

## ОТЗЫВ

официального оппонента Турлапова Вадима Евгеньевича 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.** В диссертации В.В.Санжарова поставлена весьма амбициозная и комплексная проблема, которую под силу поставить и решать только единицам самых передовых школ компьютерной графики в мире. Уже только новые системные решения в «высокопроизводительном фотореалистичном синтезе изображений» требуют привлечения всех накопленных в этой области знаний, начиная с физических основ до технологий. Дополнение «на GPU» умножает необходимый для решения опыт вдвое. А построение «расширяемой системы» возводит необходимый опыт в квадрат. Представленное в диссертации решение по содержанию превосходит поставленную задачу и представляет собой системно организованную платформу для высокопроизводительного фотореалистичного синтеза изображений 3D сцен, открытую для развития всем слоям пользователей от теоретиков фундаментальной информатики и программистов до сценаристов 3D-видео, художников и специалистов по искусственному интеллекту. Многие отдельные попытки движения в этом направлении отражены в обзоре на 167 источниках. Успешность решения подробно исследована и подтверждена экспериментально. Актуальность такой работы трудно переоценить.

**Структура работы.** Диссертационная работа В.В.Санжарова состоит из введения, пяти глав и заключения. Полный объем диссертации составляет 156 страниц, список литературы - 167 наименований.

Во **Введении** актуальность темы исследования обоснована, опираясь на проблемы, возникающие при разработке систем фотореалистичного рендеринга на GPU в сравнении с решениями на CPU. Затем сформулированы цели и задачи работы, ее научная новизна, теоретическая и практическая значимость, основные положения выносимые на защиту, дана информация о публикациях и апробации работы.

**В первой главе** сформулированы и раскрыты требования к современным приложениям компьютерной графики, которым должна соответствовать и создаваемая система рендеринга. Дана математическая постановка задачи фотореалистичного синтеза изображений. Детально исследованы различные подходы к разработке рендер-систем на GPU. Представлен обзор эволюции аппаратного ускорения трассировки лучей и его влияние на реализацию рендер-системы.

**Во второй главе** предложена и исследована архитектура дополнительного программного слоя, через который расширения пользовательского приложения взаимодействуют с вычислительным ядром рендер-системы. Архитектура предлагаемого интегративного слоя может рассматриваться как объектная база данных с возможностями системы управления версиями и стратегией отсутствия перезаписи при внесении изменений. Архитектура удовлетворяет всем требованиям Главы 1. Исследование дано на фоне анализа возможностей форматов данных ориентированных на обеспечение расширяемости систем рендеринга (OpenCollada, glTF, JSON, Alembic), а также открытой системы-технологии USD (Universal Scene Description), ориентированной на расширение описания 3D сцен.

**В третьей главе** предложен новый алгоритм оценки достаточности разрешения текстур и исследована его реализация, как пример развития вспомогательной рендер-системы, взаимодействующей с вычислительным ядром только через описанную в главе 2 интеграционную программную архитектуру. Сформулирована и доказана теорема. Итоговая текстура включена в задачу параметризации ДФР текстурами (3-1). Показано, что использование алгоритма позволяет снизить затраты памяти в  $1.6 \div 4$  раза по сравнению с подходом, где разрешение задается 3D-художником.

**В четвертой главе** на фоне исследования понятия и арсенала существующих методов расширяемости в программировании, предложен новый подход для расширения функциональности GPU рендер-системы. Дано подробное математическое представление предлагаемых пользовательских расширений и описание программного решения на основе концепции нескольких «убер-ядер». Решение использует ПО на языках C++/C, OpenCL C и графический API Vulkan, который принимает на вход шейдеры скомпилированные в итоге в промежуточный язык SPIR-V и использующие RTX конвейер аппаратной трассировки лучей. Реализована поддержка новых геометрических моделей, параметров материалов и

процедурных текстур. Сделаны экспериментальные оценки, показавшие, что подход для реальных сложных текстур работает эффективнее, чем существующие.

**В пятой главе** описана интеграция GPU рендер-системы в программные продукты для создания 3D сцен, реализована ее интеграция в состав открытой рендер-системы Hydra Renderer, а также в программный комплекс для генерации датасетов синтетических изображений для задач машинного обучения в компьютерном зрении. Приведены многочисленные примеры синтеза изображений высокого класса качества.

**Научная новизна.** Считаю, что реальная научная новизна шире, чем сформулирована в работе и может быть сформулирована следующим образом:

1. Новая концепция расширения и развития GPU/CPU рендер-системы (графической системы) на основе интеграционного промежуточного программного слоя, который обеспечивает конвертацию расширений, описанных в XML-формате, в формат отдельного «убер-ядра». Концепция обеспечивает расширяемость, межплатформенность, отладку, распределенный рендеринг (в RTX технологии на основе SPIR-V), универсальность относительно профессии пользователя, не требуя разработки и использования новых языков и компиляторов для них.

Концепция расширения в виде составных частей также включает в себя новые:

2. Архитектуру интеграционного слоя, обеспечивающего изоляцию/интеграцию расширений относительно основного ядра GPU-системы фотореалистичного рендеринга, структуру его входа и выхода. Реализованы расширения для поддержки новых геометрических моделей и новых математических моделей параметризации двунаправленной функции рассеяния (ДФР) текстурами.
3. Алгоритм определения достаточности разрешения для процедурных и обычных текстур, позволяющий от 1.6 до 4 раз снизить затраты памяти GPU.

**Практическая значимость.** Предложенные в работе подходы и алгоритмы имеют практическое значение в области разработки программного обеспечения фотореалистичного синтеза изображений. Разработанная программная архитектура позволяет упростить процесс интеграции рендер-систем с приложениями по созданию 3D-сцен. Алгоритм определения разрешения позволяет использовать в GPU рендер-системе различные существующие инструменты генерации процедурных текстур, а способ

разработки расширений – легко создавать новые приложения для любых прикладных задач. Продемонстрирован пример создания приложения для синтеза серий изображений с целью генерации обучающих датасетов для решения задач компьютерного зрения методами искусственного интеллекта.

**Достоверность результатов.** Результаты исследования опубликованы в 8 печатных работах из перечня ВАК, среди них 5 индексированы в Scopus и 6 в Web of Science, докладывались на российских и международных конференциях.

#### **Недостатки и замечания по диссертационной работе.**

К работе имеются следующие замечания:

1. Вместо используемого в работе термина «скорость расчета» представляется более уместным использовать термин «производительность вычислений».
2. В таблице 2, стр. 93, не прокомментировано для чего приведена колонка MSE (HDR), если оценка PSNR (LDR), приведена только для MSE (LDR).
3. В формулах (4-2), (4-3), (4-8) Главы 4 диссертации, а также в комментариях к (3-3) и формуле (2) автореферата, включающих текстуры  $T_i$  или  $t_i$  как параметры ДФР, стоило бы заменить индекс текстуры с  $i$  на другой, например на  $j$ , чтобы не путать с индексом направления лучей, приходящих в  $x$ , в уравнении рендеринга (1-1), (3-1).

**Заключение.** Указанные недостатки не влияют на общую положительную оценку работы. Диссертационное исследование В.В.Санжарова является законченным самостоятельным научным исследованием, содержит новые научные результаты соответствующие специальности 2.3.5. Результаты диссертации полно представлены в публикациях и правильно отражены в автореферате. Автореферат соответствует тексту диссертации.

Работа «Разработка расширяемой системы фотореалистичного рендеринга на GPU» удовлетворяет всем требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Санжаров Вадим Владимирович, заслуживает присвоения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 2.3.5 – «Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей».


Отзыв составил официальный оппонент **Турлапов Вадим Евгеньевич**, доктор технических наук по специальности 05.01.01 – «Инженерная геометрия и компьютерная графика», доцент, профессор кафедры математического обеспечения и суперкомпьютерных

технологий (МОСТ) Института информационных технологий, математики и механики (ИИТММ) Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования "Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского" (ННГУ); руководитель лаборатории компьютерной графики и мультимедиа кафедры МОСТ ИИТММ; соруководитель магистерской программы «Искусственный интеллект» ИИТММ.

603022, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23, Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

E-mail: vadim.turlapov@itmm.unn.ru Тел: +7 (903) 040-84-01

«12» октября 2023 г.



В.Е. Турлапов

Подпись Турлапова В.Е. удостоверяю:

Старший преподаватель по организационной и кадровой работе ННГУ



«12» октября 2023 г.

