

Міністерство освіти і науки України
Кам'янець-Подільський національний університет імені Івана Огієнка
Фізико-математичний факультет
Кафедра комп'ютерних наук

Кваліфікаційна робота бакалавра

**з теми: «Дослідження сучасних технологій створення реалістичних
зображень в інтерактивних середовищах»**

Виконав: здобувач вищої освіти групи KNms1-B22
спеціальності 122 Комп'ютерні науки

Гріневич Антон Сергійович

(прізвище, ім'я та по батькові здобувача вищої освіти)

Керівник: Смалько Олена Аркадіївна

(прізвище, ім'я та по батькові, науковий ступінь, вчене звання керівника)

кандидат педагогічних наук,
доцент кафедри комп'ютерних наук

Рецензент: Оптасюк Сергій Васильович

(прізвище, ім'я та по батькові, науковий ступінь, вчене звання рецензента)

кандидат фізико-математичних наук,
доцент, завідувач кафедри фізики

АНОТАЦІЯ

У кваліфікаційній роботі проведено дослідження сучасних технологій реалізації фізично коректного рендерингу в інтерактивних середовищах

Об'єктом дослідження є процес створення реалістичних зображень в інтерактивних тривимірних середовищах, предметом дослідження виступають методи підвищення реалістичності і швидкодії алгоритмів фізично коректної візуалізації.

Мета роботи — аналіз сучасних графічних алгоритмів та створення навчального-демонстраційного застосунку, який реалізує алгоритм трасування променів.

У межах дослідження реалізовано демонстраційний застосунок, який дозволяє виконувати трасування променів у реальному часі без потреби у використанні графічних адаптерів з апаратним прискоренням трасування променів. Розроблену систему протестовано на платформах Windows, Linux та MacOS з використанням різних графічних API (DirectX 12, Vulkan, Metal). Отримані результати підтверджують працездатність і стабільність реалізації, а також придатність створеного інструменту для навчальних та дослідницьких цілей у галузі комп'ютерної графіки.

Ключові слова: комп'ютерна графіка, тривимірна графіка, глобальне освітлення, трасування променів, фізично коректний рендеринг, інтерактивне середовище, кросплатформність.

ABSTRACT

The qualification thesis explores modern technologies of physically-based rendering solutions in interactive environments.

The object of the study is a process creation of realistic images in interactive 3D environments, the subjects of the study are methods of believability approximation and optimization for physically-based visualization algorithms.

The objective — analyze modern graphical algorithms and develop an cross-platform application for demonstration and learning purposes, which implements a Ray Tracing algorithm.

The result of the work is a developed demo app, which allows to perform a real-time Ray Tracing without hardware-accelerated RT GPU. Developed system is tested on Windows, Linux and MacOS platforms with DirectX 12, Vulkan and Metal API accordingly. Results are applicable and stable, the instrument is suitable to use for studying and research purposes in Computer Graphics field.

Keywords: computer graphics, three-dimensional graphics, global illumination, ray tracing, physically-based rendering, interactive environment, crossplatform.

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ	2
ВСТУП	5
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТА ФУНДАМЕНТАЛЬНІ ТЕХНОЛОГІЇ СТВОРЕННЯ РЕАЛІСТИЧНИХ ЗОБРАЖЕНЬ	8
1.1. Наукове підґрунтя, базові поняття і концепції сучасних методів фізично коректного рендерингу	8
1.2. Сучасні графічні акселератори, трасування променів у реальному часі	9
РОЗДІЛ 2. СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ СТОРЕННЯ РЕАЛІСТИЧНИХ ЗОБРАЖЕНЬ	13
2.1. Динамічне розсіяне глобальне освітлення	13
2.2. Удосконалення тимчасового згладжування адаптивним трасуванням променів	15
2.3. Знешумлення об'ємного трасування шляху для прямого об'ємного рендерингу у реальному часі	17
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА МУЛЬТИПЛАТФОРМНОГО РІШЕННЯ ДЛЯ ТРАСУВАННЯ ПРОМЕНІВ У РЕАЛЬНОМУ ЧАСІ.....	22
3.1. Впровадження трасування променів засобами сучасних кросплатформних інструментів	22
3.2. Модульна архітектура програмної реалізації трасування променів	25
3.3. Інтерактивне керування камерою і цикл оновлення зображення	27
3.4. Порівняльний аналіз якості та продуктивності трасування на Windows, Linux і MacOS	32
ВИСНОВКИ.....	35
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	36
ДОДАТКИ	39

ВСТУП

У сучасному світі комп'ютерна графіка знайшла застосування у багатьох сферах, від візуалізації даних для наукових досліджень до моделювання фізичних явищ. У медіа, зокрема у відеоіграх, анімації і кінематографі, комп'ютерна графіка у сучасних реаліях відіграє ключову роль. Не дивлячись на те що моделі освітлення на основі яких будуються усі сучасні технології реалізації комп'ютерної графіки існують уже пів століття, графічні акселератори які здатні обробляти алгоритми побудови фізично коректної візуалізації у реальному часі із інтерактивною швидкістю вперше були створені менше десяти років тому. Основні напрямки розвитку графіки у сучасних комп'ютерних науках — більш фізично коректна відповідність наявним моделям освітлення, що в загальному сприймається як наближення реалістичності, а також оптимізація швидкодії роботи алгоритмів утворення реалістичних зображень.

Актуальність теми. Вивчення і удосконалення сучасних технологій створення реалістичних зображень у інтерактивних середовищах є найголовнішою передумовою для подальшого розвитку усієї сфери комп'ютерної графіки. Сучасні технології, такі як трасування променів, глобальне освітлення, новітні методи згладжування відкривають нові можливості для покращення візуальної якості отриманої картини, даючи змогу створювати все більш детальний і реалістичний користувацький досвід. Водночас розвиток апаратних технологій, основним призначенням яких є обробка тривимірної графіки, штовхає вперед і інші напрямки розвитку комп'ютерних наук, наприклад машинне навчання, обчислювальна фізика та хімія, біоінформатика і медицина.

Об'єктом дослідження є процес створення реалістичних зображень в інтерактивних тривимірних середовищах.

Предметом дослідження виступають методи підвищення реалістичності і швидкодії алгоритмів фізично коректної візуалізації.

Мета дослідження — аналіз сучасних технологій створення ефективних методів реалізації трасування променів у реальному часі та розробка навчально-демонстраційного застосунку, що реалізує трасування променів і дозволяє вивчати принципи фізично коректного рендерингу без потреби у високопродуктивній апаратній базі.

Для досягнення мети потрібно вирішити наступні **завдання**:

- Дослідити і проаналізувати сучасні методи реалізації фізично коректної візуалізації;
- Сформувати вибірку технічних рішень, придатних для реалізації у вигляді кроссплатформного застосунку;
- Розробити та реалізувати інструмент, який демонструє роботу трасування променів у реальному часі;
- Провести кроссплатформне тестове дослідження якості візуалізації та використання апаратних ресурсів на різних платформах.

Методи дослідження. Методологічна основа дослідження сучасних технологій створення реалістичних зображень ґрунтується на комплексному підході, що поєднує аналіз даних про застосування алгоритмів у практичних умовах. Це дозволяє оцінити, як саме використовуються наявні технології та визначити напрями їх удосконалення. Дослідження включає вивчення реальних прикладів застосування технологій генерації реалістичних зображень, що дає змогу проаналізувати практичний досвід і результати впровадження відповідних рішень. Крім того, у межах роботи приділяється увага розробці й апробації нових методів та інструментів, спрямованих на вирішення проблем у області створення реалістичних зображень.

Практичним значенням дослідження є розробка мультиплатформного інструменту, який реалізовує алгоритм трасування променів і демонструє механізм роботи алгоритму у реальному часі в інтерактивному середовищі. Інструмент може виступати в якості програмної бази для подальших досліджень

і в якості освітнього матеріалу для ентузіастів без доступу до дороговартісного обладнання.

Структура роботи. Дипломна робота складається зі вступу, трьох основних частин, висновків, списку використаних джерел та розділу з додатками.

У першому розділі проводиться огляд основоположних технологій сфери фізично коректного рендерингу, а також сучасних можливостей у цій сфері, останні технологічні досягнення — нові покоління відео адаптерів і графічні API.

В другому розділі проводиться аналіз новітніх алгоритмів покращення технологій побудови реалістичних зображень — динамічного глобального освітлення, тимчасового згладжування та знешумлення об'ємного трасування шляху.

Третій розділ описує розробку мультиплатформного навчально-демонстраційного застосунку з можливістю інтерактивної взаємодії, що реалізує трасування променів у реальному часі, включаючи впровадження сучасної графічної API у алгоритм рейтрейсингу, опис архітектури проекту, а також результати кросплатформних тестів.

Робота містить два рисунки і шість додатків.

Список використаних джерел складається з 25 пунктів.

ВИСНОВКИ

Не зважаючи на комплексність теми, в результаті дослідження було виконано усі завдання, поставлені на початку роботи. Аналізуючи сучасні методи реалістичної візуалізації, вдалося сформулювати групу технічних рішень, які згодом стали ключовими у реалізації застосунку. Враховуючи що переважна більшість досліджень у області фізично коректного рендерингу спрямовані на оптимізацію існуючих алгоритмів, розробка мультиплатформного інструменту для демонстрації трасування променів дає шанс глянути на усю сферу з іншої сторони. Відсутність можливості кросплатформного використання даних технологій сильно обмежує доступ до вивчення цих технологій, оскільки інтерактивне трасування променів вимагає дороговартісної апаратної бази. Відповідно далеко не всі охочі ентузіасти здатні долучитися до розвитку даної області науки.

Розроблений в рамках цієї роботи програмний продукт продемонстрував ключові елементи фізично коректного рендерингу, зокрема накопичення семплів, випадкову генерацію променів та обробку матеріалів, що дозволяє вважати його повноцінним інструментом для вивчення базових принципів трасування променів. Обрані для реалізації застосунку інструменти, зокрема RUST та WGSL, чудово себе проявили як у зручності розробки, так в робочій швидкодії. Аналізатор коду відловлює більшість помилок при роботі з пам'яттю ще на етапі компіляції. Кросплатформне тестове дослідження показало оптимістичні результати. Хоча на деяких платформах спостерігаються значні вади візуалізації, більшість тестів все ж показали високий рівень якості картинки і швидкодії.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бербега В.О. Спосіб апаратно-програмного трасування променів у задачах тривимірної симуляції: магістерська дис. Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», 2022. 103 с.
2. Грушко Ю.В. Методи трасування променів у реальному часі: магістерська дис. Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», 2018. 125 с.
3. Документація RUST. URL: <https://doc.rust-lang.org/stable/std/index.html> (дата звернення: 25.05.2025).
4. Документація WGSL. URL: <https://www.w3.org/TR/WGSL> (дата звернення: 25.05.2025).
5. Романюк О.Н., Бобко О.Л., Романюк О.В. Перспективи використання технології трасування променів для створення фотореалістичних зображень у реальному часі. *Комп'ютерні ігри та мультимедіа як інноваційний підхід до комунікації – 2024. Матеріали IV Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих вчених, аспірантів і студентів, Одеса, 26-27 вересня 2024 р.* Одеса: ОНТУ, 2024. С.327-328.
6. Сокур О. М., Петрушина Т. І. Проблеми програмного прискорення трасування променів. *Інформатика, інформаційні системи та технології: тези доповідей двадцять другої всеукраїнської конференції студентів і молодих науковців. Одеса, 25 квітня 2025 р.* Одеса, 2025. С.225-230.
7. Фещенко І.О. Оптимізація продуктивності рендерингу методом трасування променів у реальному часі: магістерська дис. Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», 2022. 85 с.

8. Cook R. L., Carpenter L. The Reyes Image Rendering Architecture. *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*. 1987. Vol. 21. P. 95–102. DOI: 10.1145/37402.37414.
9. Cook R. L., Porter T., Carpenter L. Distributed ray tracing. *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*. 1984. Vol. 18. P. 137–145. DOI: 10.1145/964965.808590
10. Cook R. L., Torrance K. E. A Reflectance Model for Computer Graphics. *ACM Transactions on Graphics*. 1982. Vol. 1. P. 7–24. DOI: 10.1145/357290.357293.
11. Verifying Volume Rendering Using Discretization Error Analysis / T. Etienne et al. *IEEE*. 2013. P. 140–154. DOI: 10.1109/TVCG.2013.90.
12. Glassner A. S. An Introduction to Ray Tracing. 3333 C oyote Hill Road Palo Alto CA 94304 USA : Xerox PARC, 2019.
13. Iglesias-Guitian J. A., Mane P., Moon B. Real-Time Denoising of Volumetric Path Tracing for Direct Volume Rendering. *IEEE*. 2020. DOI: 10.48550/arXiv.2106.08034.
14. Kajiya J. T. The rendering equation. *ACM SIGGRAPH*. 1986. Vol. 20. P. 143–150. DOI: 10.1145/15886.15902.
15. Dynamic Diffuse Global Illumination Resampling / Z. Majercik et al. *ACM SIGGRAPH*. 2021. P. 1–2. DOI: 10.1145/3450623.3464635.
16. Dynamic Diffuse Global Illumination with Ray-Traced Irradiance Fields / Z. Majercik et al. *Journal of Computer Graphics Techniques*. 2019. Vol. 8. URL: <https://jcgt.org/published/0008/02/01/> (дата звернення: 25.05.2025).
17. Improving Temporal Antialiasing with Adaptive Ray Tracing / A. Marrs et al. *Ray Tracing Gems NVIDIA*. 2019. P. 353–370. DOI: 10.1007/978-1-4842-4427-2_22.
18. Real-Time Global Illumination using Precomputed Light Field Probes / M. McGuire et al. *ACM I3D*. 2017. DOI: 10.1145/3023368.3023378.
19. Pharr M. Guest Editor’s Introduction: Special Issue on Production Rendering. *ACM Trans.*. 2018. Vol. 37. P. 1–4. DOI: 10.1145/3212511.

20. Pharr M., Jakob W., Humphreys G. *Physically Based Rendering: From Theory To Implementation*. URL: <https://www.pbr-book.org/> (дата звернення: 25.05.2025).
21. Parallel distributed, GPU-accelerated, advanced lighting calculations for large-scale volume visualization / M. Shih et al. *IEEE*. 2016. DOI: 10.1109/LDAV.2016.7874309.
22. Suffern K. *Ray Tracing from the Ground Up*. Boca Raton, Florida, United States : A K Peters/CRC Press, 2007.
23. Turner Whitted. An improved illumination model for shaded display. *Communications of the ACM*. 1980. Vol. 23. P. 343–349. DOI: 10.1145/358876.358882.
24. Wyman C., Marrs A., Shirley P. Weighted Reservoir Sampling: Randomly Sampling Streams. *Ray Tracing Gems II. Apress*. 2021. DOI: 10.1007/978-1-4842-7185-8_22.
25. Area ReSTIR: Resampling for Real-Time Defocus and Antialiasing / S. Zhang et al. *ACM Transactions on Graphics*. 2024. Vol. 43. P. 1–13. DOI: 10.1145/3658210.