

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД  
«ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»

МОХАММАД ЮНІС ЯХЬЯ



УДК 004.713

**РОЗРОБКА ПРОГРАМНО-АПАРАТНИХ РІШЕНЬ ПІДВИЩЕННЯ  
ПРОДУКТИВНОСТІ КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ ФОРМУВАННЯ  
ТРЬОХМІРНИХ ЗОБРАЖЕНЬ**

05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Красноармійськ – 2016

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Державному вищому навчальному закладі «Донецький національний технічний університет» Міністерства освіти і науки України.

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, доцент  
**Федоров Євген Євгенович,**  
ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»,  
завідувач кафедри комп'ютерних наук

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Алішов Надір Ісмаїл-огли,**  
Інститут кібернетики ім. В.М.Глушкова, м.Київ,  
провідний науковий співробітник

доктор технічних наук, професор  
**Антощук Світлана Григорівна,**  
Одеський національний політехнічний університет,  
завідувач кафедри інформаційних систем

Захист відбудеться «2» листопада 2016 р. о 12<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 11.052.03 Державного вищого навчального закладу «Донецький національний технічний університет» за адресою: 85300, м. Красноармійськ, пл. Шибанкова, 2, корп.1, ауд.1.211

З дисертацією можна ознайомитись у науково-технічній бібліотеці Державного вищого навчального закладу «Донецький національний технічний університет» за адресою: 85300, м. Красноармійськ, пл. Шибанкова, 2

Автореферат розісланий «30» вересня 2016 р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради



Г.В. Мокрий

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Системи комп'ютерної графіки є інструментом, який підтримує інтерактивний доступ користувача до обчислювальних ресурсів і забезпечує створення і функціонування систем гібридного інтелекту, які об'єднують творчий потенціал людини з інформаційними, обчислювальними і образотворчими можливостями ЕОМ. Завдяки високій реалістичності трьохмірна графіка набула широкого поширення практично у всіх сферах діяльності людини. При синтезі графічних сцен необхідно вирішувати двоєдине завдання - забезпечення високої реалістичності графічних об'єктів і досягнення прийнятної для конкретного завдання часу формування графічних сцен. Вимоги до реалістичності зображень постійно зростають, що зумовлює розробку і використання відповідних методів і засобів.

На даному етапі комп'ютерної графіки найбільшого поширення отримали метод растеризації (прямий метод) і метод трасування променів.

Метод растеризації, який використовує завдання графічних об'єктів полігональної сіткою, має високу продуктивність, але не забезпечує достатньої реалістичності через апроксимаційні спрощення. Зменшення розмірів трикутників для підвищення реалістичності призводить до збільшення обсягів використовуваної пам'яті і перевищення підготовчих операцій над піксельними, що позначається на часі формування графічних сцен. Полігональна модель принципово не дозволяє отримати багато візуальних ефектів, необхідних для реалістичного відображення сцени.

Сьогодні провідні графічні фірми роблять ставку на метод трасування променів як базовий побудови трьохмірних сцен значно більшої реалістичності. В основі методу лежить відтворення в математичній формі ходу променів в реальних пристроях формування зображень. На відміну від методу растеризації метод трасування променів дозволяє обробляти в сцені об'єкти довільних геометричних форм, які можуть бути виражені математичними записами його форми. Метод трасування променів відтворює широкий набір оптичних ефектів, таких як відображення променів, їх переломлення, розсіювання. Цей метод дозволяє отримати не тільки тіні від об'єктів, а й розрахувати вторинне освітлення. Безперечні переваги методу трасування променів - універсальність, наочність, простота фізичного трактування і можливість розпаралелювання визначають його використання як базового методу для формування в найближчому майбутньому зображень фотореалістичної якості. Генерація графічного зображення вимагає тривалого часу навіть при наявності потужних обчислювальних засобів. Незважаючи на прогрес у підвищенні графічної продуктивності, час генерації реалістичного зображення на основі методу трасування променів залишається неприпустимо великим, особливо для інтерактивних режимів роботи, коли графічна система повинна сформувати сцену в реальному часі в залежності від дій користувача.

У зв'язку з цим питання підвищення продуктивності комп'ютерних систем формування реалістичних трьохмірних зображень є актуальними.

В роботі за рахунок несуттєвого зменшення якості генерації зображення, візуально непомітного для користувача, знайдені резерви для підвищення продуктивності. Дана робота присвячена розробці методів і апаратних рішень підвищення продуктивності комп'ютерних систем формування трьохмірних графічних зображень, які використовують трасування променів.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційну роботу виконано в рамках науково-дослідної теми «Теоретичний аналіз і дослідження процесів управління та обробки даних в комп'ютерних системах» (шифр Н-26-10) кафедри комп'ютерної інженерії Донецького національного технічного університету.

**Мета і задачі дослідження.** Метою даної роботи є підвищення продуктивності формування трьохмірних зображень за рахунок розробки нових методів і апаратних рішень для комп'ютерних систем формування реалістичних графічних зображень.

Для досягнення мети в роботі вирішуються наступні завдання:

- провести аналіз комп'ютерних систем візуалізації трьохмірних сцен;
- розробити нові методи формування трьохмірних зображень, орієнтованих на підвищення швидкодії графічної комп'ютерної системи;
- розробити нові апаратні рішення для формування трьохмірних зображень, використовуючи рядкову або блокову інтерполяцію;
- реалізувати програмні компоненти комп'ютерної системи формування трьохмірних зображень;
- дослідити залежності характеристик системи формування трьохмірних зображень від параметрів методів формування;
- визначити порогове значення інтенсивності кольору та коефіцієнта максимальної відмінності в кольорі.

**Об'єкт дослідження.** Процес візуалізації трьохмірних сцен комп'ютерною системою.

**Предмет дослідження.** Методи і апаратні рішення для комп'ютерних систем формування трьохмірних зображень.

**Методи дослідження.** У процесі досліджень використані основні положення і формальний апарат теорії формування зображень, деякі розділи теорії обробки зображень, що стосуються дискретизації і інтерполяції, теорії колориметрії, теорії сприйняття, теорії паралельних алгоритмів і теорії проектування обчислювальних пристроїв на FPGA. Проведено комп'ютерне моделювання з використанням двоядерного процесора і обчислювального кластера, яке показало достовірність теоретичних положень.

**Наукова новизна одержаних результатів** дисертаційного дослідження полягає в наступному:

1. Удосконалено метод підвищення продуктивності формування трьохмірних зображень, який на відміну від існуючих використовує піксельні

сегменти або блоки і додає міжпиксельну інтерполяцію в кінець трасування поточного променя або групи променів, що підвищує швидкість метода до 16%.

2. Одержав подальший розвиток метод постобробки зображення, сформованого на основі зворотного трасування променів, який на відміну від існуючих застосовує рядкову або блокову інтерполяцію, що дозволяє підвищити швидкість формування зображення.

3. Одержала подальший розвиток структурна організація формування трьохмірних зображень на основі FPGA-трасувальника променів, яка на відміну від існуючих містить пристрій рядкової або блокової інтерполяції, що дозволяє підвищити продуктивність формування зображення.

**Практичне значення одержаних результатів** роботи полягає в наступному:

1. Розроблена і адаптована для кластера ДонНТУ NeClus з MIMD-архітектурою програмна компонента, що дозволило встановити залежність часу формування трьохмірного зображення від кроку інтерполяції, коефіцієнта максимальної відмінності в кольорі і кількості паралельних потоків.

2. Програмно реалізований запропонований метод постобробки сформованих трьохмірних зображень на MIMD-архітектурі, що дозволило встановити залежність часу формування зображення від кроку інтерполяції і кількості паралельних потоків.

3. Проведено експертне оцінювання порогового значення інтенсивності кольору та коефіцієнта максимальної відмінності в кольорі, що дозволило підвищити якість сформованого зображення.

4. Запропоновані в дисертаційній роботі методи формування трьохмірних зображень використані на кафедрі комп'ютерної інженерії ДВНЗ «Донецький національний технічний університет» при читанні лекцій, виконанні курсових і дипломних проектів, а також при підготовці магістерських робіт.

**Особистий внесок здобувача.** Усі основні положення і результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно.

У роботах [1-4] дисертант виконав розробку і реалізацію FPGA-моделі трасувальника. У роботах [5-7] дисертанту належить розробка програмної моделі реалізації методів на кластері NeClus і проведення досліджень. У роботі [8] дисертантом виконано розробку блоку рядкової інтерполяції. У роботі [9] дисертанту належить розробка пристрою блокової інтерполяції. У роботах [10,11] дисертантом проведено дослідження продуктивності алгоритму міжпиксельної інтерполяції. У роботі [12] дисертантом проведено дослідження коефіцієнта максимальної відмінності в кольорі і порогового значення інтенсивності кольору. У роботі [13] дисертантом була запропонована фільтрація для метода постобробки зображення, сформованого на основі зворотного трасування променів.

**Апробація результатів роботи.** Основні положення і результати роботи доповідалися, обговорювалися та отримали позитивну оцінку на науково-технічних конференціях та семінарах:

- міжнародна науково-технічна конференція студентів, аспірантів та молодих вчених "Информатика и компьютерные технологии" (22-25 листопада 2010 р., 22-23 листопада 2011 р., м. Донецьк);
- міжнародна науково-технічна конференція «Машиностроение и техносфера XXI века» (12-16 вересня 2011 р., м. Севастополь);
- міжнародний науково-практичний семінар «Практика и перспективы развития партнерства в сфере высшей школы» (12-14 квітня 2011 р., 15-18 квітня 2013 р., м. Донецьк);
- IV міжнародна науково-технічна конференція «Моделирование и компьютерная графика» (5-8 жовтня 2011 р., м. Донецьк);
- V міжнародна науково-технічна конференція «Моделирование и компьютерная графика» (24-27 вересня 2013 р., м. Донецьк);
- VI міжнародна науково-технічна конференція «Dependable Systems, Services and Technologies (DeSSerT'2012)» (25-28 травня 2012 р., м. Севастополь).

**Публікації.** За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 13 друкованих праць, з них 6 статей опубліковані у виданнях, затверджених ВАК України, 1 - в європейському науковому журналі, 6 - у збірниках друкованих праць за результатами міжнародних та всеукраїнських наукових конференцій.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків. Повний обсяг дисертаційної роботи становить 142 сторінки друкованого тексту. Дисертація містить 11 рисунків на 6 сторінках, 7 додатків на 21 сторінці, список використаних джерел з 99 назв на 10 сторінках.

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

У **вступі** проаналізовано сучасний стан питання і обґрунтована актуальність теми, сформульовані мета і основні завдання дослідження, визначено наукову новизну і практичне значення основних результатів, наведено відомості про їх апробацію та реалізацію.

У **першому розділі** проведено аналіз досліджень з проблеми розробки теоретичних основ і створення систем формування зображень з використанням трасування променів. Метод трасування променів передбачає виконання одних і тих же дій при трасуванні променя через кожен піксель екрану. При цьому трасування променя через один піксель не вимагає використання інформації, отриманої при трасуванні променя через інший піксель екрану. Ця незалежність призводить до появи такої апаратури архітектурної організації складних обчислювальних систем, яка є найпростішою, з алгоритмічної точки зору, вимагає великих витрат, та полягає у використанні окремого процесора для

трасування променя через кожен піксель. Більш придатною для реалізації є архітектура графічної системи, яка використовує розпаралелювання фрагментів оброблюваних пікселів, тобто реалізацію принципу розпаралелювання «від вихідних даних». У ній кількість процесорів визначається кількістю фрагментів, на які екран розділений по горизонталі і вертикалі, відповідно. Таке архітектурне рішення вимагає меншої кількості процесорних елементів і, крім того, менші витрати часу на розподіл завдання на процеси.

Визначені дві основні проблеми які не дозволяють підвищити ефективність формування зображень, а саме: по-перше, існуючі методи формування зображень не забезпечують високу швидкодію та, по-друге, відомі архітектури систем формування зображень вимагають високу продуктивність процесора і високу пропускну здатність пам'яті. Сформульована мета і завдання досліджень щодо розробки методів і апаратних рішень підвищення продуктивності комп'ютерних систем формування трьохмірних графічних зображень, які використовують трасування променів.

У **другому розділі** розроблені методи підвищення продуктивності трьохмірних зображень.

Загальна ідея запропонованих методів підвищення швидкодії формування полягає в наступному:

1. Виходячи з припущення, що більшість суміжних пікселів трасованого зображення мають приблизно однакові кольорні параметри, виконувати трасування пікселів з деяким кроком, який залежить від вимог до якості зображення.

2. Для отримання значень нетрасованих пікселів застосовувати інтерполяцію кольорних компонент.

3. При отриманні істотних розбіжностей в параметрах пікселів, виконувати коригування кроку трасування або застосовувати поліноми більш високого порядку, що інтерполюють.

Запропонований метод формування зображення на основі методу зворотного трасування променів із застосуванням малої інтерполяції передбачає модифікацію методу трасування променя шляхом використання піксельних сегментів (рис.1) і додавання міжпіксельна інтерполяції в кінець трасування поточного променя. При цьому вважається, що розмір джерел світла повинен перевищувати крок інтерполяції. Таким чином, повинні бути відсутніми маленькі об'єкти, що яскраво світяться.

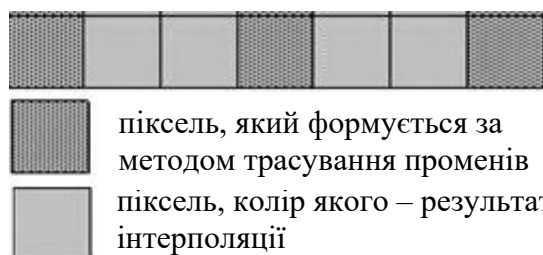


Рисунок 1 - Приклад сегмента пікселів

Етапи обробки одного фрагмента рядка:

1. Задається довжина сегмента рядка або фрагмента рядка екрану.
2. Виконується трасування 1-го пікселя рядка.
3. Потім в циклі відбувається перебір піксельних сегментів:
  - а) колір лівого пікселя сегмента приймається рівним результату попереднього трасування;
  - б) виконується трасування променя через правий піксель сегмента;
  - в) розраховується коефіцієнт відмінності в кольорі лівого і правого пікселя сегмента;
  - г) якщо значення коефіцієнта менше допустимого, то розраховуються колірні компоненти внутрішніх пікселів, інакше довжина сегмента (крок трасування) зменшується вдвічі, і у цьому разі перехід на крок б).

З огляду на те, що в розрахунок колірних компонент інтерпольованої пікселів вводиться логічна вершина, яка порівнює розбіжність в колірних компонентах граничних пікселів сегмента з коефіцієнтом  $K_{мвк}$ , формула розрахунку колірних компонент внутрішніх пікселів має вигляд (1).

$$C_{in} = \begin{cases} \frac{C_l + C_r}{2}, & \text{if } K_{мвк} \leq 2 \\ RayTrace(), & \text{if } K_{мвк} > 2 \end{cases}, \quad (1)$$

де  $C_{in}$  – колір внутрішніх пікселів сегмента,

$C_l$  – колір зовнішнього лівого пікселя,

$C_r$  – колір зовнішнього правого пікселя.

$RayTracer()$  означає виконання трасування через центральний піксель сегмента.

Таким чином, можуть використовуватися сегменти пікселів змінної довжини: для фонових і граничних ділянок зображення - більшого розміру, а для центральної частини екрану - меншого. Необхідна кількість умовних процесорних елементів для трасування одного рядка розміром  $X_{max}$  пікселів буде визначатися таким чином:

$$N_{PEr} = \left\lceil \frac{X_{max}}{\sum_{i=0}^{Ks} L_{segm_i} + 1} \right\rceil + 1, \quad (2)$$

де  $L_{segm_i}$  – довжина і-го сегмента пікселів,

$Ks$  – кількість піксельних сегментів.

Загальна кількість процесорних елементів буде визначатися як:

$$N_{PE} = N_{PEr} \cdot Y_{max}, \quad (3)$$

де  $Y_{max}$  – розмір екрану по вертикалі, пікселів.



Запропонований метод формування зображення на основі зворотного трасування променів із застосуванням блокової інтерполяції передбачає модифікацію методу трасування променя шляхом використання піксельних блоків (рис.2) і додавання міжпіксельної інтерполяції в кінець трасування поточної групи променів. При цьому вважається, що розмір джерел світла повинен перевищувати крок інтерполяції.

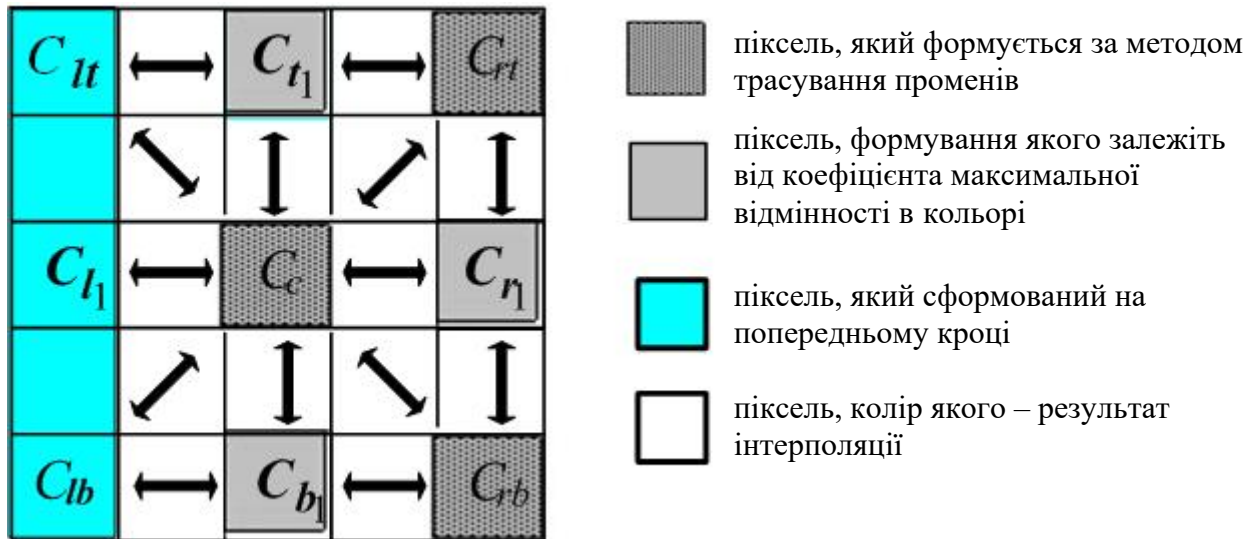


Рисунок 2 - Приклад піксельного блоку для верхніх 5-ти рядків

Етапи обробки верхніх 5-ти рядків екрану:

1. Виконується трасування лівих пікселів блоку  $C_{lt}$ ,  $C_{lb}$  і формування внутрішніх пікселів по формулі (1).

2. Потім в циклі відбувається перебір піксельних сегментів розміром 4x5:

а) кольори лівих пікселів сегмента приймаються рівним результату попереднього кроку;

б) виконується трасування променя через два правих і центральний пікселі сегмента  $C_{rt}$ ,  $C_c$ ,  $C_{rb}$ .

в) розраховуються коефіцієнти відмінності в кольорі (по діагоналі) лівих і правих пікселів щодо центрального;

г) якщо значення коефіцієнта менше допустимого, то розраховуються колірні компоненти пікселів  $C_{l1}$ ,  $C_{r1}$ ,  $C_{b1}$ ,  $C_{t1}$ , інакше виконується їх додаткова трасування.

д) кольори внутрішніх пікселів розраховуються як середнє двох сусідніх відповідно до напрямів, показаними на рис.2.

Для нижчих сегментів метод відрізняється тим, що в блоках розміром 5x5 тільки 16 пікселів вимагають формування, а 9 (ліві і верхні) вже сформовані. Таким чином, трасування піддаються 2 ( $C_c$ ,  $C_{rb}$ ) або 4 пікселя ( $C_c$ ,  $C_{rb}$ ,  $C_{r1}$ ,  $C_{b1}$ ), решта - розраховуються.

Необхідна кількість умовних процесорних елементів для трасування фрагмента розміром  $X_{\max} \times Y_{\max}$  пікселів буде визначатися таким чином:

$$N_{PE} = N_{PE_1} + \frac{Y_{\max} - 5}{4} N_{PEr}, \quad (4)$$

$$N_{PE_1} = \left\lceil 1 \cdot T_l + \frac{X_{\max}}{4} \cdot T_{bl} \right\rceil, \quad (5)$$

де  $N_{PE_1}$  – кількість процесорних елементів для перших 5-ти рядків фрагмента,

$N_{PEr}$  – кількість процесорних елементів для інших рядків фрагмента,

$T_l$  – кількість трасувань лівих пікселів, дорівнює 2 або 3,

$T_{bl}$  – кількість трасувань всередині циклу, дорівнює 3 або 6.

Метод постобробки сформованого зображення передбачає застосуванням малої або блокової інтерполяції до масиву пікселів, отриманих в результаті трасування. Таким чином, він не передбачає модифікації методу зворотного трасування променів, тим самим, даючи можливість використовувати вже наявні трасувальники променів. При цьому вважається, що розмір джерел світла повинен перевищувати крок інтерполяції.

Етапи обробки одного рядка:

1. Задається кількість трасованих променів (умовних процесорних елементів) по горизонталі,  $N_{PEr}$ .

2. Виконується цикл трасування променів через фрагменти вікна. Результати записуються в буферний масив.

3. Здається крок рядкової інтерполяції,  $L_{segm}$ .

4. Виконується обробка буферного масиву з розрахунком кольорів внутрішніх пікселів сегмента.

5. Якщо в процесі інтерполяції порушується якість зображення, застосовується більш складна фільтрація.

Розмір результуючого зображення по горизонталі визначається за формулою (6), розмір по вертикалі не змінюється.

$$X_{\max} = N_{PEr} \cdot (L_{segm} - 1). \quad (6)$$

При використанні блочної інтерполяції також не аналізується коефіцієнт відмінності в кольорі, тому  $T_l$  приймає значення 3 для перших 5-ти рядків,  $T_r$  приймає значення 2 для наступних блоків,  $T_{bl}$  приймає значення 6,  $T_{br}$  приймає значення 4.

Цей метод не передбачає застосування сегментів або блоків змінної довжини.

Оскільки в дисертаційній роботі для підвищення продуктивності формування графічних сцен використовувалося інтерполювання інтенсивності кольору між виділеними пікселями, в яких значення інтенсивності розраховують точно, необхідним було визначення порогових значень інтенсивностей кольору, які не розрізняються візуально оператором.

Мінімальні порогові значення  $\Delta I$  для зеленого, жовтого, блакитного, помаранчевого, синього, червоного і фіолетового кольорів, які були отримані на основі експертних оцінок, наведені в табл.1.

Таблиця 1 – Мінімальні порогові значення для семи кольорів

Кольори						
зелений	жовтий	блакитний	помаранчевий	синій	червоний	фіолетовий
$\Delta I$	$\Delta I$	$\Delta I$	$\Delta I$	$\Delta I$	$\Delta I$	$\Delta I$
4	5	6	7	7	8	8

Згідно табл.1, мінімальні порогові значення  $\Delta I$  буде найменшим для зеленого кольору, тобто  $\Delta I = 4$ .

Розрахунок коефіцієнта максимальної відмінності в кольорі  $K_{мвк}$  для  $n$ -бітних компонент RGB здійснюється в наступному вигляді

$$\begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} = T \cdot \begin{bmatrix} g\left(\frac{\Delta R}{2^n - 1}\right) \\ g\left(\frac{\Delta G}{2^n - 1}\right) \\ g\left(\frac{\Delta B}{2^n - 1}\right) \end{bmatrix},$$

$$T = \begin{bmatrix} 0.4124 & 0.3576 & 0.1805 \\ 0.2126 & 0.7152 & 0.0722 \\ 0.0193 & 0.1192 & 0.9505 \end{bmatrix}$$

$$g(K) = \begin{cases} \left(\frac{K + 0.055}{1.055}\right)^{2.2}, & K > 0.04045 \\ \frac{K}{12.92}, & K \leq 0.04045 \end{cases},$$

$$\Delta L^* = 116 \cdot f\left(\frac{\Delta Y}{1}\right) - 16,$$

$$\Delta a^* = 500 \cdot \left( f\left(\frac{\Delta X}{0.9505}\right) - f\left(\frac{\Delta Y}{1}\right) \right),$$

$$\Delta b^* = 200 \cdot \left( f\left(\frac{\Delta Y}{1}\right) - f\left(\frac{\Delta Z}{1.089}\right) \right),$$

$$f(k) = \begin{cases} \sqrt[3]{k}, & k > 0.008856 \\ 7.787k + \frac{16}{116}, & k \leq 0.008856 \end{cases}$$

$$K_{мвк} = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}.$$

На основі експертних оцінок було отримано, що при  $K_{мвк} \leq 2$  інтенсивності кольору не розрізняються візуально оператором.

У **третьому розділі** розроблено структуру апаратної реалізації трасування променів на базі ПЛІС (SaarCOR). Працює на частоті 90 МГц, система досягає реального часу швидкістю від 20 до 60 кадрів в секунду в широкому діапазоні 3D сцен з урахуванням підтримки текстуривання, з численними джерелами світла і декількома рівнями відображення або прозорості. Особливістю цієї системи є повторне використання блоку перетворень для вирішення завдань, які включають ефективний пошук перетину променів з трикутниками. Структурна схема системи приведена на рис.3.

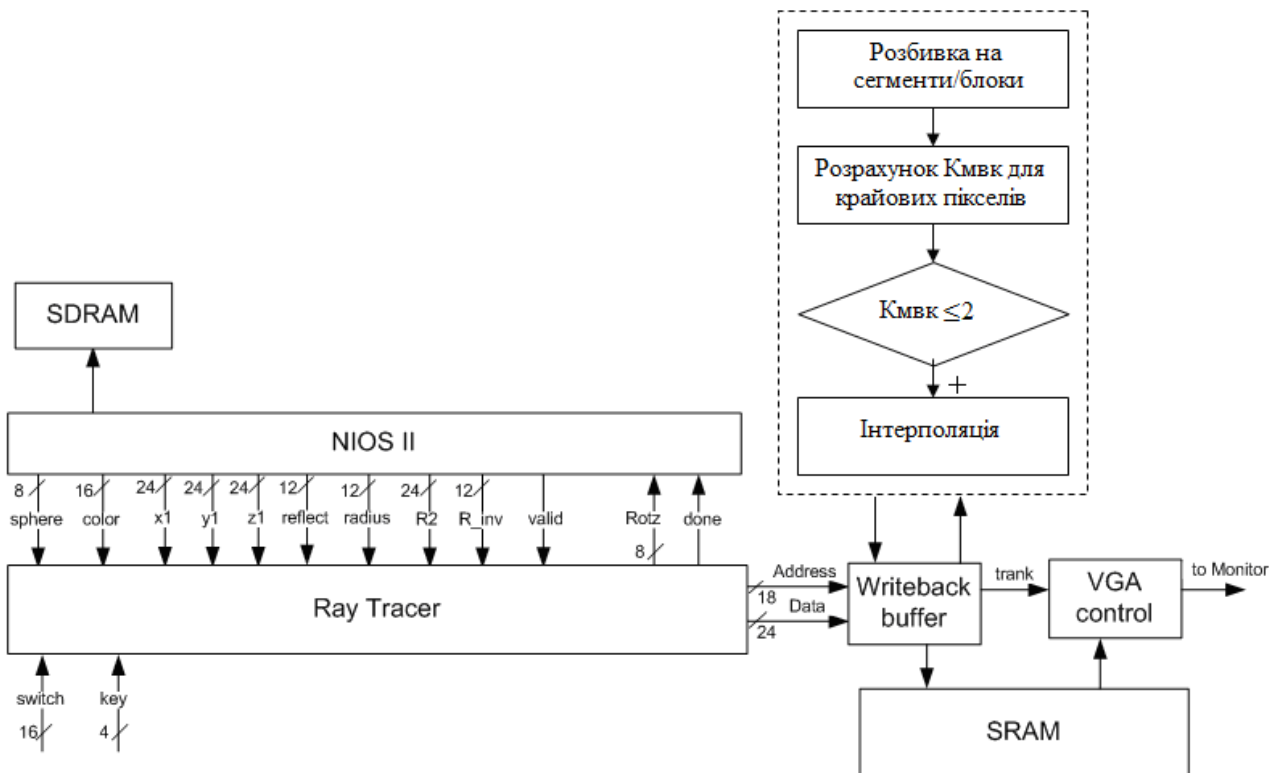


Рисунок 3 - Запропонована структурна схема системи

Основна ідея запропонованої модифікації структурної організації системи полягає в додаванні блоку міжпіксельна інтерполяції (Interpixel interpolation). При цьому Ray Tracer буде трасувати меншу кількість пікселів, ніж дозвіл остаточного зображення, з деяким кроком. Колірні значення непросліджених

пікселів формуватиме блок Interpixel interpolation, застосовуючи методи, запропоновані в другому розділі.

Розглянемо організацію блоку Interpixel interpolation. Для кожної суміжній пари пікселів передбачені додаткові схемні рішення (рис.4). Розглянемо функціональне призначення елементів блоку.

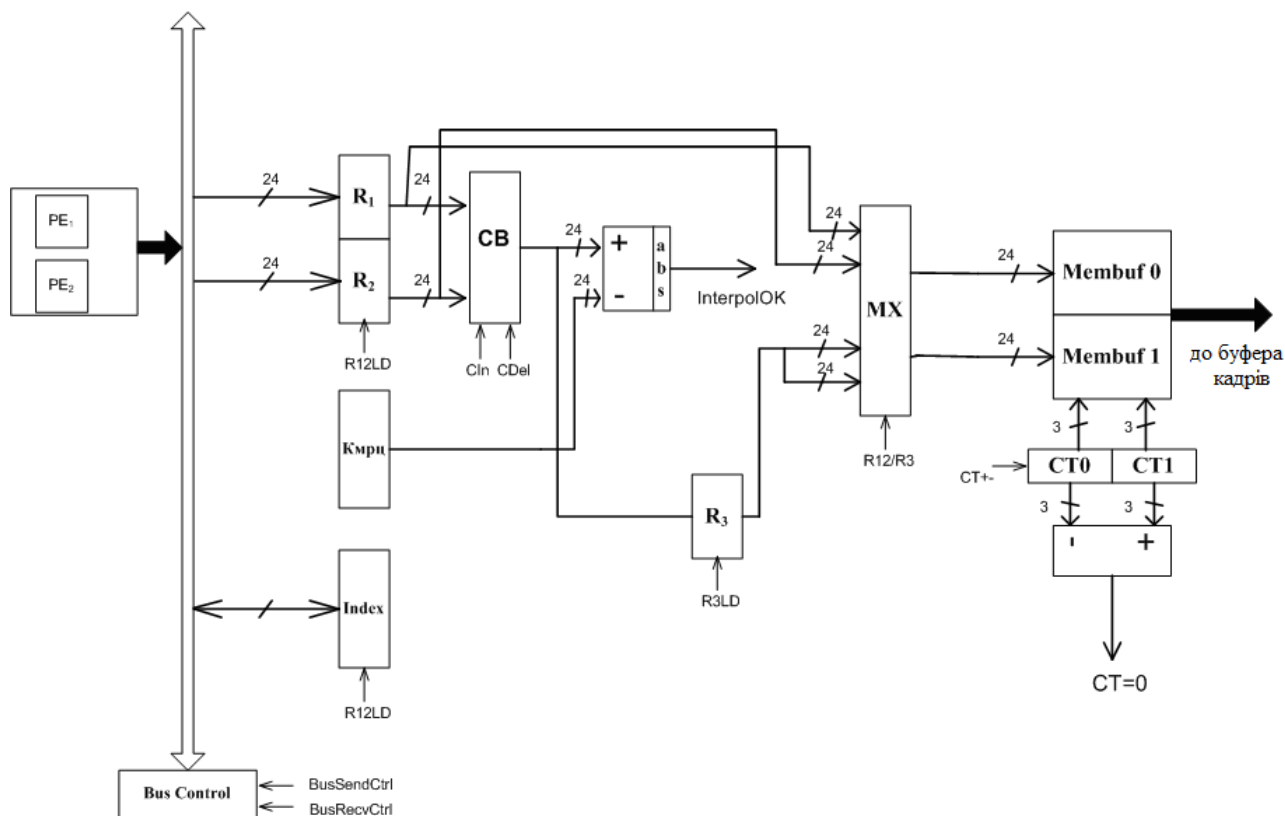


Рисунок 4 - Функціональна організація блоку для пари пікселів

R1, R2 - 24-бітові регістри, що містять значення кольору пікселів (по 8 біт на кожен компоненту), сформованих траєкторій променів; завантаження значень виконується за сигналом R12LD при встановленому сигналі BusRecvCtrl.

R3 - 24-розрядний регістр, в який записується результат обчислення блоком CB внутрішніх пікселів (результат інтерполяції).

Кмвк - містить коефіцієнт максимальної відмінності в кольорі, який використовується для визначення успішності інтерполяції: якщо вона пройшла успішно (InterpolOK = 1), то в MemBuf завантажуються значення R1, R2 і два значення R3, інакше в MemBuf записуються тільки R1, R2.

CB - основний обчислювальний блок, який виконує розрахунок внутрішніх пікселів для запису їх в регістр R3 (режим CIn), а також обчислює різницю між кольорними компонентами (режим CDel) для подальшого порівняння з коефіцієнтом максимальної відмінності в кольорі.

MemBuf – двонаправлена пам'ять, містить поточний сегмент зображення; може розглядатися як два банка: Банк 0 використовує для адресації СТ0, Банк 1 - СТ1.

СТ0 / СТ1 - пара лічильників, СТ0 вважає в прямому напрямку СТ1 - в зворотному; використовуються для адресації MemBuf. При  $(СТ0-СТ1) = 1$  трасування сегмента припиняється. У початковому стані  $СТ0 = 0$ , а  $СТ1 = n$ , де  $n$  - кількість пікселів в сегменті. Обидва лічильника управляються сигналом  $СТ + -$ .

При розробці основного обчислювального блоку використано уявлення процесів у вигляді UML-діаграм. Unified Modeling Language (UML) можна розглядати в якості загальної основи для сучасного моделювання та проектування цифрових пристроїв. UML дозволяє створити платформу для незалежного опису, яке потім може бути використано для прийняття рішень про програмну (мікропрограмного) або апаратної реалізації тієї чи іншої частини системи. UML підтримується значною частиною інструментальних засобів.

На рис.5 наведена UML- діаграма основного обчислювального блоку.

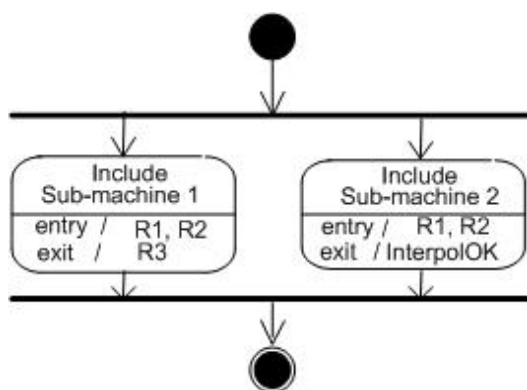


Рисунок 5 - UML-діаграма основного обчислювального блоку

Розрахунок внутрішніх пікселів і запис їх в регістр R3 (процес, який реалізується Sub-machine 1), а також обчислення різниць між кольорними компонентами і установка / скидання прапора успішності інтерполяції (процес, який реалізується Sub-machine 2) виконуються паралельно.

На основі експериментів було встановлено, що для забезпечення  $\Delta \leq 2$  необхідно виконувати вимоги

$$-9 \leq DelR \leq 9; -7 \leq DelG \leq 7; -8 \leq DelB \leq 8. \quad (7)$$

Перевірку цих умов і установку відповідних прапорів R\_OK, G\_OK, B\_OK зручно виконувати відразу після обчислення різниць компонент. При цьому UML-діаграми процесів, що реалізуються Sub-machine 2.1 - Sub-machine 2.3 матимуть вигляд, показаний на рис.6.

Прапор InterpolOK буде встановлюватися в 1, якщо всі умови з (7) виконані, тобто прапори  $R\_OK = 1$ ,  $G\_OK = 1$ ,  $B\_OK = 1$ . Для цього в Sub-machine 2 (рис.7) використана логічна операція «і».

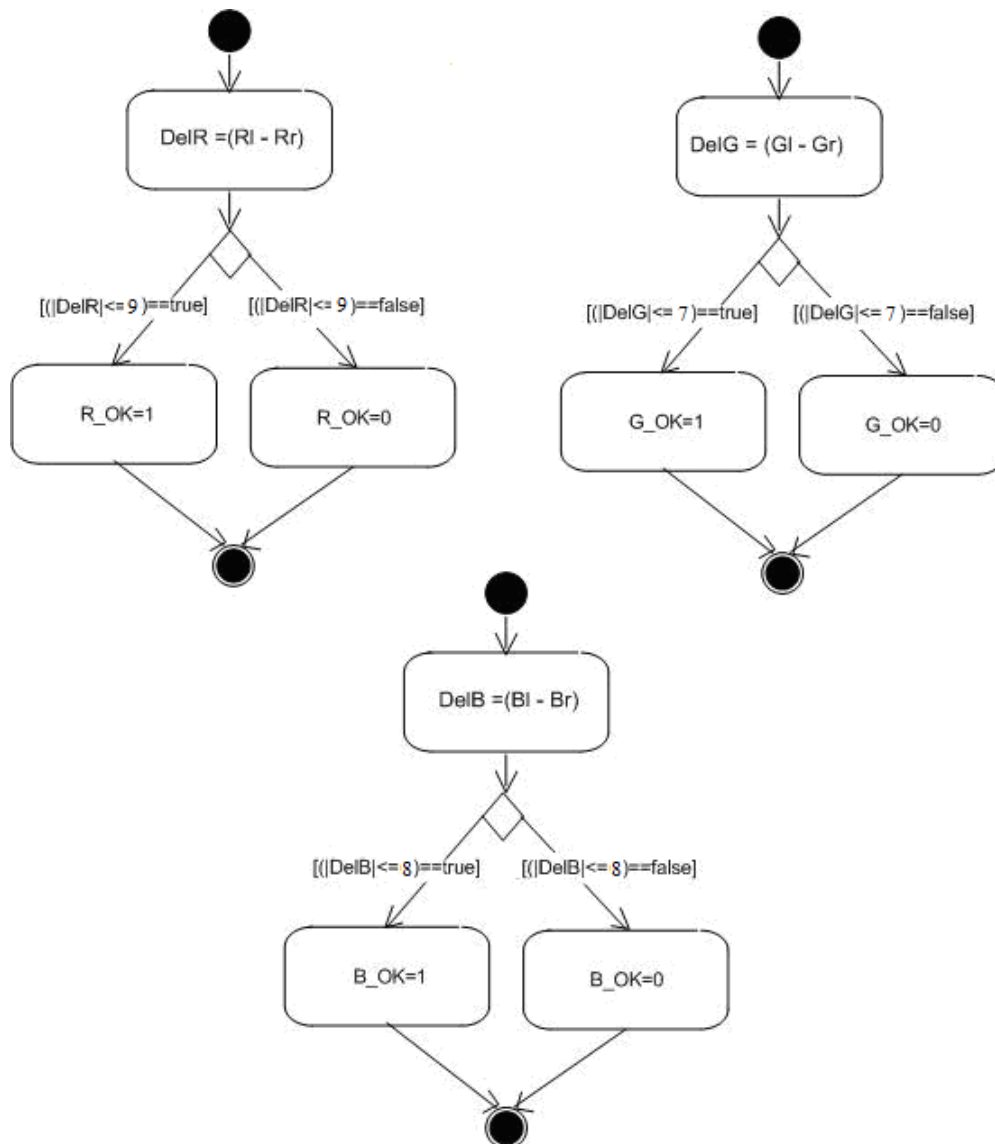


Рисунок 6 - UML-діаграми процесів, які реалізуються модифікованими Sub-machine 2.1-Sub-machine 2.3

UML-діаграма розрахунку внутрішніх пікселів і записи їх в регістр R3, тобто процесу, що реалізується Sub-machine 1, побудована аналогічним чином. При цьому у внутрішні регістри Rl, Gl, Bl заносяться колірні компоненти лівого пікселя сегмента, а у внутрішні регістри Rr, Gr, Br - колірні компоненти правого пікселя сегмента. Обчислення внутрішніх пікселів проводиться паралельно процесами, які реалізуються Sub-machine 1.1, Sub-machine 1.2 і Sub-machine 1.3, які виконують одні і ті ж дії над різними колірними компонентами.

Також розроблена FPGA - реалізація трасувальникові для полігональної моделі опису об'єктів.

При апаратурній реалізації запропонованого методу формування зображень прискорення, практично, пропорційно використовуваному кроку інтерполяції.

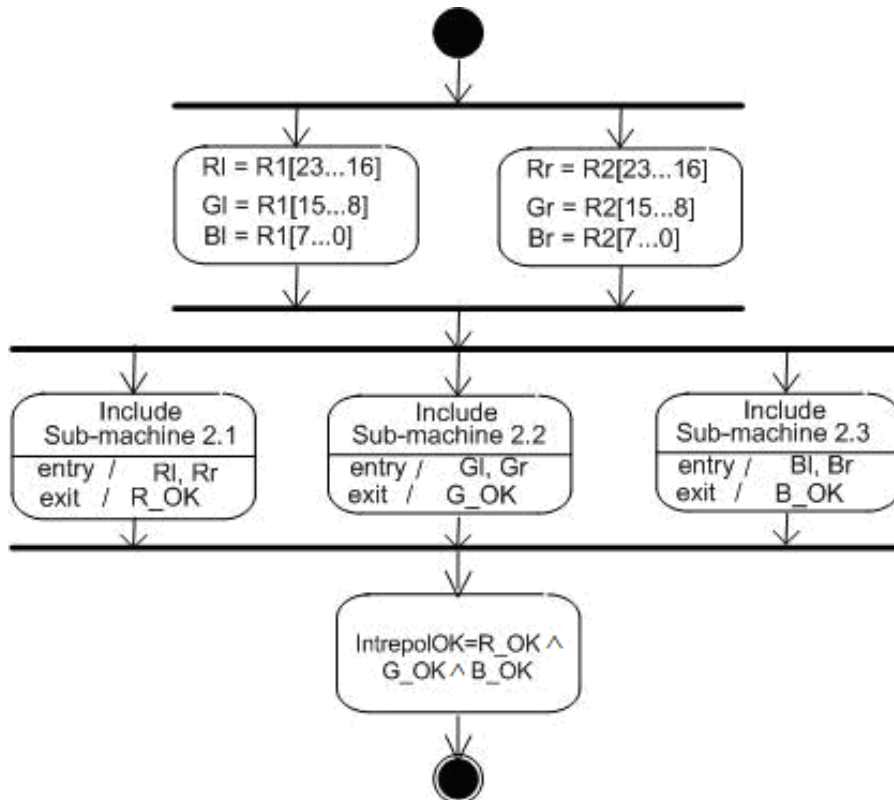


Рисунок 7 - UML-діаграма Sub-machine 2

При трасуванні променів з кроком 2 пікселя (тобто виконуючи трасування «через 1 піксель»), час формування зображення зменшується в 1.94 рази, а при «пропуску» 2-х пікселів - у 2.8 рази. Запропоноване апаратурне рішення можна застосовувати для збільшення дозволу зображень, які отримані промисловими пристроями.

У **четвертому розділі** розробляються програмні компоненти, що реалізують запропоновані методи. Реалізація методу трасування променів виконана в Microsoft Visual Studio 2010 Ultimate мовою C#. Розроблена програмна компонента підтримує обробку зображень з урахуванням властивостей матеріалу, що відображають, заломлюють, розсіюють. Підтримує м'які тіні, згладжування, відображення відблисків.

Програмна компонента складається з двох основних модулів:

- RayTracer.dll - динамічна бібліотека, яка містить додаткові класи. Поширюється як «Stand-Alone» продукт; не залежить від версії Microsoft Framework;

- RayTracerAPP.exe - графічна програма для тестування і відображення результатів, яка написана за допомогою бібліотеки елементів Windows Forms і використовує бібліотеку RayTracer.dll.



Для проведення досліджень використовувався дозвіл екрана 300 на 300 пікселів, 600 на 600 пікселів і розмірі 1800 на 1200 пікселів (є стандартний формат FullHD).

Спочатку проведені дослідження показали, що для різних сцен сегменти розміром до 10 пікселів можуть відрізнятися незначно. Однак, як правило, для 20-25% піксельних сегментів необхідно використовувати менший крок інтерполяції. Тому для досліджень обрані кроки інтерполяції в 2 (режим 1) і 3 (режим 2) пікселя, тобто довжина сегмента складає 4 і 5 пікселів, відповідно. Тестування методу проводилося на двоядерній системі.

На рис.8 наведено поєднана діаграма результатів тестування запропонованих методів.

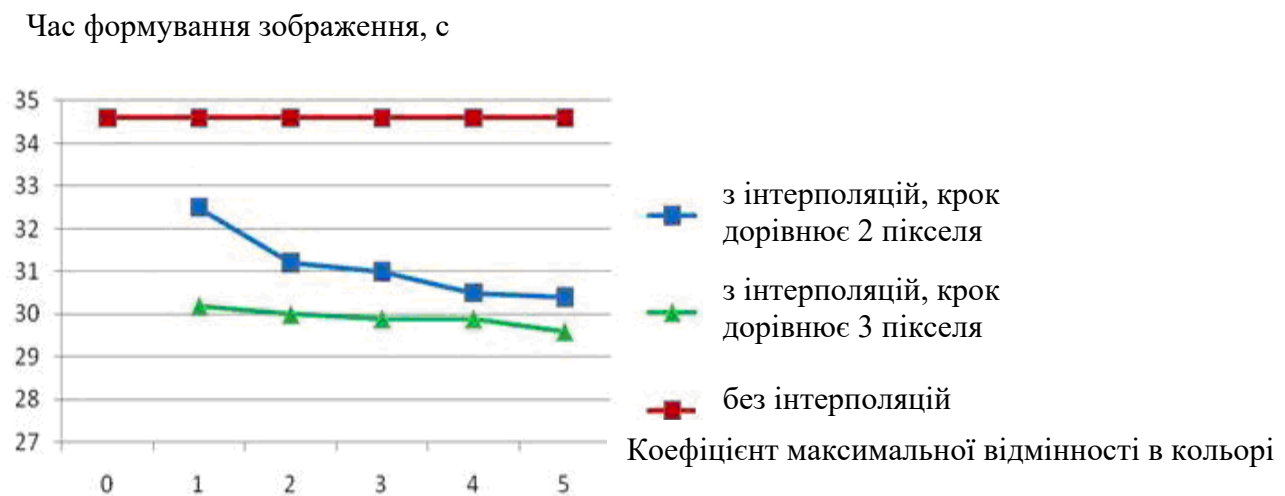


Рисунок 8 – Суміщена діаграма порівняння швидкості формування зображення сцени без використання інтерполяції і для 1-го і 2-го режимів

В обох випадках використання коефіцієнта максимальної відмінності в кольорі, рівного 5, дало близько 2% прискорення в порівнянні з коефіцієнтом, рівним 2. При цьому помітної зміни якості зображення не відбулося.

Також для тестування виконана адаптація методу для реалізації на кластері. Метод побудований таким чином, що процес з рангом 0 (master thread, MT) розподіляє терміни на рівну кількість між іншими виконавчими процесами (slave thread, ST) і починає чекати прийому масиву пікселів від кожного виконавчого процесу. Схема MIMD методу трасування променів приведена на рис.9.

Master-потік визначає кількість процесів в комунікаторі MPI. Після цього йде аналіз кількості потоків, і йде формування пакета, який містить дані про завдання для кожного процесу. Після цього здійснюється розсилка цих пакетів всім обчислювальним процесам в комунікаторі MPI. Далі йде ініціалізація початкових даних в кожному процесі, і починається обчислення своєї частини сцени. Відправка даних від обчислювальних процесів виконується по одному рядку сцени.

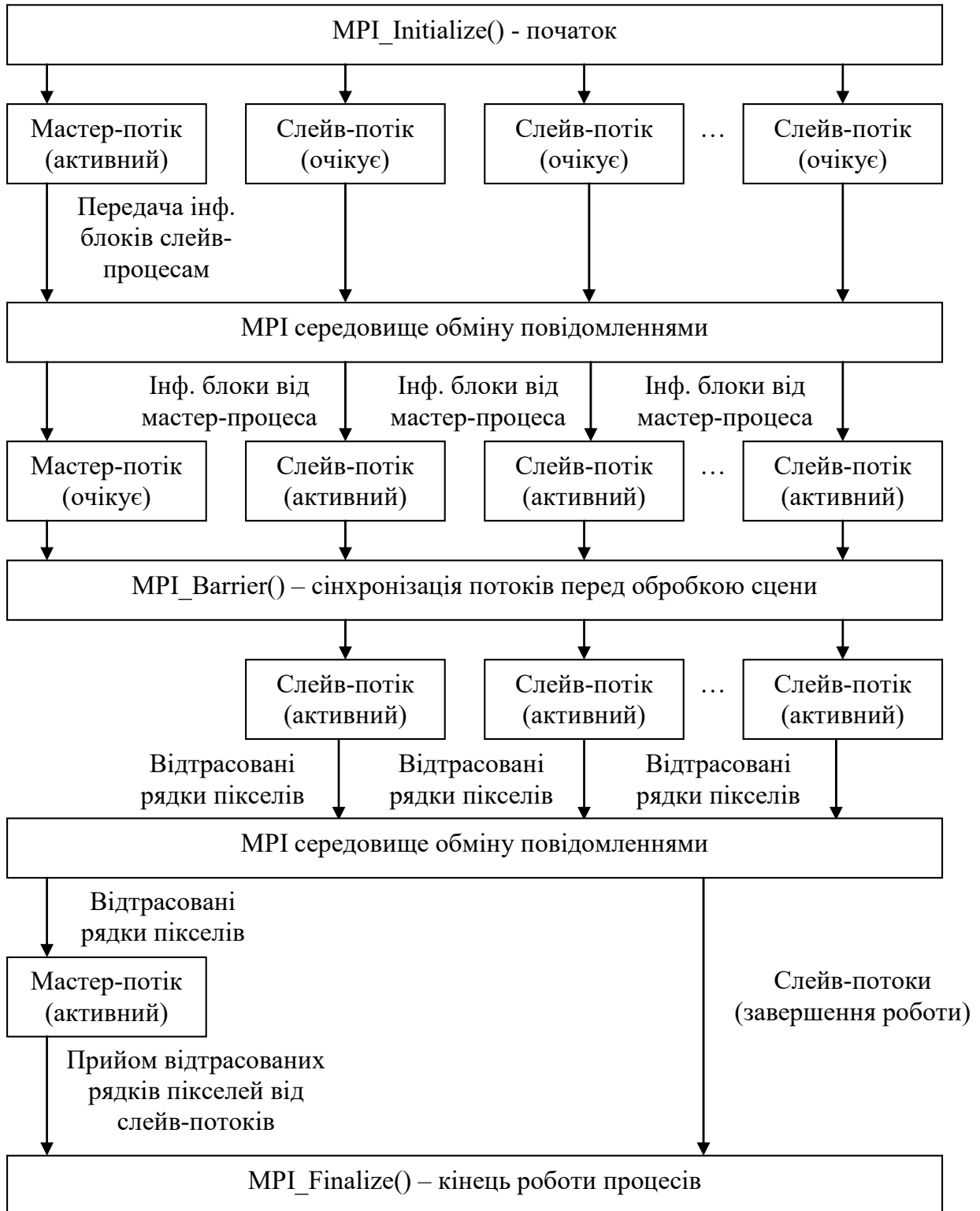


Рисунок 9 – Схема MIMD паралельного методу трасування променів

Після виконання всього методу трасування променів відбувається обчислення часу виконання методу, в якості кінцевого використовується час закінчення останнього процесу. Прискорений метод трасування променів для багатопроцесорної системи був реалізований на двох мовах програмування - на

Microsoft C # і C ++. Мова Microsoft C # використовувався для розробки і налагодження прискореного методу трасування променів на системі в середовищі Microsoft Compute Cluster Pack 2008. Мова C ++ використовувався для кінцевої реалізації методу трасування променів для багатопроцесорної системи, яка працює під управлінням Scientific Linux 4.6. Обидві програми були реалізовані за допомогою бібліотек, які представляють собою реалізацію стандарту Message Passing Interface (MPI) - MPICH для C ++ реалізації і MPI.NET для програми, написаної на Microsoft C #.

## ВИСНОВКИ

У дисертації запропоновано вирішення актуальної науково-технічної задачі, що полягає в розробці нових методів і апаратних рішень підвищення продуктивності формування зображень, використовуваних в комп'ютерних системах формування реалістичних графічних зображень.

Основні наукові результати, отримані в роботі, можна сформулювати наступним чином.

1. Виконано аналіз сучасних комп'ютерних систем формування зображень, їх методів і архітектур.

2. Розроблено метод підвищення продуктивності формування зображень, який полягає в трасуванні пікселів з деяким кроком, який визначається запропонованим коефіцієнтом максимальної відмінності в кольорі, з подальшою інтерполяцією кольірних компонент нетрассіруємих пікселів, що дозволяє скоротити час формування зображення необхідного дозволу до 16%.

3. Запропоновано метод постобробки зображення, сформованого на основі методу зворотного трасування променів, який застосовує малу або блокову інтерполяцію, що дозволяє підвищити швидкодію формування зображення.

4. Удосконалено структурну організацію комп'ютерної системи формування зображень на основі FPGA-трасувальника променів шляхом додавання пристрою маленької чи блокової інтерполяції, що дозволяє підвищити продуктивність формування зображення, забезпечити роботу у реальному часі, формування від 20 до 60 кадрів в секунду в широкому діапазоні 3D сцен з урахуванням підтримки текстурованості, з численними джерелами світла і декількома рівнями відображення або прозорості.

5. Розроблена програмна компонента, яка реалізує запропонований метод формування зображень, і виконана її адаптація для кластера ДонНТУ NeClus з MIMD-архітектурою. За допомогою цієї компоненти досліджена залежність часу формування зображення від кроку інтерполяції, коефіцієнта максимальної відмінності в кольорі і числа паралельних потоків.

6. Проведено експертне оцінювання порогового значення інтенсивності кольору і коефіцієнта максимальної відмінності в кольорі, що дозволило підвищити якість сформованого зображення.

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Malcheva R. An Acceleration of FPGA-based Ray Tracer / R. Malcheva, M. Yunis // *European Scientific Journal*. – 2014. – Vol.10, N7. – P.186-190.
2. Мальчева Р.В. Повышение производительности FPGA-базированной системы визуализации в реальном времени / Р.В. Мальчева, М. Юнис // *Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія «Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка»*. – 2013. – №1(17). – С. 37-42.
3. Мальчева Р.В. Модификация FPGA-базированной системы визуализации / Р.В. Мальчева, М. Юнис, Н. Альмадждалави // *Моделювання та комп'ютерна графіка: Матеріали 5-ї міжнародної науково-технічної конференції, 24-27 вересня 2013 р.* – Донецьк, 2013. – С. 110-112.
4. Мальчева Р.В. Исследование влияния шага трассирования лучей и коэффициента различия в цвете на время выполнения формирования изображения / Р.В. Мальчева, М. Юнис, А. Джамиль // *Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія «Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка»*. – 2011. – Вип. 14(188). – С. 195-201.
5. Мальчева Р.В. Реализация модифицированного алгоритма трассировки лучей на кластере NeClus / Р.В. Мальчева, М. Юнис // *Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: «Обчислювальна техніка та автоматизація»*. – 2013. – №1(24). – С.263-268.
6. Мальчева Р.В. Разработка ускоренного алгоритма трассировки лучей / Р.В. Мальчева, А.А. Серженко, М. Юнис // *Інформатика та комп'ютерні технології / Матеріали VI міжнародної науково-технічної конференції студентів, аспірантів та молодих науковців, 22-25 ноября 2010 г.* – Донецьк, 2010. – Т.1. – С.125–134.
7. Мальчева Р.В. Аппаратурная реализация строчной межпиксельной интерполяции / А.А. Баркалов, Р.В. Мальчева, М. Юнис // *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*. – 2012. – №6(58). – С.70-74.
8. Юнис М. Применение строчной межпиксельной интерполяции для ускорения трассирования лучей / М. Юнис, Р.В. Мальчева // *Практика и перспективы развития партнерства в сфере высшей школы: Материалы двенадцатого международного научно-практического семинара 12-14 апреля 2011 г.* – Донецк, 2011. – Т.2. – С.72-74.
9. Юнис М. Применение блочной межпиксельной интерполяции для ускорения трассирования лучей / М. Юнис, Р.В. Мальчева, С.А. Ковалев // *Машиностроение и техносфера XXI века. Сборник трудов XVIII международной научно-технической конференции*. – Т.4. – Донецк, 2011. – С.189-191.
10. Мальчева Р.В. Анализ производительности алгоритма межпиксельной интерполяции / Р.В. Мальчева, М.Юнис // *Моделювання та комп'ютерна графіка: Матеріали 4-ї міжнародної науково-технічної конференції, 5-8 жовтня 2011 р.* – Донецьк, 2011. – С.174-177.

11. Malcheva R.V. Research of productivity of a parallel implementation of ray-polygon intersection stage / R.V. Malcheva, S.A. Kovalev, M. Yunis // «Практика и перспективы развития партнерства в сфере высшей школы». Материалы четырнадцатого международного научно-практического семинара. – Донецк, 2013. – Т.2. – С.199-202.

12. Федоров Е.Е. Определение коэффициента максимального различия в цвете и порогового значения интенсивности цвета для метода повышения производительности трехмерных изображений / Е.Е. Федоров, М.Я. Юнис, В.И. Костин, И.В. Ярош // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія «Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка». – 2016. – № 1. – С. 41-53.

13. Федоров Е.Е. Метод повышения производительности формирования трехмерных изображений / Е.Е. Федоров, М.Я. Юнис // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2016. – № 1. – С. 109-112.

## АНОТАЦІЯ

Мохаммад Юніс Яхья. Розробка програмно-апаратних рішень підвищення продуктивності комп'ютерних систем формування трьохмірних зображень. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.05 - Комп'ютерні системи та компоненти. - ДВНЗ «Донецький національний технічний університет», Красноармійськ, 2016.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню завдання підвищення швидкодії і продуктивності комп'ютерних систем формування зображень. У роботі проведено аналіз систем формування зображень з використанням трасування променів.

Розроблено метод формування зображень на основі зворотного трасування променів, що полягає в трасуванні пікселів з деяким кроком, який визначається запропонованим коефіцієнтом максимальної відмінності в кольорі, з подальшою інтерполяцією колірних компонент нетрасованих пікселів, що дозволяє скоротити час формування зображення необхідного дозволу до 16%. Запропоновано метод постобробки зображення, сформованого на основі зворотного трасування променів, який застосовує рядкову або блокову інтерполяцію, що дозволяє збільшити швидкість формування зображення. Проведено експертне оцінювання порогового значення інтенсивності кольору і коефіцієнта максимальної відмінності в кольорі, що дозволило підвищити якість сформованого зображення. Удосконалено архітектура комп'ютерної системи формування зображень на основі FPGA-трасувальника променів шляхом додавання пристрою рядкову чи блокової інтерполяції, що дозволяє підвищити продуктивність формування зображення. При апаратною реалізації запропонованого методу формування зображень прискорення, практично, пропорційного використовуваному кроку інтерполяції. При

трасуванні променів з кроком 2 пікселя, час формування зображення зменшується в 1,94 рази, а при «пропуску» 2-х пікселів час формування зображення зменшується в 2,8 рази. Розроблена програмна компонента, що реалізує запропонований метод формування зображень, і виконана її адаптація для кластера ДонНТУ NeClus. За допомогою створеної програмної компоненти досліджена залежність часу формування зображення від кроку інтерполяції, коефіцієнта максимальної відмінності в кольорі і числа паралельних потоків.

Ключові слова: коефіцієнт максимальної відмінності в кольорі; рядкова та блокова інтерполяція; метод формування зображень на основі зворотного трасування променів; метод постобробки зображення, сформованого на основі зворотного трасування променів; архітектура комп'ютерної системи формування зображень на основі FPGA-трасувальника променів; кластер NeClus; MIMD-архітектура.

## АННОТАЦІЯ

Мохаммад Юнис Яхья. Разработка программно-аппаратных решений повышения производительности компьютерных систем формирования трехмерных изображений. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.05 – Компьютерные системы и компоненты. – ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет», Красноармейск, 2016.

Диссертационная работа посвящена решению задачи повышения быстродействия и производительности компьютерных систем формирования изображений. В работе проведен анализ систем формирования изображений с использованием трассировки лучей.

Разработан метод формирования изображений на основе обратной трассировки лучей, заключающийся в трассировке пикселей с некоторым шагом, который определяется предложенным коэффициентом максимального различия в цвете, с последующей интерполяцией цветовых компонент нетрассируемых пикселей, что позволяет сократить время формирования изображения требуемого разрешения до 16%. Данный метод предусматривает применение сегментов или блоков переменной длины. Тестирование метода проводилось при помощи технологии Message Passing Interface for .NET.

Предложен метод постобробки изображения, сформированного на основе обратной трассировки лучей, который применяет строчную или блочную интерполяцию, что позволяет увеличить скорость формирования изображения. Данный метод не предусматривает применение сегментов или блоков переменной длины, а также не использует коэффициент максимального различия в цвете.

Проведено экспертное оценивание порогового значения интенсивности цвета и коэффициента максимального различия в цвете, что позволило повысить качество формируемого изображения.

Усовершенствована архитектура компьютерной системы формирования изображений на основе FPGA-трассировщика лучей путем добавления устройства строчной или блочной интерполяции, что позволяет повысить производительность формирования изображения. При аппаратурной реализации предложенного метода формирования изображений ускорение, практически, пропорционального используемому шагу интерполяции. При трассировании лучей с шагом 2 пикселя (то есть выполняя трассировку «через 1 пиксель»), время формирования изображения уменьшается в 1,94 раза, а при «пропуске» 2-х пикселей время формирования изображения уменьшается в 2,8 раза. Предложенное аппаратурное решение можно применять для увеличения разрешения изображений, получаемых промышленными устройствами.

Разработана программная компонента, реализующая предложенный метод формирования изображений, и выполнена ее адаптация для кластера ДонНТУ NeClus, который представляет собой параллельную вычислительную систему MIMD-архитектуры с распределенной памятью. Посредством созданной программной компоненты исследована зависимость времени формирования изображения от шага интерполяции, коэффициента максимального различия в цвете и числа параллельных потоков.

Ключевые слова: коэффициент максимального различия в цвете; строчная и блочная интерполяция; метод формирования изображений на основе обратной трассировки лучей; метод постобработки изображения, сформированного на основе обратной трассировки лучей; архитектура компьютерной системы формирования изображений на основе FPGA-трассировщика лучей; кластер NeClus; MIMD-архитектура.

## THE SUMMARY

Mohammad Yahya Yunis. Development of software and hardware solutions improve the performance of computer systems, the formation of three-dimensional images. – Manuscript.

Dissertation on the competition of graduate degree of candidate of engineering sciences on speciality, specialty 05.13.05 - Computer Systems and Components. – SU «Donetsk National Technical University», Krasnoarmeysk, 2016.

The thesis is devoted to solving the problem of increasing the speed and performance of computer imaging systems. The analysis of imaging systems with ray tracing.

A method for imaging based on the backward ray tracing, which consists in tracing pixels with a certain pitch, which is defined by the proposed maximum coefficient differences in color, followed by interpolating color components Untraced pixels, thereby reducing the time required imaging resolution of up to 16%. A method for post-processing the image formed on the basis of backward ray tracing, which uses lower case or block interpolation, which allows to increase the imaging speed. A expert evaluation of the color intensity of the threshold value and the maximum

coefficient differences in color, thus improving the quality of the generated image. Improved architecture of the computer imaging system based on FPGA-ray tracer device by adding a lowercase or block interpolation, which improves performance imaging. At the hardware implementation of the proposed method of imaging acceleration, virtually proportional to that used interpolation step. When tracing rays in increments of 2 pixels, the imaging time is reduced to 1.94 times, while "skipping" 2-pixel imaging time is reduced by 2.8 times. A software component that implements the proposed method of imaging, and made its adaptation for the cluster DonNTU NeClus. By created software components, the dependence of the time of formation of the image on the step interpolation factor the maximum difference in the color and the number of parallel threads.

Keywords: maximum coefficient differences in color; and lowercase block interpolation; the image forming method based on the ray tracing; post-processing method of image formed on the basis of backward ray tracing; architecture computer imaging system based on FPGA-ray tracer; NeClus cluster; MIMD-architecture.