



РЕЦЕНЗИЯ

върху дисертационен труд за придобиване на образователна и научна степен
„доктор“

Автор на дисертационния труд: **маг. инж. Георги Георгиев Георгиев**

Тема на дисертационния труд: **„Платформено независими приложения с използване на GPU и машинно обучение“**

професионално направление: **5.3. Комуникационна и компютърна техника**
научна специалност: **„Системно програмиране“**

Рецензент: **доц. д-р инж. Галя Веселинова Павлова**

1. Актуалност на разработвания в дисертационния труд проблем в научно и научно-приложно отношение. Степен и нива на актуалността на проблема и конкретните задачи, разработени в дисертацията

Актуалността на разглежданата проблематика се определя от бързото развитие на графичните процесори (GPU) и нарастващото им значение не само за компютърната графика. Те се утвърдиха и като основна платформа за високопроизводителни изчисления с общо предназначение и за обучение и изпълнение на модели на машинно обучение.

Основен проблем в разглежданата област остава фрагментацията на софтуерните платформи и приложно-програмните интерфейси (CUDA, OpenCL, Direct3D, OpenGL, Vulkan). Това налага разработчиците да поддържат множество реализации или да приемат компромиси по отношение на преносимостта и производителността. Дисертационният труд адресира именно този проблем чрез изследване на възможностите за създаване на унифицирана и платформено независима архитектура на базата на Vulkan и Vulkan Compute, комбинирана с оптимизационни алгоритми за проследяване на светлинни лъчи и методи на машинното обучение за скалиране към високи разделителни способности.

Разработените в труда концептуален модел, реализация на рендерираща система и методика за сравнителна оценка на производителността допринасят за практическата стойност на изследването.

2. Степен на познаване състоянието на проблема и творческа интерпретация на литературния материал

Авторът демонстрира много добро познаване на съвременното състояние на проблематиката. Направен е задълбочен сравнителен и систематичен анализ на архитектурите на съвременните графични процесори, особеностите на паралелното програмиране (SIMT), както и на основните приложно-програмни

интерфейси за графика и GPGPU изчисления – OpenGL, Direct3D 12, Vulkan, CUDA и OpenCL. Ясно са идентифицирани предимствата и ограниченията на всяка платформа по отношение на преносимост, контрол върху ресурсите и възможностите за интеграция на графични и изчислителни задачи. Аргументиран е изборът на Vulkan и Vulkan Compute като технологична основа, което показва задълбочено разбиране на актуалните тенденции в областта.

Литературният материал е интерпретиран творчески, като авторът не се ограничава до преглед на съществуващите решения, а ги използва като отправна точка за формулиране на собствена концепция за платформено независима архитектура, оптимизационни алгоритми за проследяване на лъчи в реално време (включително съвременни техники като ReSTIR) и интеграция на методи на машинното обучение за супер-резолюция и генериране на кадри. Това свидетелства за способност за критичен анализ и за самостоятелно извеждане на изследователски насоки.

3. Съответствие на избраната методика на изследване с поставената цел и задачи на дисертационния труд

Дисертационния труд е структуриран в четири последователни глави, следващи логиката: анализ → проектиране → алгоритмична оптимизация → интеграция на машинно обучение, което позволява поставената цел - създаване на унифициран и платформено независим софтуер за създаване на приложения с използване на GPU в областта на компютърната графика и интегрирането им с машинно обучение – да бъде разгърната логично.

Петте изследователски хипотези са пряко адресирани от съответните методологични компоненти. Хипотеза 1 и 2, свързани с платформената независимост и единния програмен модел, са верифицирани чрез сравнителния анализ на API в Глава 1 и предложената Vulkan/Rust архитектура в Глава 2. Хипотеза 3 за реалновременното проследяване на лъчи е адресирана чрез алгоритмичната разработка на ReSTIR DI и ReSTIR GI в Глава 3 с конкретни измервания на производителността. Хипотеза 4 за ролята на ML при компенсирание на изчислителната сложност е разгледана в Глава 4 чрез сравнителна оценка на техниките за суперрезолюция и генериране на кадри. Хипотеза 5 — синтезиращата хипотеза за комбинираната система — е верифицирана чрез интегрирането на резултатите от предходните глави в единна работеща реализация.

Трудът не съдържа изрично формулирана изследователска методика като самостоятелен раздел — методологичните избори са разпределени имплицитно между главите, без обобщаваща рамка, което не е пречка за постигането на поставената цел.

4. Кратка аналитична характеристика на естеството и оценка на достоверността на материала, върху който се градят приносите на дисертационния труд

Дисертационният труд е в обем от 135 страници, като включва увод, 4 глави, заключение, списък на основните приноси, списък на публикациите по дисертацията и използвана литература. Работата включва общо 63 фигури и 4 таблици. Научната литература обхваща 108 научни публикации в утвърдени издания— ACM SIGGRAPH, IEEE, Eurographics, ECCV/CVPR и др.

Представеният материал включва систематичен преглед на съвременните GPU архитектури и приложно-програмни интерфейси, сравнителен анализ на програмни езици, разработване на собствена платформено независима архитектура на базата на Vulkan, оптимизационни алгоритми за проследяване на лъчи (включително ReSTIR) и методи за супер-резолюция и генериране на кадри чрез машинно обучение.

Експерименталната работа в дисертационния труд обхваща две основни направления — оптимизационни алгоритми за реално време проследяване на светлинни лъчи (Глава 3) и ML-базирано скалиране и генериране на кадри (Глава 4) — и се гради върху собствена реализация на rendering engine в Rust с Vulkan бекенд.

В трета глава са описани проведените експерименти с оптимизационни алгоритми за проследяване на светлинни лъчи в реално време, с акцент върху техниката ReSTIR. Тестването е извършено върху стандартни сцени (Cornell Box, Sponza и 100 Lights), като основният количествен показател е броят кадри в секунда (FPS). Представени са и визуални резултати от рендирането.

Експериментите, описани в четвърта глава, са ориентирани към методи за скалиране към високи разделителни способности и генериране на кадри чрез машинно обучение. Сравнени са native рендиране (4K и 1080p) с различни техники за upscaling (FSR, Vulkan Compute модел, комбинирани подходи с FXAA). Оценката включва както количествени данни за производителност (FPS), така и качествени визуални сравнения в близък план.

Трите тестови сцени са подбрани с нарастваща сложност, което позволява оценка на мащабируемостта. Резултатите са представени с конкретни числени стойности, а не с общи описания.

5. Научни и/или научноприложни приноси на дисертационния труд

Авторът формулира седем приноса, разпределени в три категории — два научни, три научноприложни и два приложни.

Научни приноси

Разработен е концептуален модел за платформено независима система за рендиране в реално време, основан на единен програмен модел за графични и изчислителни операции чрез Vulkan. Предложен е функционално-императивен

подход за разработване на високопроизводителни графични приложения, който съчетава безопасно управление на ресурсите, модулност и ефективно използване на многоядрените архитектури.

Тези приноси имат теоретична стойност и задават основа за преносими GPU приложения.

Научно-приложни приноси

Предложена е конкретна архитектура на платформено независим rendering engine с проследяване на лъчи, реализирана чрез Vulkan и езика Rust. Разработен е подход за интегриране на адаптирани алгоритми ReSTIR DI и ReSTIR GI в платформено независима среда, което позволява преносимо real-time path tracing върху различни GPU архитектури. Предложен е и подход за използване на машинно обучение за AI-базирано мащабиране към високи резолюции и генериране на междинни кадри с цел намаляване на изчислителното натоварване при запазване на визуалното качество.

Приложни приноси

Реализиран е работещ прототип на системата, с който са проведени експерименти, доказващи еквивалентна производителност при изпълнение върху Windows и Linux без платформено специфични реализации. Разработена е методика за сравнителна оценка на производителността в различни среди.

Като цяло считам, че приносите са оригинални, добре обосновани, актуални и с практическа значимост, като демонстрират способност на автора самостоятелно да формулира и решава научно-приложни задачи със значителна степен на сложност. Те са в пряка връзка с тематиката на дисертационния труд и са убедително подкрепени от резултатите от разработването и експерименталното изследване. Особено ценни са комбинацията от платформена независимост (Vulkan + Rust), интеграцията на съвременни техники за проследяване на лъчи (ReSTIR) и използването на машинно обучение за оптимизация на производителността.

Въз основа на това давам положителна оценка на приносите на дисертационния труд и считам, че те отговарят на изискванията за придобиване на образователната и научна степен „доктор“.

6. Оценка за степента на личното участие на дисертанта в приносите

Считам, че приносите в представения ми за рецензиране дисертационен труд са оригинални и са предимно лично дело на докторанта. Концептуалният модел, архитектурата на платформено независимия rendering engine, адаптацията и интеграцията на алгоритмите ReSTIR, както и подходът за използване на машинно обучение за супер-резолюция и генериране на кадри са свидетелство за това. Софтуерната реализация на прототипа на езика Rust с Vulkan, провеждането на експерименталните изследвания и сравнителните анализи

върху различни операционни системи също са резултат от самостоятелната му работа.

7. Преценка на публикациите по дисертационния труд: брой, характер на изданията, в които са отпечатани

Към дисертацията е приложен списък с направени 4 публикации, 1 от които е самостоятелна, а другите са в съавторство с научните ръководители.

Публикациите на маг. инж. Георги Георгиев тематично съответстват на тематиката, целите и задачите на дисертационния труд. Те покриват последователно всички основни аспекти – интерфейси, архитектура, оптимизация на проследяване на лъчи и интеграция с машинно обучение – и осигуряват добра апробация на резултатите.

8. Използване на резултатите от дисертационния труд в научната и социалната практика

Резултатите от дисертационния труд биха могли да намерят приложение в три направления. В научната практика — като възпроизводима изследователска основа за бъдещи разработки в реалновременната компютърна графика и платформено независимото GPU програмиране. В образователната практика — в учебния процес по системно програмиране и компютърна графика във ФКСТ на ТУ-София. В индустриалната практика — симулационен софтуер, приложения за виртуална и добавена реалност, инженерна визуализация, киното и медицинската образна диагностика, където се изисква висока производителност и преносимост между различни операционни системи и GPU архитектури.

9. Оценка на съответствието на автореферата с изискванията за изготвянето му, както и на адекватността на отразяване на основните положения и приносите на дисертационния труд

Авторефератът на дисертационния труд е в обем от 30 стр. на български език и 27 стр. на английски език. Оформен е в съответствие с изискванията на Правилника за условията и реда за придобиване на научни степени в ТУ-София и отразява вярно съдържанието, проведените изследвания, постигнатите теоретични и практически резултати и приносите, съдържащи се в пълния текст на дисертационния труд. Номерата на фигурите, таблиците и формулите в автореферата съответстват на тези в дисертационния труд.

10. Мнения, препоръки и бележки

Дисертационният труд на маг. инж. Георги Георгиев представлява завършена и инженерно задълбочена научна разработка по актуална тема. Приносите са оригинални и логично свързани – от концептуален модел и платформено независима архитектура на базата на Vulkan и Rust, през

оптимизация на проследяване на лъчи с ReSTIR, до интеграция на машинно обучение за супер-резолюция и генериране на кадри. Експерименталните резултати подкрепят основните хипотези, а публикациите осигуряват добра апробация.

Експерименталните резултати са убедителни и подкрепят основните хипотези, но представянето им би спечелило от по-подробно описание на използваните хардуерни конфигурации, версии на драйвери и точни условия на тестване.

Препоръчвам на автора в бъдеще да:

- разшири сравнителния анализ с допълнителни GPU архитектури (например AMD и Intel) с цел по-силна демонстрация на платформената независимост.

- по-пълна верификация на машинното обучение чрез интегриране на стандартни метрики за визуално качество, сравнение с индустриални решения като DLSS и FSR, и тестване при по-широк спектър от сценарии и динамични условия.

- проучи възможността за по-дълбока интеграция на машинното обучение директно в процеса на path tracing.

11. Заключение с ясна положителна или отрицателна оценка на дисертационния труд

След запознаване с представените документи и дисертационния труд, както и съдържащите се в него научни, научно-приложни и приложни приноси, считам, че те са в актуална научна област и показват способност за самостоятелно решаване на инженерни задачи.

Представените материали от докторанта удовлетворяват всички изисквания на Закон за развитието на академичния състав в Република България, Правилник за неговото прилагане и Правилник за условията и реда за придобиване на научни степени в ТУ–София.

Всичко това ми дава основание да дам **положителна** оценка на дисертационния труд и да предложа на уважаемото научно жури да присъди на **маг.инж. Георги Георгиев Георгиев** образователната и научна степен „доктор“ в областта на висшето образование 5. Технически науки, Професионално направление: 5.3. Комуникационна и компютърна техника, научна специалност „Системно програмиране“.

02.09.2026

РЕЦЕНЗЕНТ:

REVIEW

of a doctoral thesis for the award of the academic and scientific degree of 'Doctor'

Author of the doctoral thesis: **MSc Eng. Georgi Georgiev Georgiev**

Thesis topic: **'Platform-independent applications utilising GPUs and machine learning'**

Field of study: **5.3. Communications and Computer Engineering**

Scientific specialisation: **'Systems Programming'**

Reviewer: Assoc. Prof. Dr Eng. Galya Veselinova Pavlova

1. Relevance of the problem addressed in the thesis from a scientific and applied scientific perspective. Degree and levels of relevance of the problem and the specific tasks addressed in the thesis

The relevance of the subject matter under consideration is determined by the rapid development of graphics processing units (GPUs) and their growing importance not only for computer graphics. They have also established themselves as a primary platform for high-performance general-purpose computing and for the training and execution of machine learning models.

The major problem in this field remains the fragmentation of software platforms and application programming interfaces (CUDA, OpenCL, Direct3D, OpenGL, Vulkan). This forces developers to maintain multiple implementations or to make compromises regarding portability and performance. This doctoral thesis addresses precisely this problem by investigating the possibilities for creating a unified and platform-independent architecture based on Vulkan and Vulkan Compute, combined with optimisation algorithms for ray tracing and machine learning methods for scaling to high resolutions.

The conceptual model, the implementation of a rendering system and the methodology for comparative performance evaluation developed in this thesis contribute to the practical value of the research.

2. Level of understanding of the state of the art and creative interpretation of the literature

The author demonstrates a very good understanding of the current state of the field. An in-depth comparative and systematic analysis has been carried out of the architectures of modern graphics processing units, the characteristics of parallel programming (SIMT), as well as the main application programming interfaces for graphics and GPGPU computing – OpenGL, Direct3D 12, Vulkan, CUDA and OpenCL. The advantages and limitations of each platform in terms of portability, resource control and the possibilities for integrating graphics and computational tasks are clearly identified. The choice of Vulkan and Vulkan Compute as the technological

foundation is well-reasoned, demonstrating a thorough understanding of current trends in the field.

The literature has been interpreted creatively; the author does not limit themselves to a review of existing solutions, but uses them as a starting point for formulating their own concept for a platform-independent architecture, optimisation algorithms for realtime ray tracing (including modern techniques such as ReSTIR) and the integration of machine learning methods for super-resolution and frame generation. This demonstrates an ability for critical analysis and for independently deriving research directions.

3. Alignment of the chosen research methodology with the stated aim and objectives of the thesis

The thesis is structured into four consecutive chapters, following the logic: analysis → design → algorithmic optimisation → integration of machine learning, which allows the stated objective – the creation of unified and platform-independent software for developing GPU-based applications in the field of computer graphics and their integration with machine learning – to be developed logically.

The five research hypotheses are directly addressed by the corresponding methodological components. Hypotheses 1 and 2, relating to platform independence and the unified programming model, are verified through the comparative analysis of APIs in Chapter 1 and the proposed Vulkan/Rust architecture in Chapter 2. Hypothesis 3 on real-time ray tracing is addressed through the algorithmic development of ReSTIR DI and ReSTIR GI in Chapter 3, with specific performance measurements. Hypothesis 4, concerning the role of ML in offsetting computational complexity, is examined in Chapter 4 through a comparative evaluation of super-resolution and frame generation techniques. Hypothesis 5 — the synthesising hypothesis for the combined system — is verified by integrating the results from the preceding chapters into a single working implementation.

The thesis does not contain an explicitly formulated research methodology as a separate section — the methodological choices are distributed implicitly across the chapters, without a summarising framework, which does not prevent the achievement of the set objective.

4. A brief analytical description of the nature and an assessment of the reliability of the material on which the contributions of the thesis are based

The thesis comprises 135 pages and includes an introduction, four chapters, a conclusion, a list of the main contributions, a list of publications related to the thesis, and a bibliography. The thesis includes 63 figures and 4 tables. The scientific literature comprises 108 scientific publications in established journals—ACM SIGGRAPH, IEEE, Eurographics, ECCV/CVPR, etc.

The material presented includes a systematic review of modern GPU architectures and application programming interfaces, a comparative analysis of programming languages, the development of a proprietary platform-independent architecture based on Vulkan, optimisation algorithms for ray tracing (including ReSTIR), and methods for super-resolution and frame generation using machine learning.

The experimental work in the thesis covers two main areas — optimisation algorithms for real-time ray tracing (Chapter 3) and ML-based upscaling and frame generation (Chapter 4) — and is based on a custom implementation of a rendering engine in Rust with a Vulkan backend.

Chapter 3 describes the experiments conducted with optimisation algorithms for real-time ray tracing, with a focus on the ReSTIR technique. Testing was carried out on standard scenes (Cornell Box, Sponza and 100 Lights), with the main quantitative metric being the number of frames per second (FPS). Visual results from the rendering are also presented.

The experiments described in Chapter 4 focus on methods for upscaling to high resolutions and frame generation via machine learning. Native rendering (4K and 1080p) is compared with various upscaling techniques (FSR, the Vulkan Compute model, and combined approaches with FXAA). The evaluation includes both quantitative performance data (FPS) and qualitative close-up visual comparisons.

The three test scenes were selected in order of increasing complexity, allowing for an assessment of scalability. The results are presented with specific numerical values rather than general descriptions.

5. Scientific and/or applied scientific contributions of the thesis

The author identifies seven contributions, divided into three categories — two scientific, three applied scientific and two applied.

Scientific contributions

A conceptual model has been developed for a platform-independent real-time rendering system, based on a unified programming model for graphics and computational operations via Vulkan. A functional-imperative approach to the development of high-performance graphics applications has been proposed, which combines safe resource management, modularity and the efficient utilisation of multicore architectures.

These contributions have theoretical value and lay the foundation for portable GPU applications.

Scientific and applied contributions

A specific architecture for a platform-independent ray-tracing rendering engine, implemented using Vulkan and the Rust programming language, is proposed. An approach has been developed for integrating adapted ReSTIR DI and ReSTIR GI algorithms into a platform-independent environment, enabling portable real-time path

tracing across different GPU architectures. An approach is also proposed for using machine learning for AI-based upscaling to high resolutions and the generation of intermediate frames, with the aim of reducing the computational load whilst maintaining visual quality.

Practical contributions

A working prototype of the system has been implemented, and experiments have been conducted using it, demonstrating equivalent performance when running on Windows and Linux without platform-specific implementations. A methodology for the comparative evaluation of performance across different environments has been developed.

Overall, I consider the contributions to be original, well-founded, topical and of practical significance, demonstrating the author's ability to independently formulate and solve scientific and applied problems of considerable complexity. They are directly related to the subject matter of the thesis and are convincingly supported by the results of the development and experimental research. Particularly valuable are the combination of platform independence (Vulkan + Rust), the integration of modern raytracing techniques (ReSTIR) and the use of machine learning to optimise performance.

On this basis, I give a positive assessment of the contributions of the thesis and consider that they meet the requirements for the award of the academic and scientific degree of 'Doctor'.

6. Assessment of the degree of the doctoral candidate's personal contribution to the work

I consider that the contributions in the doctoral thesis submitted to me for review are original and are predominantly the doctoral candidate's own work. The conceptual model, the architecture of the platform-independent rendering engine, the adaptation and integration of the ReSTIR algorithms, as well as the approach to using machine learning for super-resolution and frame generation, bear witness to this. The software implementation of the prototype in the Rust language using Vulkan, as well as the conduct of experimental research and comparative analyses across different operating systems, are also the result of his independent work.

7. Assessment of the publications related to the thesis: number and nature of the journals in which they were published

Attached to the thesis is a list of four publications, one of which is an independent work, whilst the others are co-authored with the academic supervisors. The publications by MSc Eng. Georgi Georgiev correspond thematically to the subject matter, aims and objectives of the thesis. They systematically cover all key aspects –

interfaces, architecture, ray tracing optimisation and integration with machine learning – and provide sound validation of the results.

8. Application of the results of the thesis in scientific and social practice

The results of the thesis could be applied in three areas. In scientific practice — as a reproducible research foundation for future developments in real-time computer graphics and platform-independent GPU programming. In educational practice — in the teaching of systems programming and computer graphics at the Faculty of Computer Science and Technologies, Technical University of Sofia. In industrial practice — simulation software, virtual and augmented reality applications, engineering visualisation, cinema and medical imaging, where high performance and portability across different operating systems and GPU architectures are required.

9. Assessment of the abstract's compliance with the requirements for its preparation, as well as the adequacy of its presentation of the main arguments and contributions of the doctoral thesis

The abstract of the doctoral thesis comprises 30 pages in Bulgarian and 27 pages in English. It has been formatted in accordance with the requirements of the Regulations on the Conditions and Procedures for the Award of Academic Degrees at the Technical University of Sofia and accurately reflects the content, the research carried out, the theoretical and practical results achieved, and the contributions contained in the full text of the thesis. The numbering of the figures, tables and formulae in the abstract corresponds to that in the thesis.

10. Opinions, recommendations and comments

The doctoral thesis by MSc Eng. Georgi Georgiev represents a comprehensive and technically rigorous scientific study on a topical subject. The contributions are original and logically interconnected – ranging from a conceptual model and a platform-independent architecture based on Vulkan and Rust, through the optimisation of ray tracing with ReSTIR, to the integration of machine learning for super-resolution and frame generation. The experimental results support the main hypotheses, and the publications provide good validation.

The experimental results are convincing and support the main hypotheses, but their presentation would benefit from a more detailed description of the hardware configurations used, driver versions and precise testing conditions.

I recommend that the author, in future, should:

- expand the comparative analysis to include additional GPU architectures (e.g. AMD and Intel) in order to demonstrate platform independence more convincingly.
- carry out a more comprehensive verification of the machine learning approach by incorporating standard visual quality metrics, comparing it with industry solutions

such as DLSS and FSR, and testing it across a wider range of scenarios and dynamic conditions.

- Explore the possibility of deeper integration of machine learning directly into the path tracing process.

11. Conclusion with a clear positive or negative assessment of the doctoral thesis

Having reviewed the submitted documents and the doctoral thesis, as well as the scientific, applied scientific and applied contributions contained therein, I consider that they fall within a current field of science and demonstrate the ability to independently solve engineering problems.

The materials submitted by the doctoral candidate satisfy all the requirements of the Law on the Development of Academic Staff in the Republic of Bulgaria, the Regulations for its implementation, and the Regulations on the conditions and procedures for the award of academic degrees at the Technical University of Sofia.

All of this gives me grounds to give a positive assessment of the doctoral thesis and to propose to the distinguished academic jury that they award MSc Eng. Georgi Georgiev Georgiev the academic and scientific degree of 'Doctor' in the field of higher education 5. Technical Sciences, Professional field: 5.3. Communication and Computer Engineering, scientific specialisation 'Systems Programming'.

02.09.2026

REVIEWER: