоквадратичною похибкою (NMSE).

Для моделювання та тестування запропонованих модифікацій методу А-буфера розроблено програмний, інтерфейс якого наведено на рис. Оцінювання якості згладжування проводилось шляхом порівняння із зображенням, яке було отримано методом А-буфера з необмеженим буфером фрагментів.

Візуальна відмінність між двома зображеннями оцінювалася за нормованою середньоквадратичною похибкою (NMSE) [1].

Комп'ютерну програму для моделювання та тестування методів згладжування, основаних на методі Абуфера, виконує такі функції: формування тривимірних графічних об'єктів у статичному та динамічному режимах із згладжуванням з використанням обраної модифікації методу Абуфера або без згладжування з використанням методу Z буфера; визначення за NMSE візуальних відмінностей між двома зображеннями, сформованими за різними методами; визначення об'єму пам'яті основного та загального буфера фрагментів; визначення статистики складності сцени по глибині та побудова графіка, який відображає кількість фрагментів, яка була використана для формування кожного пікселя; генерація синтетичних сцен різного ступеня складності для оцінювання якості згладжування складних та простих сцен; визначення загальної кількості трикутників у триангуляційній сітці, якою задано графічний об'єкт.

При тестуванні виконувалось формування зображення трьох тестових об'єктів (рис. 4). Кількість фрагментів, яка виділяється на один піксель зображення, змінювалась від одного до восьми. В якості еталонного зображення було використано зображення, що отримано за методом А-буфера з необмеженим буфером фрагментів, який забезпечує виконання антиаліазингу з максимальною точністю. Результати моделювання показали, що підхід, оснований на комбінуванні надлишкових фрагментів, забезпечує менше значення NMSE порівняно з підходом, у якому надлишкові фрагменти відкидаються. При використанні нового методу до обробки фрагментів полігонів, згладжування навіть складних сцен за методом А-буфера можливо виконувати з використанням лише трьох фрагментів на один піксель зображення, що дозволяє зменшити об'єми пам'яті, необхідні для зберігання фрагментів полігонів.

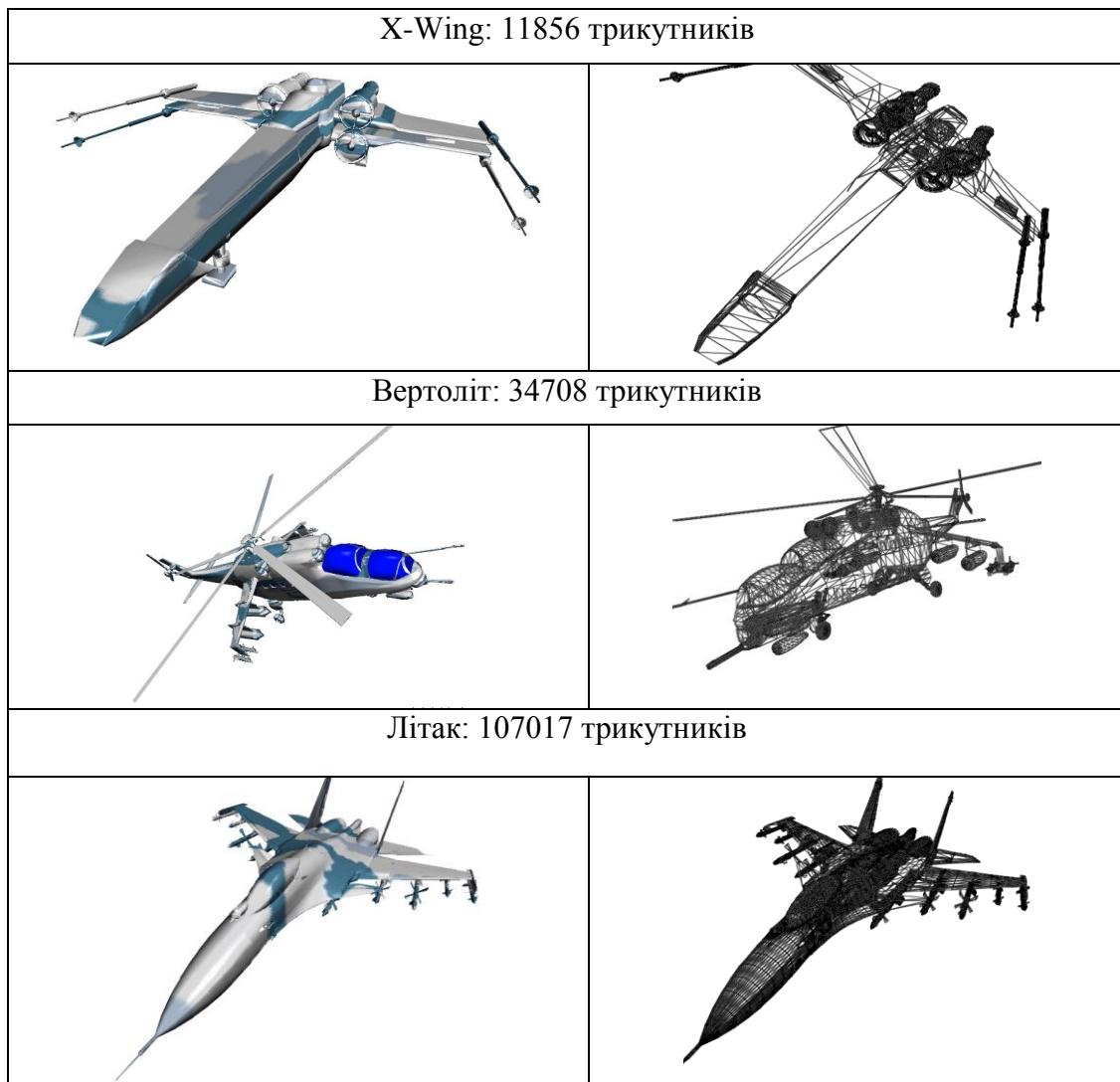


Рисунок 4 – Типові тестові фігури

Інтерфейс користувача програмного модуля тестування методів згладжування наведено на рис. 5.

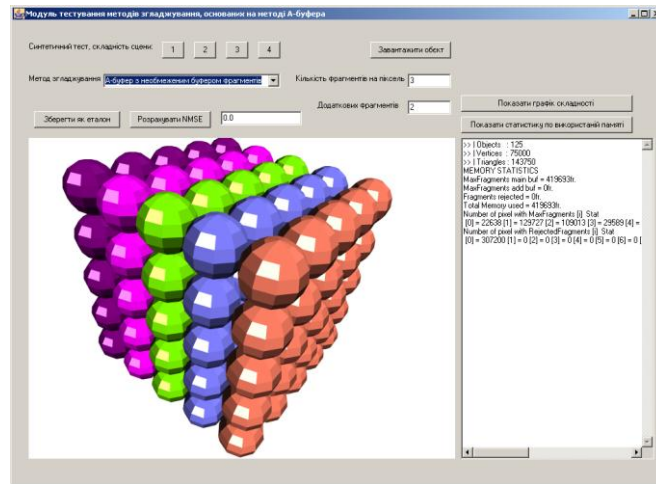


Рисунок 5 – Інтерфейс користувача програмного модуля тестування методів згладжування

Проведено комп'ютерне моделювання для оцінки об'ємів пам'яті, необхідних для згладжування тривимірних зображень за методом А-буфера з використанням загального буфера фрагментів. У ході моделювання виконувалось формування тестової сцени для різних значень параметрів $N_{осн}$, $N_{доод}$ і $N_{заг}$, визначалось максимальну кількість фрагментів, яку було записано в загальний буфер фрагментів. При тестуванні використовувалась сцена, яка характеризується підвищеною складністю, для найбільш поширеного випадку [18] завдання параметрів фрагмента полігона: 16 розрядів – для бітової маски покриття, по 8 розрядів – для інтенсивностей кольору, по 24 розряди – для значень z_u , Δz_x та Δz_y .

Як показало моделювання, використання запропонованого принципу розподілу пам'яті дозволяє зменшити у 1,3÷3,1 рази об'єми пам'яті, необхідні для згладжування тривимірних зображень за методом А-буфера, порівняно із фіксованим розподілом пам'яті. При цьому запропонований принцип характеризується простою апаратної реалізації.

На рис. 6 наведено підсистему растеризації тривимірних графічних об'єктів у якій використано модифікований метод А-буфера, розроблений у розділі 3. Підсистема включає блоки: сортування вершин – БСВ; визначення приростів координат – ВПК; визначення координат - ВК; визначення маски покриття – ВМП; зафарбовування та текстурування – ЗТ; формування нового фрагмента – ФНФ; розрахунку масок глибини – РМГ; розрахунку інтенсивності кольору – РІК; визначення адреси – ВА; блок керування – БК; кешування фрагментів – КФ; основного буфера фрагментів – ОБФ; загального буфера фрагментів – ЗБФ; об'єднання фрагментів – ОФ.

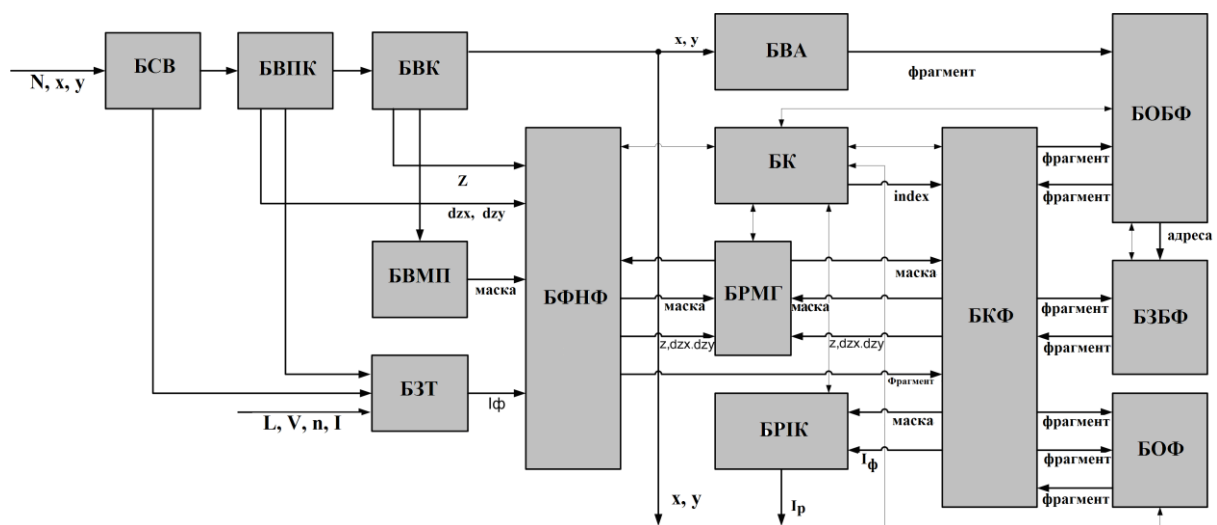


Рисунок 6 – Структурна схема підсистеми растеризації тривимірних графічних об'єктів, у якій використано модифікований метод А-буфера

У БСВ проводиться аналіз вершин вихідного трикутника з метою визначення вершин провідних і непровідних ребер. У БВК у кожному такті визначається адреса потокової точки полігону. У БВМП визначається маска покриття пікселя трикутником. У БЗТ розраховується інтенсивність кольору потокової точки трикутника з використанням обраного метода зафарбовування та текстурування. У БФНФ формується новий фрагмент полігону. Блок БВА визначає адресу у блоці БОБФ, по якій зберігається список фрагментів полігону для потокового пікселя. пристої інтенсивностей кольору, по яким у БВІК визначаються інтенсивності кольору внутрішніх точок трикутника та його ребер.

Фрагменти, сгенеровані для потокового пікселя (x, y) з основного та загального буфера фрагментів завантажуються в БКФ. У БФМГ з використанням даних про глибину та масок покриття визначається розташування фрагмента у списку вже згенерованих фрагментів. $N_{осн}$ фрагментів зберігаються у БОБФ, якщо фрагментів більше ніж $N_{осн}$, то в БОБФ зберігається $N_{доод}$ адрес, які визначають розташування додаткових фрагментів у загальному буфері. У випадку, якщо сгенеровано більше ніж $N_{осн} + N_{доод}$ фрагментів, у БОФ два найбільш віддалені від спостерігача фрагменти об'єднуються в один.

Висновки

При використанні фіксованої кількості фрагментів на один піксел зображення спрощується апаратна реалізація методу А-буфера, однак пам'ять використовується неефективно, оскільки кількість фрагментів для розрахунку інтенсивності кольору пікселя може суттєво відрізнятись для різних пікселів.

Запропоновано використати комбінований статично-динамічний принцип організації пам'яті, який полягає у введенні загального буфера фрагментів. В основному буфері фрагментів на кожен піксел виділяється блок пам'яті фіксованого розміру для зберігання $N_{осн}$ фрагментів полігонів і $N_{доод}$ адрес, які визначають номер фрагмента у загальному буфері фрагментів. Для загального буфера фрагментів виділяється фіксований блок пам'яті для зберігання $N_{заг}$ фрагментів. Якщо кількість фрагментів, які згенеровано для даного пікселя, перевищує $N_{осн}$, то надлишкові фрагменти зберігаються в загальному буфері фрагментів.

Запропонована модифікація методу антиаліазингу має більш просту апаратну реалізацію порівняно з динамічним розподілом пам'яті та потребує у 1,3÷2,6 разів менших об'ємів пам'яті для зберігання фрагментів полігонів порівняно з фіксованим розподілом.

Для зменшення похибки обчислень інтенсивності кольору, яка має місце внаслідок відкидання фрагментів полігонів, яким не вистачило місця у буфері фрагментів, запропоновано два найбільш віддалені від спостерігача фрагменти об'єднувати у один. При використанні такого підходу підвищується якість згладжування у випадку зберігання обмеженої кількості фрагментів полігонів на один піксел зображення.

Список літератури

- [1] О. Н. Романюк, та А. В. Чорний, *Високопродуктивні методи та засоби зафарбовування тривимірних графічних об'єктів*, Вінниця, Україна: УНІВЕСУМ-Вінниця, 2006.
- [2] О. Н. Романюк, «Метод підвищення реалістичності відтворення тривимірних графічних об'єктів», *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*, №1 (8). с. 269–272. 2016.
- [3] О. Н. Романюк, *Комп'ютерна графіка. Навчальний посібник*. Вінниця: УНІВЕСУМ-Вінниця, 2001.
- [4] О. Н. Романюк, та М. С. Курінний, «Математичні моделі пікселів для задач антиаліазингу», *Вісник Житомирського інженерно-технологічного інституту*, № 3, с. 35–47. 2002.
- [5] S. O. Romanyuk, O. N. Romanyuk, S. V. Pavlov, and O. V. Melnyk, «Method of anti-aliasing with the use of the new pixel model», *Proc. SPIE 9816, Optical Fibers and Their Applications*, 2015.
- [6] О. Н. Романюк, та М. С. Курінний, «Антиаліазинг зображення кривих другого порядку, заданих загальним рівнянням», *Ресстрація, зберігання і обробка даних*, т. 8, № 3, с. 11–19, 2007.
- [7] С. И. Вяткин, Б. С. Долговесов, и Б. С. Мазурок, «Эффективный метод растривания изображений для компьютерных систем визуализации реального времени», *Автометрия*, № 5, с. 34–52. 1993.
- [8] А. Н. Романюк, и А. В. Черный, «Алгоритмы удаления невидимых поверхностей», *Компьютеры+Программы*, № 6. с. 26 – 29. 2000.
- [9] С. И. Вяткин, Б. С. Долговесов, и Б. С. Мазурок, «Эффективный метод растривания изображений для компьютерных систем визуализации реального времени», *Автометрия*, № 5, с. 34–52. 1993.
- [10] L. C. Carpenter, «The A-buffer, an Anti-aliased Hidden Surface Method», *Computer Graphics*, vol. 18, no.3, pp. 103–108. 1984.

- [11] P. Norman, and Chun-Fa Chang, «An Economical Hardware Technique for High-Quality Antialiasing and Transparency», in *Proceedings of the 1999 Eurographics SIGGRAPH Workshop on Graphics Hardware*, 1999, pp. 85–93.
- [12] М. В. Михайлюк, и В. Н. Решетников, «Визуализация трехмерных сцен в реальном режиме времени», *Программные продукты и системы*, № 1, с. 12–16. 1999.
- [13] S. Winner, M. Kelley, and B. Pease, «Hardware accelerated rendering of antialiasing using a modified A-buffer algorithm», in *Proceedings of the 24th annual conference on Computer graphics and interactive techniques (SIGGRAPH '97)*, 1997, pp. 307–316.
- [14] A Schilling, and W Straßer, «Algorithm and Hardware Architecture for an Improved A-Buffer», in *Proceedings of the 20th annual conference on Computer graphics and interactive techniques (SIGGRAPH '93)*, 1993, pp. 85–91.
- [15] E. Catmull, «A hidden-surface algorithm with anti-aliasing», in *Proceedings of SIGGRAPH 78*, 1978, pp. 6–11.
- [16] Д. Херн, и М. П. Бейкер, *Компьютерная графика и стандарт OpenGL*, Москва, Россия: Издательский дом «Вильямс», 2007.
- [17] L. C. Carpent, «The A-buffer, an Anti-aliased Hidden Surface Method», *Computer Graphics*, vol. 18, no. 3, pp. 103–108. 1984.
- [18] C. M. Wittenbrink, «R-buffer: A pointerless A-buffer hardware architecture», in *Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, 2001, pp. 73 – 80.
- [19] G. Westheimer, «The spatial sense of the eye», *Invest. Ophthalm. Vis. Sci.*, Vol. 18, pp. 893–912. 1979. Стаття надійшла: 02.11.2020.

References

- [1] О. Н. Романыук, та А. В. Чорнуу, *Vysokoproduktyvni metody ta zasoby zafarbovuvannya tryvymirnykh hrafichnykh obyektiv*, Vinnytsya, Ukrayina: UNIVESUM-Vinnytsya, 2006.
- [2] О. Н. Романыук, «Metod pidvyshchennya realistychnosti vidtvorennya tryvymirnykh hrafichnykh obyektiv», *Informatsiyni tekhnolohiyi ta komp'yuterna inzheneriya*, № 1 (8). s. 269–272. 2016.
- [3] О. Н. Романыук, *Kompyuterna hrafika. Navchalnyy posibnyk*. Vinnytsya: UNIVESUM-Vinnytsya, 2001.
- [4] О. Н. Романыук, та М. С. Куринный, «Математични модели пікселів для задач антиаліазингу», *Visnyk Zhytomyrskoho inzhenerno-tekhnolohichnoho instytutu*, № 3, s. 35–47. 2002.
- [5] S. O. Romanyuk, O. N. Romanyuk, S. V. Pavlov, and O. V. Melnyk, «Method of anti-aliasing with the use of the new pixel model», *Proc. SPIE 9816, Optical Fibers and Their Applications*, 2015.
- [6] О. Н. Романыук, та М. С. Куринный, «Antyaliayzynch zobrazhennya kryvykh druhoho porjadku, zadanykh zahal'nym rivnyanniam», *Reyestratsiya, zberihannya i obrobka danykh*, t. 8, № 3, s. 11–19. 2007.
- [7] S. I. Vjatkin, B. S. Dolgovesov, i B. S. Mazurok, «Jeffektivnyj metod rastrirovaniya izobra-zhenij dlja komp'yuternyh sistem vizualizacii real'nogo vremeni», *Avtometrija*, № 5, с. 34–52. 1993
- [8] А. Н. Романыук, у А. В. Черный, «Alhorytmy udalenyia nevydymykh poverkhnostey», *Kompyutery+Prohrammy*, № 6. s. 26–29. 2000.
- [9] S. I. Vjatkin, B. S. Dolgovesov, i B. S. Mazurok, «Jeffektivnyj metod rastrirovaniya izobra-zhenij dlja komp'yuternyh sistem vizualizacii real'nogo vremeni», *Avtometrija*. № 5, s. 34–52. 1993.
- [10] L. C. Carpenter, «The A-buffer, an Anti-aliased Hidden Surface Method», *Computer Graphics*, vol. 18, no.3, pp.103–108. 1984.
- [11] P. Norman, and Chun-Fa Chang, «An Economical Hardware Technique for High-Quality Antialiasing and Transparency», in *Proceedings of the 1999 Eurographics SIGGRAPH Workshop on Graphics Hardware*. 1999, pp.85–93.
- [12] М. В. Мыхайлюк, у В. Н. Решетников, «Vyuzalyzatsyya trekhmernykh stsen v real'nom rezhyme vremeni», *Prohrammnye produkty y systemy*, № 1, s.12-16. 1999.
- [13] S. Winner, M. Kelley, and B. Pease, «Hardware accelerated rendering of antialiasing using a modified A-buffer algorithm», in *Proceedings of the 24th annual conference on Computer graphics and interactive techniques (SIGGRAPH '97)*, 1997. pp. 307–316.
- [14] [A Schilling, and W Straßer, «Algorithm and Hardware Architecture for an Improved A-Buffer», in *Proceedings of the 20th annual conference on Computer graphics and interactive techniques (SIGGRAPH '93)*, 1993, pp. 85 – 91.
- [15] E. Catmull, «A hidden-surface algorithm with anti-aliasing», in *Proceedings of SIGGRAPH 78*, 1978. pp. 6–11.
- [16] D. Khern, y M. P. Beyker, *Kompyuternaya hrafyka y standart OpenGL*, Moskva, Rossyya: Yzdatelsky dom «Vylyams», 2007.
- [17] L. C. Carpent, «The A-buffer, an Anti-aliased Hidden Surface Method», *Computer Graphics*,

vol. 18, no. 3, pp. 103–108, 1984.

[18] C. M. Wittenbrink, R-buffer: A pointerless A-buffer hardware architecture, in *Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, 2001. pp. 73–80.

[19] G. Westheimer, «The spatial sense of the eye», *Invest. Ophthal. Vis. Sci.*, Vol. 18, pp. 893–912. 1979.

Відомості про авторів

Романюк Олександр Никифорович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри програмного забезпечення Вінницького національного технічного університету.

Курінний Михайло Сергійович – кандидат технічних наук, директор ПП «РАДІОНЕТ».

Дудник Олександр Олександрович – кандидат технічних наук, доцент кафедри програмного забезпечення Вінницького національного технічного університету.

Снігур Анатолій Васильович – кандидат технічних наук, доцент кафедри обчислювальної техніки Вінницького національного технічного університету.

Романюк Сергій Олександрович – кандидат технічних наук, підприємець.

О. Н. Романюк, М. С. Куренной, О. О. Дудник, А. В. Снігур,
С. О. Романюк

МОДИФИКАЦІЯ МЕТОДА А-БУФЕРА ДЛЯ СГЛАЖИВАННЯ ТРЕХМЕРНИХ ІЗОБРАЖЕНЬ

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

O. N. Romanyuk, M. S. Kurennoy, O.O. Dudnik, A.V. Snigur, S. O. Romanyuk

MODIFICATION OF A-BUFFER METHOD FOR SMOOTHING THREE-DIMENSIONAL IMAGES

Vinnitsia National Technical University, Vinnitsia