

ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**ДУДНИК ОЛЕКСАНДР ОЛЕКСАНДРОВИЧ**

УДК 004.925.4

**ДИСЕРТАЦІЯ**  
**МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ПІДВИЩЕННЯ РЕАЛІСТИЧНОСТІ ТА**  
**ПРОДУКТИВНОСТІ ТЕКСТУРУВАННЯ У СИСТЕМАХ**  
**КОМП'ЮТЕРНОЇ ГРАФІКИ**

05.13.05 – Комп'ютерні системи та компоненти  
Технічні науки

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело  
\_\_\_\_\_ О. О. Дудник

Науковий керівник:  
доктор технічних наук, професор  
Романюк Олександр Никифорович

Вінниця - 2018

## АНОТАЦІЯ

*Дудник О. О.* Методи та засоби підвищення реалістичності та продуктивності текстуровання у системах комп'ютерної графіки. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.05 «Комп'ютерні системи та компоненти». – Вінницький національний технічний університет. – Вінниця, 2018.

У дисертаційній роботі розвинуто теорію кінцевої візуалізації тривимірних графічних об'єктів за рахунок розробки нових методів і моделей, що дозволило підвищити продуктивність формування зображень та їх реалістичність у системах комп'ютерної графіки при накладанні текстур, їх фільтрації та імітації нерівностей.

Проведено аналіз сучасних методів і засобів кінцевої візуалізації, зокрема, на етапі текстуровання. Показано, що найвищу реалістичність накладання текстур забезпечують методи перспективно-коректного текстурвання та анізотропної фільтрації текстур. Однак вони потребують високих обчислювальних затрат та не забезпечують прийняттого рівня реалістичності для ряду випадків. Обгрунтовано, що для підвищення реалістичності та продуктивності формування графічних зображень актуальною задачею є розробка нових методів, моделей і засобів текстуровання.

Запропоновано математичну модель проекції пікселя в текстурній площині, що враховує зміну форми пікселя в результаті перспективних перетворень. Оскільки при анізотропній фільтрації основу проекції пікселя на текстуру розглядають як витягнутий еліпс, запропоновано як модель проекції пікселя використовувати тіло обертання кривої Гаусса, масштабоване вздовж осей еліпса таким чином, щоб його основа відповідала формі еліпса. Запропонована модель використана як вагова функція при усередненні кольорів текселів під час виконання анізотропної фільтрації текстур, що дозволило підвищити реалістичність формування графічних зображень.

Запропоновано нові формули визначення об'єму відсікання тіла обертання кривої Гаусса при виконанні анізотропної фільтрації текстур із субтексельною точністю, що дало можливість підвищити реалістичність формування графічних зображень.

Запропоновано використання спеціальних текстурних карт для визначення вагових коефіцієнтів текселів при виконанні анізотропної фільтрації текстур. Вибірка попередньо розрахованих вагових коефіцієнтів із текстурної карти забезпечила підвищення продуктивності анізотропної фільтрації до 25%.

Запропоновано модифікацію методу Хекберта, в якому використано ітераційні формули для визначення координат текселів, що дозволило визначати текстурні координати піксела на основі текстурних координат попереднього піксела в рядку растеризації. Формули отримані шляхом скорочень та зміни етапів виконання дій. Доведено можливість виконання частини дій один раз на полігон, а частини – один раз на рядок растеризації. Використання нових формул дозволило підвищити продуктивність рендерингу тривимірних сцен на 26% за рахунок зменшення кількості арифметичних операцій при визначенні текстурних координат піксела.

Запропоновано нові формули для визначення параметрів рівняння еліпса при виконанні анізотропної фільтрації, що дозволило визначати значення параметрів рівняння на основі значень проміжних результатів обчислень для попереднього піксела в рядку растеризації. Це дозволило зменшити кількість арифметичних операцій та підвищити продуктивність на 18%.

Вперше запропоновано метод текстурування, особливість якого полягає у виконанні процедурних операцій в об'єктному просторі та подальшій фільтрації в площині екрана. Метод передбачає виконання растеризації полігонів у просторі з подальшим проєкціюванням фрагментів на площину екрана. На відміну від методів із растеризацією в площині екрана, при формуванні графічних зображень не передбачається виконання анізотропної фільтрації текстур і, як наслідок, дає можливість підвищити продуктивність рендерингу в середньому до 30%.

Встановлено причини появи похибок візуалізації при використанні технології *parallax mapping* у поєднанні з анізотропною фільтрацією текстур. Для усунення артефактів запропоновано комбінований метод виконання рельєфного текстуровання із використанням *parallax mapping* та анізотропної фільтрації. Метод враховує рельєфні особливості поверхні для вилучення з процесу анізотропної фільтрації операцій над тими текселями, які відповідають невидимим для спостерігача ділянкам поверхні моделі. Це дозволило усунути артефакти, притаманні для зображень, сформованих шляхом поєднання цих технологій.

Запропоновано модифікований метод *parallax mapping* з використанням карти відстаней до поверхні, що відрізняється від класичного використанням уточненої карти відстаней, яка враховує умови видимості текселів. Встановлено, що при текстурованні рельєфних поверхонь із різкими перепадами висот, видовий вектор, який проходить через конкретний тексель, що лежить над поверхнею та перетинає поверхню таким чином, що його частина на проміжку від текселя до поверхні рівна мінімальній відстані від цієї точки до поверхні, і, при цьому, не перетинає поверхню на проміжку від початку вектора до цього текселя може не існувати. Доведено, що доцільно зберігати у карті відстаней найменшу з можливих відстаней від точки до поверхні за умови, що такий вектор існує. Використання модифікованої карти відстаней до поверхні дозволяє підвищити продуктивність рельєфного текстуровання до 11%.

Розроблено програмну реалізацію запропонованих методів для комп'ютерних систем рендерингу реального часу з використанням графічних акселераторів на основі уніфікованої шейдерної архітектури. Розроблено: новий конвеєр рендерингу для реалізації методу текстуровання з використанням процедурних операцій в об'єктному просторі засобами обчислювальних шейдерів OpenGL; фрагментні шейдери, що реалізують запропоновані методи анізотропної фільтрації текстур та рель'єфного текстуровання для рендерингу зображень в реальному часі на GPU; програмне забезпечення для генерації карт

вагових коефіцієнтів та уточнених карт відстаней до поверхні. Проведено експериментальні дослідження та порівняльний аналіз отриманих результатів.

На основі запропонованих у роботі методів розроблено систему кінцевої візуалізації.

### **Наукова новизна отриманих результатів:**

1. Уперше запропоновано метод накладання текстур, особливість якого полягає у виконанні процедурних операцій в об'єктному просторі та фільтрації в площині екрана, що не потребує виконання анізотропної фільтрації текстур, і, як наслідок, дає можливість підвищити продуктивність формування графічних сцен до 30%.
2. Уперше запропоновано математичну модель проекції екранного пікселя в текстурний простір, яка враховує зміну форми пікселя при перспективному проектуванні для реалізації вагової функції при анізотропній фільтрації текстур, що дозволило підвищити точність визначення кольорів пікселів.
3. Уперше запропоновано комбінований метод виконання рельєфного текстурування з використанням технології *parallax mapping* та анізотропної фільтрації, що дозволяє підвищити реалістичність формування графічних сцен за рахунок урахування рельєфу поверхні при анізотропній фільтрації.
4. Запропоновано модифікацію методу Хекберта, у якому використано ітераційні формули для визначення координат текселів, що дозволило зменшити кількість операцій додавання та множення для визначення текстурних координат пікселя, і, як наслідок, підвищити продуктивність методу до 26%.
5. Подальшого розвитку отримав метод анізотропної фільтрації текстур, в якому при перспективно-коректному текстуруванні використано нові формули для прискореного обчислення параметрів рівняння еліпса, що дозволяє підвищити продуктивність анізотропної фільтрації текстур до 18% за рахунок зменшення кількості арифметичних операцій.
6. Подальшого розвитку отримав метод Донеллі, в якому, на відміну від існуючого, при формуванні карти відстаней до поверхні враховуються

умови видимості текселів, що дозволило зменшити кількість ітерацій трасування видового вектора та підвищити продуктивність методу до 11%.

**Практичне значення отриманих результатів** полягає в тому, що на основі отриманих в дисертації теоретичних положень запропоновано алгоритми та розроблено програмні засоби текстурування для комп'ютерних систем високореалістичної візуалізації тривимірних зображень.

Результати проведених досліджень впроваджено на таких підприємствах і організаціях: компанія «ДЦ Інжиніринг» для підвищення продуктивності роботи графічних станцій; ПМВП «Фотоніка Плюс» для підвищення продуктивності та реалістичності формування зображень у графічних системах; кафедра програмного забезпечення Вінницького національного технічного університету для використання у навчальному процесі.

**Ключові слова:** текстурування, накладання текстур, фільтрація текстур, перспективно-коректне текстурування, рельєфне текстурування, parallax mapping.

## ABSTRACT

*Dudnyk O. O.* Methods and tools of increasing the realism and productivity of texture mapping in computer graphics systems. – Qualification scientific paper as manuscript.

Thesis for PhD degree in technical sciences on the speciality 05.13.05 «Computer systems and components». – Vinnytsia National Technical University. – Vinnytsia, 2018.

In this dissertation work the author expanded the theory of rendering three-dimensional graphic objects by developing new methods and models, which allowed to improve the performance and realism of texture mapping, texture filtering and relief mapping in computer graphics systems.

The author analyzes modern methods and tools of rendering, in particular, at the stage of texture overlay. It is shown that the methods of perspective-correct texture mapping and anisotropic texture filtering provide the highest realism of texture mapping. However, they are computationally expensive and do not provide an acceptable level of realism in many cases. It is proved that to improve the realism and productivity of the formation of graphic images is an urgent task to develop new methods, models and tools of texturing.

The author proposed a mathematical model of the pixel projection in the texture plane, which takes into account the change in the shape of the pixel as a result of perspective transformations. Since in anisotropic filtering the basis of the pixel projection on the texture is considered as an elongated ellipse, it is proposed as a model of the pixel projection to use the body of rotation of the Gauss curve, scalable along the axes of the ellipse so that the base corresponds to the shape of the ellipse. The proposed model is used as a weight function for averaging texel colors during anisotropic texture filtering, which allowed to increase the realism of the formation of graphic images.

In the thesis the author proposes new formulas for determining the volume of cutoff of the body of rotation of the Gauss curve when performing anisotropic texture filtering with subtexel accuracy, which made it possible to increase the realism of the formation of graphic images.

The use of special texture maps to determine the weight coefficients of texels in the performance of anisotropic texture filtering is proposed. A sample of pre-calculated weights from the texture map increased the performance of anisotropic filtering by up to 25%.

The author proposes a modification of the Heckbert method, which uses iterative formulas to calculate the texel coordinates, which allowed to determine the texture coordinates of the pixel based on the texture coordinates of the previous pixel in the rasterization line. The formulas are obtained by reducing and changing the stages of operations. Proven ability to perform some operations once on the polygon, and the parts – once on the line rasterization. The use of new formulas allowed to increase the performance of rendering three-dimensional scenes by 26% by reducing the number of arithmetic operations in the calculation of texture coordinates of the pixel.

In this paper, the author proposed new formulas for calculating the parameters of the ellipse equation to perform anisotropic filtering, which allowed to calculate the values of the parameters of the equation based on the values of the intermediate results of the calculations for the previous pixel in the rasterization string. This allowed to reduce the number of arithmetic operations and increase productivity by 18%.

The author for the first time proposed a method of texturing, the feature of which is to perform procedural operations in the object space and further filtering in the screen plane. The method involves performing rasterization of polygons in space, followed by projecting the fragments on the screen plane. Unlike methods to be rasterized in the screen plane, the formation of graphic images not provided for the implementation of anisotropic filtering of texture and, as a consequence, provides an opportunity to improve the performance of rendering to an average of 30%.



The author found the reasons for the appearance of visualization errors when using parallax mapping technology in combination with anisotropic texture filtering. To eliminate artifacts, the author proposes a combined method of relief texturing using parallax mapping and anisotropic filtering. The method takes into account the relief features of the surface to exclude from the process of anisotropic filtering operations with those texels that correspond to the areas of the model surface invisible to the observer. This allowed to eliminate artifacts inherent in images formed by combining these technologies.

The author proposes a modified method parallax mapping using a distance map to the surface, which differs from the classical method in that it uses a refined distance map, which takes into account the visibility conditions of texels. The author found that when applying relief textures with sharp differences in height, the view vector that passes through a specific texel that lies above the surface and crosses the surface so that its part on the interval from Texel to the surface is the minimum distance from this point to the surface, and, at the same time, does not cross the surface on the interval from the beginning of the vector to this texel may not exist. It is proved that it is reasonable to keep the smallest possible distance from the point to the surface in the distance map, provided that such a vector exists. The use of a modified map of distances to the surface can improve the performance of relief texturing up to 11%.

The author has developed a software implementation of the proposed methods for computer real-time visualization systems using graphic accelerators based on a unified Shader architecture. The author has developed: a new render pipeline for the implementation of the texture mapping method using procedural operations in object space using OpenGL computing shaders; fragment shaders that implement the proposed methods of anisotropic texture filtering and relief texture mapping for real-time image rendering on the GPU; software for generation the map of the weighting factors and updated maps of the distances to the surface. Also, the author conducted experimental studies and comparative analysis of the results.

On the basis of the proposed methods, a system of rendering was developed.

**Scientific novelty of the results:**

1. For the first time for real-time computer graphics systems, a method of texture mapping, the feature of which is to perform procedural operations in the object space and filtering in the screen plane is proposed, which does not require anisotropic texture filtering, and as a result, it makes it possible to increase the performance of up to 30% .
2. For the first time, a mathematical model of projection of the screen pixel into the texture space, which takes into account the change in the pixel shape in the perspective design for the weight function in anisotropic texture filtering is proposed, which allowed to improve the accuracy of pixel color calculation.
3. For the first time, a combined method of relief texturing using parallax mapping and anisotropic filtering technology is proposed, which makes it possible to increase the realism of the formation of graphic scenes by taking into account the surface relief in anisotropic filtering.
4. A modification of the Heckbert method, which uses iterative formulas to determine the texel coordinates is proposed, which allows to reduce the number of addition and multiplication operations to determine the texture coordinates of the pixel, and, as a consequence, to increase the performance up to 26%.
5. The method of anisotropic texture filtering was further developed, in which new formulas were used for accelerated calculation of the ellipse equation with perspective-correct texture mapping, which allows to increase the performance of anisotropic texture filtering up to 18% by reducing the number of arithmetic operations.
6. The method for Donnelly was further developed, which, in contrast to the basic method, the formation of the map of distances to the surface are taken into account visibility conditions texels, which reduced the number of iterations of the trace species of the vector and increase productivity up to 11%.

**The practical significance of the results is that** on the basis of the thesis the theoretical provisions was proposed the algorithms and was developed the software tools for overlaying textures in computer systems highly realistic visualization of three-dimensional images.

The results of the research implemented in the following enterprises and organizations: LLC "DC Engineering" to improve the performance of graphic stations; PSPC "Photonica Plus" to improve the performance and realism of image formation in graphics systems; Software Department of Vinnitsa National technical University for use in the educational process.

***Key words:*** texturing, texture mapping, texture filtering, anisotropic filtering, perspective-correct texturing, relief texturing, parallax mapping.

**СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

- [1] О. Н. Романюк, І. В. Абрамчук, О. О. Дудник, та О. В. Мельник, "Модифікація гаусівської моделі пікселя для задач антиаліаязингу", *Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка* №1, с. 84-88, 2015.
- [2] О. Н. Романюк, та О. О. Дудник, "Підвищення реалістичності зафарбовування тривимірних графічних об'єктів", *Вісник ХНТУ* № 3, с. 269-272, 2016.
- [3] О. Н. Романюк, та О. О. Дудник, "Анізотропна фільтрація з використанням текстурних карт вагових коефіцієнтів", *Реєстрація, зберігання і обробка даних* № 3, с. 34-41, 2017.
- [4] С. О. Романюк, О. О. Дудник, Л. А. Савицька, та О. В. Романюк та ін., "Анізотропна фільтрація з використанням вагових функцій", *Вестник Херсонского национального технического университета* № 3, 2015, с. 459-462.
- [5] О. Н. Романюк, та О. О. Дудник, "Метод підвищення продуктивності перспективно-коректного текстуровання", *Наукові праці ДонНТУ* № 1 (22), с. 43-46, 2016.
- [6] О. Н. Романюк, та О. О. Дудник, "Анізотропна фільтрація текстур з використанням методів кешування", *Вісник Вінницького політехнічного інституту* № 6, с. 59-64, 2017.
- [7] О. Н. Романюк, та О. О. Дудник, "Підвищення продуктивності текстуровання з виконанням процедурних операцій в об'єктному просторі", *Наукові праці ДонНТУ. Серія "Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка"* № 2 (23), с. 45-51, 2016.
- [8] О. Н. Романюк, та О. О. Дудник, "Реалізація альтернативного конвеєра рендерингу на GPU з використанням обчислювальних шейдерів", *Наукові праці Донецького національного технічного університету Серія: "Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка"*, Покровськ, 2017.

- [9] О. Н. Романюк, та О. О. Дудник, "Особливості анізотропної фільтрації текстур при використанні технології parallax mapping", *Вісник Хмельницького національного університету* № 1, с. 245, 2017.
- [10] О. Н. Романюк, та О. О. Дудник, "Модифікований метод parallax mapping з використанням карти відстаней до поверхні", *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія* № 1, с. 78-82, 2017.
- [11] О. Н. Романюк, та О. О. Дудник, "Використання модифікованої MIP-піраміди для підвищення продуктивності parallax mapping", *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, №1, 112-116, 2018.
- [12] S. I. Vyatkin, S. A. Romanyuk, and O. O. Dudnyk, "Geometric modeling with scalar perturbation functions", *Measuring and computing equipment in technological processes*, № 4, pp. 45-50, 2014.
- [13] S. I. Vyatkin, A. N. Romanyuk, and O. O. Dudnyk, "Function-based gpu architecture", *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах* № 1, p. 139-144, 2015.
- [14] A. N. Romanyuk, and O. O. Dudnyk, "Ways to improve performance of anisotropic texture filtering", *Control and Communications (SIBCON), 2017 International Siberian Conference on. IEEE*, 2017, [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7998589/>
- [15] О. Н. Романюк, та О. О. Дудник, "Розробка методів текстурування для задач фотореалістичного рендерингу", *Матеріали сьомої міжнародної науково-технічної конференції "Моделювання і комп'ютерна графіка"*, 18-24 вересня 2017 р, с. 26-33.
- [16] О. Н. Романюк, та О. О. Дудник "Неортогональна растеризація при перспективнокоректному текстуруванні", *VI Международная конференция «Моделирование и компьютерная графика»*, м. Красноармійськ, 25-29 травня 2015 р., с. 174-178.
- [17] О. Н. Романюк, та О. О. Дудник, "Еволюція конвеєра рендерингу в відеокартах", *Збірник матеріалів міжнародної науково-практичної*

*Інтернет-конференції «Електронні інформаційні ресурси: створення, використання, доступ», 24-25 жовтня 2016 р., с. 440-448.*

- [18] О. О. Дудник, та О. Н. Романюк, "Аналіз методів фільтрації текстур" *Матеріали міжнародної науково-практичної Інтернет-конференції "Молодь в технічних науках: дослідження, проблеми, перспективи (МТН-2015), Вінниця, 16-17 квітня 2015 р., [Електронний ресурс]. Доступно: <http://conf.inmad.vntu.edu.ua/fm/index.php?page=materials&line=11&mat=115>*
- [19] Романюк О. Н, та О. О. Дудник, "Математичні моделі Піксела" *Збірник матеріалів Всеукраїнської науково-практичної конференції "Електронні інформаційні ресурси в освіті і науці: створення, використання, доступ", Вінниця, 2014, с. 3-8,.*
- [20] О. Н Романюк, О. О. Дудник, та С. В. Вяткін, "Шляхи підвищення продуктивності анізотропної фільтрації", *Матеріали міжнародної науково-практичної Інтернет-конференції "Молодь в технічних науках: дослідження, проблеми, перспективи (МТН-2016), 2016, [Електронний ресурс]. Доступно: <http://conf.inmad.vntu.edu.ua/fm/index.php?page=materials&line=20&mat=343>*
- [21] О. О. Дудник, "Аналіз методів рельєфного текстурування", *Електронні інформаційні ресурси: створення, використання, доступ: Збірник матеріалів Міжнародної науково-практичної Інтернет- конференції., Вінниця, 2017, с. 230-236.*
- [22] О. Н. Романюк, та О. О. Дудник, "Анізотропна фільтрація з використанням вагової функції на основі Гаусівської моделі пікселя", *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах № 2: 117-121, 2016.*
- [23] О. Н. Романюк, та О. О. Дудник, "Підвищення продуктивності перспективно-коректного текстурування з використанням анізотропної фільтрації", *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах № 3, с. 192-195, 2016.*

- [24] О. Н. Романюк, та О. О. Дудник, "Модифікація білінійного текстуровання з використанням кругової моделі пікселя", *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах* № 1, с. 243-245, 2016.
- [25] С. И. Вяткин, А. Н. Романюк, и А. А. Дудник, "Анизотропная фильтрация текстуры в реальном времени", *Измерительная и вычислительная техника в технологических процессах* № 4, с. 217-221, 2015.
- [26] О. Н. Романюк, та О. О. Дудник, Комп'ютерна програма "Визначення кольору пікселя з використанням кругової моделі", Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №66660, К.: Державна служба інтелектуальної власності України, 15.07.16
- [27] О. Н. Романюк, та О. О. Дудник, Комп'ютерна програма "Обчислення об'єму перетину пікселя", Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №61823, К.: Державна служба інтелектуальної власності України, 25.09.15
- [28] О. Н. Романюк, та О. О. Дудник, Комп'ютерна програма "Система експертного оцінювання сформованого зображення по відношенню до еталону", Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №66659, К.: Державна служба інтелектуальної власності України, 15.07.16
- [29] О. Н. Романюк, О. О. Дудник, та Б. Л. Войт Комп'ютерна програма "Рендеринг тривимірних зображень із використанням процедурних операцій в об'єктному просторі", Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №71796, К.: Державна служба інтелектуальної власності України, 05.05.17
- [30] О. О. Дудник, Комп'ютерна програма "Генерація вагових текстурних карт", Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №78246, К.: Міністерство економічного розвитку і торгівлі України, 12.04.18
- [31] О. О. Дудник, Комп'ютерна програма "Анизотропна фільтрація текстур з використанням вагової функції на основі гаусівської моделі пікселя", Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №78247, К.: Міністерство економічного розвитку і торгівлі України, 12.04.18

- [32] О. О. Дудник, Комп'ютерна програма “*Анізотропна фільтрація текстур з використанням вагових текстурних карт*”, Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №78249, К.: Міністерство економічного розвитку і торгівлі України, 12.04.18
- [33] О. О. Дудник, Комп'ютерна програма “*Генерація текстурних карт відстаней до поверхні на основі карт висот з урахуванням видимості точок поверхні*”, Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №78248, К.: Міністерство економічного розвитку і торгівлі України, 12.04.18



## ЗМІСТ

ВСТУП.....	20
1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ НАКЛАДАННЯ ТЕКСТУР. <b>Error! Bookmark not defined.</b>	
1.1 Основні етапи графічного конвеєру .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
1.2 Аналіз методів накладання текстур.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
1.3 Аналіз методів рельєфного текстурювання .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
1.4. Основні критерії продуктивності та реалістичності систем кінцевої візуалізації .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Висновки.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
2 МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ РЕАЛІСТИЧНОСТІ НАКЛАДАННЯ ТЕКСТУР .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
2.1 Математична модель проєкції пікселя для задач анізотропної фільтрації .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
2.2 Математична модель пікселя для задач субтексельної анізотропної фільтрації текстур.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
2.3 Метод підвищення реалістичності зафарбовування при просторово-варіативному розміщенні полігонів .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Висновки.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
3 МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ НАКЛАДАННЯ ТЕКСТУР .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
3.1 Метод підвищення продуктивності визначення вагових коефіцієнтів для задач анізотропної фільтрації .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
3.2 Метод підвищення продуктивності перспективно-коректного текстурювання .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
3.3 Метод підвищення продуктивності анізотропної фільтрації ри перспективно-коректному текстурюванні.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>

3.4	Метод підвищення продуктивності текстуровання з виконанням процедурних операцій в об'єктному просторі.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
	Висновки.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
4	МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ РЕАЛІСТИЧНОСТІ ТА ПРОДУКТИВНОСТІ РЕЛЬЄФНОГО ТЕКСТУРУВАННЯ.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
4.1	Комбінований метод виконання анізотропної фільтрації текстур при використанні технології parallax mapping.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
4.2	Модифікований метод parallax mapping з використанням карти відстаней до поверхні .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
4.3	Метод підвищення продуктивності parallax mapping з використанням модифікованої MIP-піраміди.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
	Висновки.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
5	РОЗРОБКА ПРОГРАМНИХ КОМПОНЕНТІВ КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ НА ОСНОВІ ЗАПРОПОНОВАНИХ МЕТОДІВ ....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
5.1	Шейдерна реалізація методу текстуровання з виконанням процедурних операцій в об'єктному просторі .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
5.2	Програмна реалізація методів фільтрації текстур та рельєфного текстуровання.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
5.3	Анізотропна фільтрація текстур з використанням методів кешування... <b>Error!</b>	<b>Bookmark not defined.</b>
5.4	Побудова системи рендерингу.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
	Висновки.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
	ВИСНОВКИ .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	27
	ДОДАТКИ .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>

Додаток А. Результати аналізу продуктивності анізотропної фільтрації з використанням вагових функцій ..... **Error! Bookmark not defined.**

Додаток Б. Результати аналізу продуктивності модифікації методу Хекберта для перспективно-коректного текстуровання ..... **Error! Bookmark not defined.**

Додаток В. Результати аналізу продуктивності анізотропної фільтрації з прискореним визначенням параметрів рівняння еліпса **Error! Bookmark not defined.**

Додаток Г. Результати аналізу продуктивності методу текстуровання з виконанням процедурних операцій в об'єктному просторі **Error! Bookmark not defined.**

Додаток Д. Лістинг вихідного коду програмної реалізації методу текстуровання з виконанням процедурних операцій в об'єктному просторі **Error! Bookmark not defined.**

Додаток Е. Лістинг вихідного коду фрагментного шейдера для виконання анізотропної фільтрації текстур з визначенням вагових коефіцієнтів в реальному часі..... **Error! Bookmark not defined.**

Додаток Ж. Лістинг вихідного коду фрагментного шейдера для виконання анізотропної фільтрації текстур з визначенням вагових з використанням вагових текстурних карт ..... **Error! Bookmark not defined.**

Додаток З. Лістинг вихідного коду комп'ютерної програми для генерації текстурних карт вагових коефіцієнтів..... **Error! Bookmark not defined.**

Додаток К. Лістинг вихідного коду програми для генерації тривимірної карти відстаней до поверхні..... **Error! Bookmark not defined.**

Додаток Л. Лістинг вихідного коду фрагментного шейдера для виконання рельєфного текстуровання ..... **Error! Bookmark not defined.**

Додаток М. Список публікацій за темою дисертації **Error! Bookmark not defined.**

Додаток Н. Акти впровадження результатів досліджень **Error! Bookmark not defined.**

## ВСТУП

**Обґрунтування вибору теми дослідження.** Сучасний етап розвитку комп'ютерних систем характеризується широким використанням комп'ютерної візуалізації, яка є ефективним засобом підтримки двостороннього каналу взаємодії між комп'ютером і користувачем. Найвищу реалістичність візуального відтворення об'єктів і процесів реального світу забезпечує тривимірною комп'ютерна графіка [1], [2]. Оскільки рівень продуктивності графічних засобів забезпечує можливість високореалістичного відтворення тривимірних об'єктів, то вимоги до рівня складності моделей та точності відображення високодеталізованих поверхонь постійно зростають [3]. Розвиток портативних обчислювальних пристроїв ставить нові вимоги до рівня обчислювальної складності алгоритмів побудови графічних зображень та використання апаратних можливостей, оскільки це питання тісно пов'язане з енергоефективністю та часом автономної роботи приладів [4].

У комп'ютерних системах високу ефективність візуалізації забезпечують методи та засоби, що дають змогу оптимально використовувати обчислювальні ресурси графічної системи для забезпечення високого рівня реалістичності відтворення графічних зображень [5]. Одним із таких засобів є текстурування, яке дозволяє врахувати локальні особливості поверхні без надмірного ускладнення геометрії моделі [6-8]. Процедури накладання текстур успішно застосовують для відтворення на поверхні об'єктів кольорів, фактури, нерівностей, імітації відбиття світла та інших візуальних властивостей.

Сьогодні часто застосовують процедурне текстурування, яке має обмежені галузі застосування, оскільки не забезпечує можливості відтворення локальних особливостей поверхні довільної форми та розмірів [9]. Альтернативними є методи, які передбачають накладання на поверхню об'єктів попередньо сформованих фрагментів зображень [10].

Текстурування є одним із найскладніших етапів процесу кінцевої візуалізації, оскільки для кожної точки поверхні визначаються координати в дискретному просторі та значення інтенсивності кольору з урахуванням

освітлення. Сучасні методи текстурування для визначення кольору пікселя враховують значення не одного, а відразу кількох текселів, що значно впливає на час формування графічних сцен і обмежує можливості реалізації динамічного та інтерактивного режимів [10].

Для забезпечення високої реалістичності формування графічних сцен використовують не тільки кольорові текстурні карти, а і допоміжні карти, наприклад, карти висот, нормалей, відстаней і т.д., що дозволяє реалістично відтворити рельєфні особливості поверхонь [5-9]. Це суттєво ускладнює обчислювальний процес і призводить до зниження продуктивності візуалізації.

Таким чином, існуючі методи високоточного накладання текстур характеризуються суттєвою обчислювальною складністю, що в значній мірі впливає на час формування графічних зображень. Тому актуальними є питання підвищення продуктивності методів і засобів текстурування.

Точність визначення кольорів пікселів на етапі текстурування має найбільший вплив на реалістичність вихідного зображення, підвищення якої передбачає розробку нових методів і засобів накладання текстур [1-3], [5], [7], [8].

Для існуючих методів накладання текстур характерні візуальні артефакти, пов'язані з неточностями під час зіставлення дискретних просторів текстури та екрана [7], [8], [10].

Підвищення реалістичності формування зображень можна досягти при врахуванні положення спостерігача, що дасть можливість точнішого відтворення перспективи сцени [8], [10], тому важливими є питання розробки відповідних методів текстурування.

При формуванні графічних сцен реалізують незалежно окремі процедури текстурування, такі як визначення текстурних координат, фільтрація текстур, визначення інтенсивності кольорів, накладання рельєфу тощо [3], [7]. Поєднання цих процедур нерідко призводить до появи небажаних візуальних ефектів, оскільки при реалізації одних процедур не враховують особливостей інших, або до зниження продуктивності, оскільки має місце дублювання обчислень. Тому важливими є питання розробки комбінованих методів накладання текстур.

Формування високореалістичних графічних зображень у реальному часі та в інтерактивному режимі висуває жорсткі вимоги до продуктивності текстурування. При цьому використання простих методів накладання текстур неприйнятне для формування реалістичних зображень [6], [7], [8].

Тому актуальними є питання підвищення продуктивності та реалістичності формування графічних сцен, оскільки існуючі методи текстурування не задовольняють потреби багатьох галузей застосування тривимірної комп'ютерної графіки. Це передбачає розробку нових методів і засобів текстурування.

**Мета та завдання дослідження.** Метою роботи є підвищення продуктивності текстурування за рахунок зменшення складності обчислень, а також реалістичності за рахунок точнішого визначення кольорів пікселів.

Основними задачами дослідження є:

- провести аналіз існуючих методів і засобів накладання текстур для визначення напрямків підвищення їх продуктивності та реалістичності;
- запропонувати нові:
  - методи підвищення продуктивності перспективно-коректного текстурування;
  - методи підвищення реалістичності та продуктивності анізотропної фільтрації текстур і рельєфного текстурування;
- розробити програмні компоненти та систему візуалізації на основі запропонованих методів;
- провести експериментальні дослідження розроблених засобів текстурування.

**Об'єкт дослідження** – процес кінцевої візуалізації тривимірних об'єктів у системах комп'ютерної графіки.

**Предмет дослідження** – методи та засоби текстурування тривимірних графічних об'єктів.

**Методи дослідження.** У процесі досліджень використовувались: теорія чисел та чисельних методів, теорія диференціально-інтегрального числення, лінійна алгебра, методи аналітичної геометрії для розробки моделей та методів

текстурування тривимірних об'єктів; комп'ютерне моделювання для аналізу та перевірки отриманих теоретичних положень.

### **Наукова новизна отриманих результатів.**

1. Уперше запропоновано метод текстурування, особливість якого полягає у виконанні процедурних операцій в об'єктному просторі та фільтрації в площині екрана, що не потребує виконання анізотропної фільтрації текстур, і як наслідок, дає можливість підвищити продуктивність до 30%.
2. Вперше запропоновано на основі гаусівської моделі математичну модель проекції екранного пікселя в текстурний простір, яка враховує зміну форми пікселя при перспективному проектуванні для вагової функції при анізотропній фільтрації текстур, що дозволило підвищити точність визначення кольорів пікселів.
3. Вперше запропоновано комбінований метод виконання рельєфного текстурування із використанням технології *parallax mapping* та анізотропної фільтрації, що дозволяє підвищити реалістичність формування графічних сцен за рахунок врахування рельєфу поверхні при анізотропній фільтрації.
4. Подальшого розвитку отримав метод Хекберта, у якому, на відміну від існуючих, використано ітераційні формули для визначення координат текстур, що дозволило зменшити кількість операцій додавання та множення для визначення текстурних координат пікселя, і, як наслідок, підвищити продуктивність до 26%.
5. Подальшого розвитку отримав метод анізотропної фільтрації текстур, в якому при перспективно-коректному текстуруванні використано нові формули для прискореного обчислення параметрів рівняння еліпса, що дозволяє підвищити продуктивність анізотропної фільтрації текстур до 18% за рахунок зменшення кількості арифметичних операцій.
6. Подальшого розвитку отримав метод Донеллі, в якому, на відміну від базового, при формуванні карти відстаней до поверхні враховуються умови видимості текстур, що дозволило зменшити кількість ітерацій трасування видового вектора та підвищити продуктивність до 11%.



**Практична цінність отриманих результатів.** Практична цінність одержаних результатів полягає в тому, що на основі отриманих в дисертації теоретичних положень запропоновано алгоритми та розроблено програмні засоби текстурзування для комп'ютерних систем високореалістичної візуалізації тривимірних зображень.

**Впровадження.** Впровадження результатів досліджень підтверджуються відповідними актами та використовуються на таких підприємствах і організаціях:

- компанія «ДЦ Інжиніринг» для підвищення продуктивності роботи графічних станцій;
- ПМВП «Фотоніка Плюс» для підвищення продуктивності та реалістичності формування зображень у графічних системах;
- кафедра програмного забезпечення Вінницького національного технічного університету для використання у навчальному процесі при викладанні курсів «Комп'ютерна графіка», «Мультимедійні системи та комп'ютерний відеодизайн», «Проектування ігрових застосувань та 3-D моделювання» у студентів спеціальності 121 – «Інженерія програмного забезпечення»

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дослідження виконувалися при реалізації НДР «Система авоматизованої багатофункціональної лазерної поляритмії плівок плазми крові людини для діагностики патологічних змін молочних залоз» (номер державної реєстрації 0116U004709).

**Особистий внесок здобувача.** Усі наукові результати, викладені у дисертаційній роботі, отримані автором особисто. У друкованих працях, опублікованих у співавторстві, автору належать такі результати: вагова функція на основі гаусівської моделі пікселя [11]; формули для обчислення об'єму відсікання пікселя [12]; аналіз методів фотореалістичного текстурзування [13]; метод підвищення реалістичності зафарбовування при просторово-варіативному розміщенні полігонів [14]; метод анізотропної фільтрації текстур із

використанням спеціальних текстурних карт для визначення вагових коефіцієнтів текселів [15]; метод анізотропної фільтрації з використанням вагових функцій [16]; ітераційні формули для визначення текстурних координат на основі методу Хекберта [17]; метод підвищення продуктивності анізотропної фільтрації [18]; метод підвищення продуктивності перспективно-коректного текстурування при використанні анізотропної фільтрації [19]; методи анізотропної фільтрації з використанням кешування [20]; метод текстурування з виконанням процедурних операцій в об'єктному просторі [21]; реалізація конвеєра рендерингу засобами обчислювальних шейдерів [22]; метод виконання анізотропної фільтрації текстур у поєднанні з технологією parallax mapping [23]; модифікований метод parallax mapping з використанням карти відстаней до поверхні [24]; метод підвищення продуктивності parallax mapping з використанням спеціальної MIP-піраміди [25]; аналіз архітектур графічних акселераторів [26]; аналіз особливостей побудови графічних акселераторів [27]; аналіз методів фільтрації текстур [28]; метод білінійної фільтрації з використанням кругової моделі піксела [29]; огляд математичних моделей піксела [30]; аналіз методу анізотропної фільтрації в реальному часі [31]; аналіз методів анізотропної фільтрації текстур [32]; аналіз методів підвищення продуктивності анізотропної фільтрації [33]; комп'ютерна програма для виконання білінійної фільтрації з використанням кругової моделі піксела [34]; комп'ютерна програма для обчислення об'єму відсікання піксела [35]; комп'ютерна програма для проведення експертного оцінювання реалістичності зображень [36]; комп'ютерна програма для рендерингу зображень з виконанням процедурних операцій в об'єктному просторі [37], огляд методу перспективно-коректного текстурування [38], огляд методу моделювання поверхонь на основі функцій збурення [39].

**Апробація матеріалів дисертації.** Основні положення дисертації доповідалися та обговорювалися на міжнародних та всеукраїнських конференціях: Міжнародна науково-практична конференція «Електронні інформаційні ресурси: створення, використання, доступ» (Вінниця, 2014, 2017),

VI міжнародна науково-технічна конференція «Моделювання та комп'ютерна графіка» (Красноармійськ, 2015), Міжнародна науково-практична Інтернет-конференція «Молодь в технічних науках: дослідження, проблеми, перспективи» МТН-2015, МТН-2016 (Вінниця, 2015, 2016), Науково-технічна конференція «Інформатика, математика, автоматика» ІМА-2016 (Суми, 2016), XVI, XVII міжнародні конференції по математичному моделюванню МКММ\_2015, МКММ\_2016 (Херсон, 2015, 2016), Міжнародна конференція з управління та зв'язку IEEE SIBCON-2017 (Астана, 2017), на пленарному засіданні VII міжнародної науково-технічної конференції «Моделювання та комп'ютерна графіка» (Покровськ, 2017).

**Публікації.** Основні результати досліджень опубліковано в 33 наукових працях, у тому числі 13 статей у фахових виданнях України, 12 – у виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз (з них 1 у базі Scopus та IEEE Xplore), 8 – у матеріалах конференцій, 8 авторських свідоцтв про реєстрацію авторського права на комп'ютерну програму.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку літератури, що містить 138 найменувань, 12 додатків. Робота містить 73 ілюстрації, 3 таблиці. Загальний обсяг роботи складає 202 сторінки, основний зміст викладено на 127 сторінках друкованого тексту.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] Е. Петровичев *Компьютерная графика*. Litres, 2017.
- [2] Д. В. Щегрикович *Компьютерная графика*. № УД-1709/уч. 2016.
- [3] N. Tatarchuk, “Evolution of Programmable Models for Graphics Engines”, *High Performance Graphics*, 2017.
- [4] C. Pang, A. Hindle, B. Adams, and A. E. Hassan, “What Do Programmers Know about Software Energy Consumption?” *IEEE Software*, vol. 33, no. 3, pp. 83–89, 2016.
- [5] І. В. Ільїна, та О. В. Біжко, “Аналіз особливостей візуалізації тривимірних об'єктів”, *Системи управління, навігації та зв'язку*, вип. 2, с. 88-92, 2016.
- [6] E. Agu, “Lecture 2: Advanced Computer Graphics Part 2: Texturing”, *Computer Graphics (CS 563)*, 2016
- [7] Д. Вольф, *OpenGL 4. Язык шейдеров. Книга рецептов*. ДМК Пресс, 368с., 2015.
- [8] J. Mcdonald and B. Burley, “Per-face texture mapping for real-time rendering”, *ACM SIGGRAPH 2011 Studio Talks on - SIGGRAPH 11*, 2011.
- [9] S. Gustavson, “Procedural Textures in GLSL,” *OpenGL Insights*, pp. 105–120, 2012.
- [10] И. М. Лебедева, “О некоторых проблемах текстурирования изображений”, *Вестник МГСУ*, с. 4-5, 2010.
- [11] О. Н. Романюк, І. В. Абрамчук, та О. О. Дудник, “Анізотропна фільтрація з використанням вагової функції на основі Гаусівської моделі”, *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*, № 2, с. 117-121, 2016.

- [12] О. Н. Романюк, І. В. Абрамчук, О. О. Дудник, та О. В. Мельник, “Модифікація гаусівської моделі пікселя для задач антиаліазингу”, *Наукові праці ДонНТУ. Серія "Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка"*, № 1(20), с. 84-88, 2015.
- [13] О. Н. Романюк, та О. О. Дудник, “Розробка методів текстуровання для задач фотореалістичного рендерингу”, *Матеріали сьомої міжнародної науково-технічної конференції "Моделювання і комп'ютерна графіка"*, 18-24 вересня 2017 р, с. 26-33, 2017.
- [14] О. Н. Романюк, та О. О. Дудник, “Підвищення реалістичності зафарбовування тривимірних графічних об'єктів”, *Вісник ХНТУ*, № 3 (58), с. 269-272, 2016.
- [15] О. Н. Романюк, та О. О. Дудник, “Анізотропна фільтрація з використанням текстурних карт вагових коефіцієнтів”, *Реєстрація, зберігання і обробка даних*, № 3, с. 34-41, 2017.
- [16] С. О. Романюк, О. О. Дудник, Л. А. Савицька, та О. В. Романюк, “Анізотропна фільтрація з використанням вагових функцій”, *Вісник Херсонського національного технічного університету*, № 3, с. 459-46, 2015
- [17] О. Н. Романюк, та О. О. Дудник, “Метод підвищення продуктивності перспективно-коректного текстуровання”, *Наукові праці ДонНТУ. Серія "Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка"*, № 1 (22), с. 43-46, 2016.
- [18] A. N. Romanyuk, and O. O. Dudnyk, "Ways to improve performance of anisotropic texture filtering", *Control and Communications (SIBCON), 2017 International Siberian Conference on. IEEE*, 2017, [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7998589/>
- [19] О. Н. Романюк та О. О. Дудник, “Підвищення продуктивності перспективно-коректного текстуровання з використанням анізотропної

фільтрації”, *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*, 2016, № 3, с. 192-195.

- [20] О. Н. Романюк та О. О. Дудник, “Анізотропна фільтрація текстур з використанням методів кешування”, *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, 2016, № 6, с. 59-64.
- [21] О. Н. Романюк, та О. О. Дудник, “Підвищення продуктивності текстурування з виконанням процедурних операцій в об’єктному просторі”, *Наукові праці ДонНТУ. Серія “Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка”*, 2016, № 2 (23), с. 45-51.
- [22] О. Н. Романюк, О. О. Дудник, та Н. С. Костюкова “Реалізація альтернативного конвеєра рендерингу на GPU з використанням обчислювальних шейдерів”, *Наукові праці Донецького національного технічного університету Серія: “Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка”*, Покровськ, 2017.
- [23] О. Н. Романюк, та О. О. Дудник, “Особливості анізотропної фільтрації текстур при використанні технології parallax mapping”, *Вісник Хмельницького національного університету. Серія “Технічні науки”*, 2017, № 1(245), с. 236-245.
- [24] О. Н. Романюк, О. О. Дудник, та О. В. Романюк, “Модифікований метод parallax mapping з використанням карти відстаней до поверхні”, *Інформаційні технології та комп’ютерна інженерія*, 2017, № 1, с. 78-82.
- [25] О. Н. Романюк, та О. О. Дудник, “Використання модифікованої мір-піраміди для підвищення продуктивності parallax mapping”, *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, №1, с. 112-116, 2018.
- [26] О. Н. Романюк, та О. О. Дудник, “Еволюція конвеєра рендерингу в відеокартах”, *Збірник матеріалів міжнародної науково-практичної*

*Интернет-конференції «Електронні інформаційні ресурси: створення, використання, доступ», 24-25 жовтня 2016 р. с. 440-448, 2016.*

- [27] S. I. Vyatkin, S. A. Romanyuk, S. V. Pavlov and O. O. Dudnyk, “Function-based gpu architecture”, *Measuring and computing equipment in technological processes*, 2015, № 1, pp. 139-144.
- [28] О. О. Дудник, О. Н. та Романюк, “Аналіз методів фільтрації текстур” *Матеріали міжнародної науково-практичної Інтернет-конференції "Молодь в технічних науках: дослідження, проблеми, перспективи (МТН-2015). Вінниця, 2015, [Електронний ресурс]. Доступно: <http://conf.inmad.vntu.edu.ua/fm/index.php?page=materials&line=11&mat=115>.*
- [29] О. Н. Романюк, та О. О. Дудник “Модифікація білінійного текстуровання з використанням кругової моделі пікселя” *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*, 2016, № 1, с. 243-245.
- [30] О. Н. Романюк, та О. О. Дудник, “Математичні моделі Пікселя”, *Збірник матеріалів Всеукраїнської науково-практичної конференції "Електронні інформаційні ресурси в освіті і науці: створення, використання, доступ", грудень 2014 р., Вінниця, 2014, с. 3-8.*
- [31] С. И. Вяткин, А. Н. Романюк, и А. А. Дудник, “Анизотропная фильтрация текстуры в реальном времени”, *Измерительная и вычислительная техника в технологических процессах*, 2015, № 4, с. 217-221.
- [32] О. Н. Романюк, О. О. Дудник, “Аналіз методів анізотропної фільтрації текстур”, *Збірник матеріалів Всеукраїнської науково-практичної конференції "Електронні інформаційні ресурси в освіті і науці: створення, використання, доступ", грудень 2014 р., Вінниця, 2014., с. 3-8.*
- [33] О. Н. Романюк, О. О. Дудник, та С. В. Вяткін, “Шляхи підвищення продуктивності анізотропної фільтрації”, *Матеріали міжнародної науково-практичної Інтернет-конференції "Молодь в технічних науках: дослідження,*

*проблеми, перспективи (МТН-2016),* Вінниця, 2016.  
[Електронний ресурс]. Доступно: <http://conf.inmad.vntu.edu.ua/fm/index.php?page=materials&line=20&mat=343>

- [34] О. Н. Романюк, та О. О. Дудник, Комп'ютерна програма “*Визначення кольору пікселя з використанням кругової моделі*”, Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №66660, К.: Державна служба інтелектуальної власності України, 15.07.16.
- [35] О. Н. Романюк, та О. О. Дудник, Комп'ютерна програма “*Обчислення об'єму перетину пікселя*”, Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №61823, К.: Державна служба інтелектуальної власності України, 25.09.15.
- [36] О. Н. Романюк, та О. О. Дудник, Комп'ютерна програма “*Система експертного оцінювання сформованого зображення по відношенню до еталону*”, Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №66659, К.: Державна служба інтелектуальної власності України, 15.07.16.
- [37] О. Н. Романюк, О. О. Дудник, та Б. Л. Войт Комп'ютерна програма “*Рендеринг тривимірних зображень із використанням процедурних операцій в об'єктному просторі*”, Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №71796, К.: Державна служба інтелектуальної власності України, 05.05.17.
- [38] О. Н. Романюк, О. О. Дудник, та О. В. Мельник, “*Неортогональна растеризація при перспективнокоректному текстуванні*” VI *Международная конференция «Моделирование и компьютерная графика»*, Красноармійськ, 25-29 травня 2015 р, с. 174-178.
- [39] S. I. Vyatkin, S. A. Romanyuk, and O. O. Dudnyk, “*Geometric modeling with scalar perturbation functions*”, *Measuring and computing equipment in technological processes*, 2014, № 4, pp. 45-50.



- [40] О. О. Дудник, “Аналіз методів рельєфного текстуровання”, *Електронні інформаційні ресурси: створення, використання, доступ: Збірник матеріалів Міжнародної науково-практичної Інтернет- конференції.*, Вінниця, 2017.
- [41] О. О. Дудник, Комп'ютерна програма “Генерація вагових текстурних карт”, Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №78246, К.: Міністерство економічного розвитку і торгівлі України, 12.04.18
- [42] О. О. Дудник, Комп'ютерна програма “Анізотропна фільтрація текстур з використанням вагової функції на основі гаусівської моделі пікселя”, Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №78247, К.: Міністерство економічного розвитку і торгівлі України, 12.04.18
- [43] О. О. Дудник, Комп'ютерна програма “Анізотропна фільтрація текстур з використанням вагових текстурних карт”, Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №78249, К.: Міністерство економічного розвитку і торгівлі України, 12.04.18
- [44] О. О. Дудник, Комп'ютерна програма “Генерація текстурних карт відстаней до поверхні на основі карт висот з урахуванням видимості точок поверхні”, Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №78248, К.: Міністерство економічного розвитку і торгівлі України, 12.04.18
- [45] В. G. Blundell, “An Introduction to Computer Graphics and Creative 3-D Environments”, *Springer – Verlag London Limited*, 2008.
- [46] Дж. Фоли, и А. Вэн Дэм, *Основы интерактивной машинной графики*, М.: Мир, 1995, 368 с.
- [47] А. Игнатенко, “Методы представления дискретных трехмерных данных”, *Компьютерная графика и мультимедиа.*, №1(1), 2003, [Online]. Available: <http://cgm.computergraphics.ru/content/view/22>
- [48] Ágnez-Roland, Norbert Zsolt Zentai-Gergely, and Takács-Sándor Kaczur. "Hardware accelerated 3D/2D rendering." *Journal of Applied Multimedia* 1, VIII, 2013.

- [49] H. Bao and W. Hua, “Architecture of Real-Time Rendering Engine”, *Advanced Topics in Science and Technology in China Real-Time Graphics Rendering Engine*, pp. 21–192, 2011.
- [50] Д. И. Мазовка, “Формальный подход к решению задачи визуализации”, *Международный конгресс по информатике: информационные системы и технологии: материалы международного научного конгресса 31 окт. – 3 нояб. 2011 г. : в 2 ч. Ч. 2.*, Минск, БГУ, 2011, с. 198-203.
- [51] C. Doppioslash, “The Graphics Pipeline”, *Physically Based Shader Development for Unity 2017*, pp. 33–42, Jul. 2017. LAAKSONEN, Jarno, et al. OpenGL rendering pipeline. 2017.
- [52] S. Laine and T. Karras, “High-performance software rasterization on GPUs” *Proceedings of the ACM SIGGRAPH Symposium on High Performance Graphics - HPG 11*, 2011.
- [53] А. В. Боресков, и А. А. Харламов, “Архитектура и программирование массивно – параллельных вычислительных систем”, *НОЦ “Параллельные вычисления”*. [Электронный ресурс]. Доступно: [http://nvidia.esyr.org/files/presentations/0829\\_Architecture.pdf](http://nvidia.esyr.org/files/presentations/0829_Architecture.pdf)
- [54] К. В. Снопов, та О. Н. Романюк, “Використання графічних конвеєрів для візуалізації тривимірних моделей”, *Матеріали міжнародної науково-практичної Інтернет-конференції "Молодь в технічних науках: дослідження, проблеми, перспективи (МТН-2015)*, Вінниця, 16-17 квітня 2015 р.
- [55] О. Н. Романюк, М. Д. Обідник, О. В. Романюк, та Н. С. Костюкова, “Особенности архитектурной побудови систем формування тривимірних зображень” *Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія "Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка"*, 2010, № 12(165), с. 87-93.

- [56] C. Mcclanahan, “History and evolution of gpu architecture”, *A Survey Paper*, 2010, p. 9.
- [57] А. В. Орещенко, “Апаратне забезпечення для тривимірної графіки: причини становлення і занепаду фірм-виробників”, *Часопис картографії*, 2013, с. 241-269.
- [58] M. Bailey, and S. Cunningham, *Graphics shaders: theory and practice*. CRC Press, 2016.
- [59] Ф. Хилл, *OpenGL. Программирование компьютерной графики. Для профессионалов*. СПб.: Питер, 2002, 1088с.
- [60] P. S. Heckbert, “Survey of Texture Mapping”, *IEEE Computer Graphics and Applications*, vol. 6, no. 11, pp. 56–67, 1986.
- [61] А.Ю. Поляков, и В.А. Брусенцов, *Методы и алгоритмы компьютерной графики*. СПб.: БХВ – Петербург, 2003, 560 с.
- [62] T. P. Kersten, and D. Stallmann, “Automatic Texture Mapping Of Architectural And Archaeological 3D Models,” *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XXXIX-B5, pp. 273–278, 2012.
- [63] С. И. Вяткин, С. А. Романюк, и С. О. Крищук, “Метод вычисления текстурных координат для отображения текстуры на плоские полигоны” *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*, 2012, № 1, с. 144-148.
- [64] Д. Роджерс, *Алгоритмические основы машинной графики*. Мир, Москва, 1989, 512с.
- [65] Д. Роджерс, *Математические основы машинной графики*. Мир, Москва, 2001, 604с.

- [66] А. М. Данилов, и И. А. Гарькина, *Интерполяция, аппроксимация, оптимизация: анализ и синтез сложных систем. Монография.* 2014.
- [67] Е. Янке, Ф. Эмде, и Ф. Леш, *Специальные функции: Формулы, графики, таблицы.* Directmedia, 2016.
- [68] Д. С. Яковлев, и М. Н. Фаворская, “Технологии фильтрации текстур”, *Актуальные проблемы авиации и космонавтики*, 2011, 1.7.
- [69] А. В. Белоконь, А. В. Проскурин, и М. Н. Фаворская, “Классификация методов синтеза текстур”, *Актуальные проблемы авиации и космонавтики*, 2011, 1.7.
- [70] L. Williams, “Pyramidal Parametrics”, *Proceedings of the 10th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques - SIGGRAPH 83*, 1983, doi:10.1145/800059.801126.
- [71] Р. Гонсалес, и Р. Вудс, *Цифровая обработка изображений.* М: Техносфера, 2005, 507 с.
- [72] X. U. Ying, “An Improved Texture Rendering Technique Based on MipMap Algorithm”, *Journal of Mianyang Normal University*, 2013, 5: 017.
- [73] W. Matusik, “Sampling, Aliasing, & Mipmaps”, *MIT OpenCourseWare 6.837 Computer Graphics*, 2012.
- [74] J. McCormack, R. Perry, K. I. Farkas, and N. P. Jouppi, “Feline: fast elliptical lines for anisotropic texture mapping” *SIGGRAPH '99: Proceedings of the 26th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., pp. 243–250, 1999.
- [75] В. М. Гусятин, Я. В. Чаговец, и Д. Г. Кожушко, “Метод анизотропной фильтрации текстур при синтезе изображений обратным трассированием”, *Информатика, кибернетика и вычислительная техника (ИКВТ-2009)*, Донецк: ДонНТУ, 2009, № 10 (153), с. 64-69.

- [76] Greene, Ned, and Paul Heckbert, “Creating Raster Omnimax Images from Multiple Perspective Views Using the Elliptical Weighted Average Filter”, *IEEE Computer Graphics and Applications*, vol. 6, no. 6, 1986, pp. 21–27., doi:10.1109/mcg.1986.276738.
- [77] P. Mavridis, and G. Papaioannou, “High Quality Elliptical Texture Filtering on GPU”, *Symposium on Interactive 3D Graphics and Games on - I3D 11*, 2011, doi:10.1145/1944745.1944749.
- [78] M. Zwicker, et al. “EWA Splatting”, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, vol. 8, no. 3, 2002, pp. 223–238., doi:10.1109/tvcg.2002.1021576.
- [79] L. Ren, et al. “Object Space EWA Surface Splatting: A Hardware Accelerated Approach to High Quality Point Rendering”, *Computer Graphics Forum*, vol. 21, no. 3, 2002, pp. 461–470., doi:10.1111/1467-8659.00606.
- [80] M. Lundgren, E. Hrkalic, *Review of Displacement Mapping Techniques and Optimization*. Blekinge Tekniska Högskola, 2012.
- [81] S. Marschner, “Detail mapping” *CS562 2016*, [Online]. Available: <https://pdfs.semanticscholar.org/c4b4/cbb4d0038944774c893cae3572007e1dd476.pdf>
- [82] A. Tujula, et al. *Lighting and normal mapping in computer graphics: implementing normal mapping in HactEngine*. 2016.
- [83] J. Hanyoung, and J. Han, “Feature-Preserving Displacement Mapping With Graphics Processing Unit (GPU) Tessellation.” *Computer Graphics Forum*, vol. 31, no. 6, Apr. 2012, pp. 1880–1894., doi:10.1111/j.1467-8659.2012.03068.x..
- [84] K. Kosin, “Parallax Occlusion Mapping in Augmented Reality Case Study on Facade of Sino Portuguese Architecture Phuket, Thailand”, *2015 Digital Heritage*, 2015, doi:10.1109/digitalheritage.2015.7413885.

- [85] N. Tatarchuk, “Dynamic Parallax Occlusion Mapping with Approximate Soft Shadows.” *Proceedings of the 2006 Symposium on Interactive 3D Graphics and Games - SI3D 06*, 2006, doi:10.1145/1111411.1111423.
- [86] K. Dmitriev, and E. Makarov, “Generating Displacement from Normal Map for Use in 3D Games”, *ACM SIGGRAPH 2011 Talks on - SIGGRAPH 11*, 2011, doi:10.1145/2037826.2037839.
- [87] C. González, M. Pérez, J. M. Orduña, “A hybrid GPU technique for real-time terrain visualization”, *Proceedings of Computational and Mathematical Methods in Science and Engineering*, 2016.
- [88] T. Welsh, et al. “Parallax mapping with offset limiting: A perpixel approximation of uneven surfaces”, *Infiscape Corporation*, 2004, pp. 1-9.
- [89] M. Mcguire, M. Mcguire, “Steep parallax mapping”, *I3D 2005 Poster*, 2005, pp. 23-24.
- [90] С. Дасгупта, Х. Пападимитриу, и У. Вазирани, *Алгоритмы*. М. : МЦНМО, 2014, 320 с.
- [91] N. Tatarchuk, “Practical Dynamic Parallax Occlusion Mapping”, *ACM SIGGRAPH 2005 Sketches on - SIGGRAPH 05*, 2005, doi:10.1145/1187112.1187240.
- [92] Yu-Jen Chen, Yung-Yu Chuang, “Anisotropic cone mapping”, *Proceedings: APSIPA ASC 2009: Asia-Pacific Signal and Information Processing Association, 2009 Annual Summit and Conference*. Asia-Pacific Signal and Information Processing Association, 2009 Annual Summit and Conference, International Organizing Committee, 2009. p. 660-663.
- [93] W. Donnelly, "Per-pixel displacement mapping with distance functions", *GPU gems 2.22*, 2005.

- [94] К. С. Солнушкин, “О значении терминов "производительность" и "быстродействие" в применении к ЭВМ”, *Научно-технические ведомости СПбГПУ* №3,2008, 59 с.
- [95] I. V. Kerlow, *The art of 3D: computer animation and effects*. John Wiley & Sons. 2004.
- [96] P. Demorest, *GPU benchmarking*. 2010.
- [97] “Монітори”, *Hotline - порівняти ціни в інтернет-магазинах України: Відгуки, Відео Огляди, Характеристики*. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://hotline.ua/computer/monitory/>
- [98] A. Watt, and F. Policarpo, *3D Games: Real-Time Rendering and Software Technology, Volume 1*. Addison Wesley, Dec, 2000.
- [99] М. Д. Обідник, та А. О. Стахов. "Аналіз методів оцінки якості графічних зображень", 2011.
- [100] Ю. И. Монич, и В. В. Старовойтов *Оценки качества для анализа цифровых изображений*. Государственное научное учреждение «Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси» (ОИПИ НАН Беларуси), г.Минск, Беларусь, 2008.
- [101] “Коэффициент конкордации или согласия Кендалла”, *Mathmethod* [Електронний ресурс]. Доступно: <http://mathmethod.wikispaces.com/коэффициент+конкордации+или+согласия+Кендалла>
- [102] В. І. Жлуктенко, та С. І. Наконечний, *Теорія ймовірностей і математична статистика*. К.: ІЗМН, 1997.
- [103] R. F. Lyon, “Phong Shading Reformulation for Hardware Renderer Simplification”, *Apple Technical Report #43*, August 2, 1993.
- [104] Д. А. Кулагин, “Модели затенения. Плоская модель. Затенение по Гуро и Фонгу”, *Компьютерная графика. Теория, алгоритмы, примеры на C++ и OpenGL*. [Електронний ресурс]. Доступно: [http://compgraphics.info/3D/lighting/shading\\_model.php](http://compgraphics.info/3D/lighting/shading_model.php)

- [105] Д. Херн, и М. П. Бейкер, *Компьютерная графика и стандарт OpenGL, 3-е издание*. Издательский дом «Вильямс», 2005, 1168 с.
- [106] M. Pharr, and R. Fernando, *GPU gems 2: programming techniques for high-performance graphics and general-purpose computation*. Addison-Wesley Professional, 2005,
- [107] О.Н. Романюк, *Комп'ютерна графіка: навч. Посіб.* Вінниця : ВДТУ, 2001, 130 с.
- [108] О. В. Романюк, та В. В. Войтко, “Використання барицентричних координат для розрахунку векторів у довільній точці трикутника”, *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*, 2009, №1, с. 198–202.
- [109] C. Lomont, *Fast inverse square root*. Technical Report, 2003.
- [110] О. Н. Романюк, та А. В. Чорний, *Високопродуктивні методи та засоби зафарбовування тривимірних графічних об'єктів. Монографія*. УНІВЕСУМ-Вінниця, Вінниця, 2006, 190 с.
- [111] Ю. Н. Косников, *Геометрические преобразования в компьютерной графике*. Учебное пособие: Пензенский государственный университет, Пенза, 50 с, 2011.
- [112] Д. А. Кулагин, “Аффинные преобразования пространства”, *Компьютерная графика. Теория, алгоритмы, примеры на C++ и OpenGL*. [Электронный ресурс]. Доступно: [http://compgraphics.info/3D/3d\\_affine\\_transformations.php](http://compgraphics.info/3D/3d_affine_transformations.php)
- [113] E. Lengyel, *Mathematics for 3D game programming and computer graphics*. Cengage Learning, 2012.
- [114] Д. А. Кулагин, “Векторы в пространстве. Однородные координаты. Матрицы преобразований”, *Компьютерная графика. Теория, алгоритмы,*



*примеры на C++ и OpenGL.* [Электронный ресурс]. Доступно:  
[http://compgraphics.info/3D/3d\\_definitions.php](http://compgraphics.info/3D/3d_definitions.php)

- [115] J. Kessenich, D. Baldwin, and R. Rost, *The OpenGL Shading Language Version: 4.30 Document Revision: 7*. The Khronos Group Inc, 2013.
- [116] K. Gray, *Microsoft DirectX 9. Programmable Graphics Pipeline*. Microsoft Press, 2003, 458p.
- [117] W. Engel, *GPU Pro 5: advanced rendering techniques*. CRC Press, 2014.
- [118] R. Marroquim, and A. Maximo, “Introduction to GPU Programming with GLSL” *2009 Tutorials of the XXII Brazilian Symposium on Computer Graphics and Image Processing*, 2009, doi:10.1109/sibgrapi-tutorials.2009.9.
- [119] R. Madsen, and S. Madsen, *OpenGL Game Development By Example*. Packt Publishing, 2016, 340 p.
- [120] M. Bailey, *OpenGL Compute Shaders*, Oregon State University, 2016.
- [121] J. Darby, *Beginning OpenGL game programming*. Cengage Learning, 2014.
- [122] P. Eimandar, *DirectX 11.1 Game Programming*. Packt, 2013, 146с.
- [123] F. Luna, *Introduction to 3D Game Programming with DirectX 11*. Mercury Learning & Information, 2012, 754с.
- [124] *Direct3D 11 Graphics*. [Online]. Available: [https://msdn.microsoft.com/en-us/library/windows/desktop/ff476080\(v=vs.85\).aspx](https://msdn.microsoft.com/en-us/library/windows/desktop/ff476080(v=vs.85).aspx)
- [125] The Khronos, Vulkan Working Group *Vulkan 1.0.66 - A Specification*. The Khronos Group Inc, Version 1.0.66, 2017-11-27 09:15:39Z
- [126] B. Stroustrup, *The C++ Programming Language, 4*. Addison-Wesley Professional, 2013, 1368p.
- [127] Б. Страуструп, *Программирование. Принципы и практика с использованием C++ (2е издание)*. Вильямс, 2016, 1328с.

- [128] С. Мейерс, *Эффективный и современный C++*. 42 рекомендации по использованию C++11 и C++14. ООО «И.Д. Вильямс», 2016, 304 с.
- [129] R. Smith, “Working Draft, Standard for Programming Language C++ N4659”, *Google Inc.*, 2017-03-21. [Online]. Available: <http://www.open-std.org/jtc1/sc22/wg21/docs/papers/2017/n4659.pdf>
- [130] J. Kessenich, D. Baldwin, and R. Rost, “The OpenGL Shading Language Version: 4.50 Document Revision: 7”, *The Khronos Group Inc*, 2017.
- [131] J. Kessenich, G. Sellers, and D. Shreiner, *OpenGL Programming Guide: The Official Guide to Learning OpenGL, Version 4.5 with SPIR-V, 9th Edition*, Addison-Wesley Professional, 2017, 802p.
- [132] G. Sellers, R. S. Wright Jr., and N. Haemel, *OpenGL SuperBible: Comprehensive Tutorial and Reference, 7th Edition*. Addison-Wesley, 2015, 880с.
- [133] J. Clevenger, and V. Scott Gordon, *Computer Graphics Programming in OpenGL with Java*. Mercury Learning And Information, 2017, 332p.
- [134] В. П. Майданюк, *Кодування та захист інформації*. ВНТУ, Вінниця, 2009, 164 с.
- [135] А. М. Петух, В. П. Майданюк, та О. О. Ліщук, “Аналіз алгоритмів стиснення даних і їх програмних реалізацій”, *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*, № 2, с. 4-9, 2016.
- [136] Y. Jiang, et al. “Texture Compression with Variable Data Formats”, *2012 IEEE 12th International Conference on Computer and Information Technology*, 2012, doi:10.1109/cit.2012.71.
- [137] Krause, Philipp Klaus, “Ftc—Floating Precision Texture Compression”, *Computers & Graphics*, vol. 34, no. 5, 2010, pp. 594–601., doi:10.1016/j.cag.2010.06.005.

- [138] “754-2008 — IEEE Standard for Floating-Point Arithmetic. Revision of ANSI/IEEE Std 754-1985”, *IEEE Explore® Digital Library*. [Online]. Available <http://ieeexplore.ieee.org/document/4610935/>