

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе  
Университета ИТМО

Д.т.н., профессор

В.О. Никифоров

2023г.



## ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу  
Санжарова Вадима Владимировича

«Разработка расширяемой системы фотореалистичного рендеринга на GPU»,  
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-  
математических наук по специальности 2.3.5. Математическое и программное  
обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей.

### Актуальность темы.

Синтез фотореалистичных изображений используется в различных отраслях, включая архитектурную и интерьерную визуализации, проектирование освещения, создание тренажерных комплексов, кино- и анимационных фильмов. В последние годы получило распространение использование рендер-систем для синтеза наборов данных для задач компьютерного зрения. Одной из ключевых характеристик рендер-системы является скорость синтеза реалистичного изображения. Быстрый расчет позволяет использовать более сложные модели и/или получить больше изображений в наборе данных. Одним из основных способов ускорения синтеза фотореалистичных изображений является массовое распараллеливание вычислений, которое реализуется на графических процессорах (GPU). Данное решение стало особенно актуальным с появлением аппаратного ускорения трассировки лучей.

С другой стороны, разнообразие областей применения рендеринга приводит к необходимости, во-первых, интеграции рендер-систем с различными программными системами, создающими 3D-сцены и их отдельные компоненты, и во-вторых, постоянного расширения функциональности рендер-системы путем добавления новых и модификации имеющихся математических моделей для компонент 3D-сцен, создаваемых в ряде случаев конечными пользователями. Необходимость программирования на низком уровне и высокая трудоемкость технологий разработки на GPU значительно усложняют решение этих двух задач. Поэтому большинство существующих рендер-систем на GPU используют технологии,



разработанные глобальными производителями (например, Nvidia Optix), что позволяет снизить трудоемкость разработки, пожертвовав кроссплатформенностью и контролем над внутренним устройством рендер-системы. В этом случае разработчики отчасти теряют возможности по отладке, оптимизации и расширению функциональности, что негативно сказывается на конечных пользователях. Поэтому особую актуальность приобретают исследования, связанные с разработкой рендер-систем, позволяющих совместить высокую производительность GPU-реализации с возможностью добавления новых и модификации имеющихся моделей для компонент 3D-сцен, не затрагивая внутреннее устройство рендер-системы.

Решение указанных выше задач, а также устранение имеющихся недостатков существующих систем фотореалистичного рендеринга на GPU являются основными направлениями диссертационного исследования Санжарова Вадима Владимировича, что позволяет сделать вывод об актуальности выполненной работы.

### **Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций.**

Положения, выносимые на защиту, а также промежуточные результаты, полученные в ходе решения отдельных задач, имеют достаточную степень теоретического и эмпирического обоснования. Для предложенных методов и алгоритмов были проведены численные эксперименты на базе открытой GPU-системы фотореалистичного рендеринга Hydra Render на тестовых наборах 3D-сцен. Эксперименты продемонстрировали корректность предложенных методов и алгоритмов.

При разработке новой программной архитектуры автор опирается на анализ архитектуры существующих рендер-систем, используемых в приложениях компьютерной графики, и результаты численного моделирования процесса распределенного рендеринга.

В качестве математической основы предложенного метода создания пользовательских расширений используется теория синтаксического анализа и компиляции, что соответствует исследуемой проблеме расширения функциональности программной системы. В ходе численных экспериментов было произведено сравнение качества изображений, полученных в рамках предложенного метода с другими подходами, реализованными в составе той же программной системы. Вывод: результаты согласуются по качеству с соответствующими результатами, полученными с помощью других подходов.

При разработке алгоритма оценки разрешения процедурных текстур Санжаров В.В. отталкивается от известного алгоритма, основанного на анализе градиентов текстурных координат и широко используемого в современных графических API, для определения уровня детализации текстуры-изображения с известным разрешением. Для нового алгоритма, предложенного Санжаровым В.В., было проведено формальное исследование его свойств и доказана теорема о том, что хотя бы по одному



из измерений текстуры ее вычисленное разрешение позволяет достичь соотношения один тексел текстуры на одну точку изображения, синтезированного рендер-системой.

**Оценка новизны и достоверности основных научных положений, выводов и рекомендаций.**

Положениями, выносимыми на защиту в рассматриваемой диссертационной работе, являются:

1. Программная архитектура рендер-системы с дополнительным программным слоем, решающим задачи интеграции сцен и организации ее инфраструктуры.

2. Алгоритм оценки уровня детализации процедурных текстур, основанный на выполнении специализированного предварительного рендеринга сцены.

3. Метод разработки и исполнения пользовательских расширений GPU-системы фотореалистичного рендеринга.

Состоятельность и достоверность положений, выносимых на защиту, подтверждается проведенными для предложенных методов и алгоритмов научно организованных экспериментов и сравнений с существующими решениями. Выносимые на защиту результаты были апробированы на семинарах и международных конференциях и опубликованы в рецензируемых изданиях перечня ВАК, в том числе индексируемых в Scopus и/или Web of Science.

Теоретическая и практическая значимость исследования состоит в следующем:

- разработанная программная архитектура промежуточного слоя для рендер-систем позволяет работать с непомяющимися в оперативную память большими 3D-сценами, добавлять новые модели и параметры моделей компонентов 3D-сцен без изменения программного кода промежуточного слоя, отслеживать изменения, выполняемые пользователем, для обеспечения эффективной передачи данных и отладки рендер-систем;
- предложенный алгоритм оценки разрешения процедурных текстур позволяет использовать в GPU-системах рендеринга разнообразные средства создания текстур (включая нейросетевые решения);
- предложенный алгоритм оценки разрешения текстур может быть использован для определения их оптимального разрешения до начала процесса фотореалистичного синтеза изображений, что позволяет снизить затраты памяти GPU на их хранение;
- разработанный метод для создания расширений рендер-систем позволяет добавлять новые, обрабатываемые на GPU, математические модели компонент 3D-сцены, созданные, в том числе, конечным пользователем;
- предлагаемый метод для исполнения расширений на GPU нескольких отдельных вычислительных ядер, каждое из которых содержит



расширения одного типа, позволяет, в отличие от существующих решений, избежать перекомпиляции всей рендер-системы при редактировании кода расширений и облегчить процесс ее отладки.

Основные научные результаты достаточно полно отражены в публикациях, включающих 8 изданий перечня ВАК, из которых 6 также индексируются в Scopus и 5 в Web of Science.

Результаты диссертационного исследования были интегрированы в открытую GPU-систему фотореалистичного рендеринга Hydra Render, разработанную в Институте прикладной математики имени М. В. Келдыша РАН. На базе построенной системы фотореалистичного рендеринга был создан программный комплекс для синтеза обучающих данных для ряда задач компьютерного зрения. Достиженные результаты также были опубликованы в рецензируемых изданиях и доложены на международных конференциях.

### **Рекомендации по внедрению.**

Программная архитектура, методы и алгоритмы, предложенные в диссертации Санжарова В.В., рекомендованы к внедрению для разработки программного обеспечения систем фотореалистичного синтеза изображений, а также для модернизации программного обеспечения существующих систем, с целью реализации поддержки программируемых расширений и решения задач взаимодействия с приложениями создания 3D-сцен и средствами генерации текстур. В частности, полученные результаты рекомендуется интегрировать с новой версией GPU-системы фотореалистичного рендеринга Hydra Render v3, ориентированной на использование в задачах 3D-реконструкции и построение автоматически размеченных баз данных видео и изображений для систем искусственного интеллекта. Дальнейшее развитие тематики исследования рекомендовано на базе научного коллектива по месту выполнения диссертационной работы.

### **Замечания по диссертационной работе.**

1. В диссертационном исследовании была доказана теорема о том, что предложенный алгоритм обеспечит минимум один тексел текстуры на одну точку изображения, но не было проиллюстрировано, как увеличение числа текстелов на точку изображения влияет на комфорт зрительного восприятия. Кроме того, теорема была доказана только для текстур, находящихся в зоне прямого виденья, а для текстур, видимых в зеркалах, данный алгоритм работать не будет.
2. Недостаточно четко сформулирована концепция промежуточного слоя между данными сцены и системой рендеринга, необходимо более подробно описать ситуацию взаимодействия промежуточного слоя с «закрытой» системой рендеринга.



3. Термин «реалистичный рендеринг» нельзя однозначно применять к сценам, содержащим процедурные текстуры, поскольку последние есть, как правило, результат художественного дизайна и не имеют под собой строгой физической модели.
4. В диссертации не были представлены временные и точностные характеристики синтезируемых изображений, не ясна возможность применения разработанных решений для систем рендеринга реального времени.

При этом отмеченные недостатки не снижают качество полученных результатов диссертационного исследования.

### **Заключение.**

Диссертация является законченным научно-исследовательским трудом и соответствует паспорту специальности 2.3.5. «Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей». В работе предложены программная архитектура, методы и алгоритмы для разработки расширяемых программных систем фотореалистичного синтеза изображений, что соответствует направлениям 3 «Модели, методы, архитектуры, алгоритмы, языки и программные инструменты организации взаимодействия программ и программных систем» и 7 «Модели, методы, архитектуры, алгоритмы, форматы, протоколы и программные средства человеко-машинных интерфейсов, компьютерной графики, визуализации, обработки изображений и видеоданных, систем виртуальной реальности, многомодального взаимодействия в социокиберфизических системах». Предложен метод программирования пользовательских расширений рендер-системы, что соответствует направлениям 1 «Модели, методы и алгоритмы проектирования, анализа, трансформации, верификации и тестирования программ и программных систем» и 2 «Языки программирования и системы программирования, семантика программ».

Полученные автором результаты являются достоверными и значимыми для развития указанной отрасли науки. Логика изложения материала диссертации соответствует заявленной цели и поставленной в рамках исследования научной задаче. По результатам исследования сделаны обоснованные выводы. Автореферат правильно отражает содержание диссертации. Диссертационная работа отвечает критериям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 в ред. от 18.03.2023 г., а ее автор, Санжаров Вадим Владимирович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 2.3.5. «Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей».

Диссертационная работа обсуждалась на заседании ученого совета мегафакультета Компьютерных технологий и управления федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО». Настоящий отзыв рассмотрен и одобрен на заседании ученого совета

мегафакультета Компьютерных технологий и управления, протокол №15 от «27» сентября 2023 г 2023 г. На заседании присутствовали 16 человек.

Директор мегафакультета Компьютерных технологий и управления, доктор технических наук, профессор

А.А. Бобцов

Отзыв составил:

доцент факультета Программной инженерии и компьютерной техники мегафакультета Компьютерных технологий и управления, кандидат физико-математических наук

Д.Д. Жданов

Сведения о составителе отзыва:

Жданов Дмитрий Дмитриевич  
кандидат физико-математических наук,  
доцент факультета Программной инженерии и компьютерной техники мегафакультета Компьютерных технологий и управления  
[ddzhdanov@mail.ru](mailto:ddzhdanov@mail.ru)  
+7(921)7474474

Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО» (Университет ИТМО).

Почтовый адрес: 197101, г. Санкт-Петербург, пр-т Кронверкский, д. 49, лит. А

Телефон: (812) 480-00-00

Веб-сайт: <https://itmo.ru>

Адрес электронной почты: [od@itmo.ru](mailto:od@itmo.ru)