

Отзыв официального оппонента на диссертационную работу
Щербакова Александра Станиславовича
"Разработка и исследование методов вычисления глобального освещения
на графических процессорах",
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-
математических наук по специальности
2.3.5 Математическое и программное обеспечение вычислительных систем,
комплексов и компьютерных сетей

В исследовании А. С. Щербакова рассматривается проблема вычисления глобального освещения в контексте приложений, требующих высокой скорости вычислений. Решение этой задачи считается важной составной частью процесса создания реалистичных изображений. Однако основная сложность данной задачи заключается в приближенных вычислениях рекуррентных интегралов для каждого пикселя экрана в условиях разнообразной геометрии сцены. Существующие решения в данной области обладают рядом существенных недостатков. Они, например, не всегда способны обеспечить достаточно высокое качество результата, когда время на обработку ограничено длительностью одного кадра, особенно в случае приложений виртуальной реальности.

Помимо этого, различные методы также могут порождать свои виды артефактов, связанные с упущенными деталями геометрии сцены. Для разрешения подобных проблем А. С. Щербаков предлагает новый подход к вычислению глобального освещения. Его метод основан на предварительной подготовке сцены и распределении вычислительных нагрузок между кадрами. Реализация этой концепции включает в себя набор методов и алгоритмов, реализованных при помощи графического API Vulkan. Данный набор методов позволяет ускорить вычисление глобального освещения в сравнении с другими современными методами, сохраняя качество на схожем уровне.

Диссертационная работа Щербакова А. С. состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы.

Во введении обосновывается актуальность исследуемой темы, а также формулируются цель и основные задачи исследования, направленные на ее достижение. В этой же части выделяется новизна подхода, а также указывается как теоретическое, так и практическое значение исследования. Основные тезисы, которые будут обсуждаться далее в работе, также описываются с целью последующей защиты.

В первой главе производится введение в предметную область и проводится анализ основных литературных источников, посвященных проблеме глобального освещения. В данной главе также представлены определения ключевых терминов и понятий, а также введены основные математические модели и рассмотрены базовые алгоритмы вычисления глобального освещения.

Во второй главе проводится детальный обзор имеющихся литературных источников, посвященных теме исследования. В этом разделе также освещается текущий статус разработок в области методов вычисления освещения на графических процессорах. В конце главы обосновывается выбор метода излучательности в качестве базового метода для исследования.

В третьей главе описывается метод матрицы нескольких отражений, предложенный автором работы. Метод позволяет учитывать множественные переотражения света в сцене без дополнительных накладных расходов за счёт нового подхода к этапу предобработки сцены. Вначале математически обосновывается метод, требующий единственного умножения матрицы на вектор в момент визуализации. Далее рассматриваются ограничения связанные с увеличением потребления памяти при использовании подхода, для которых предлагаются алгоритмические решения. В заключении проводится сравнение данного метода с базовым и с методом объемов распространения света, где показывается значительное преимущество предложенного подхода в скорости при незначительных потерях в точности.

Четвертая глава посвящена методу локальной матрицы, который решает актуальную проблему вычисления освещения для сцен большого масштаба.

Рассматриваемый подход идейно схож с алгоритмами, работающими на воксельных сетках, но суть его заключается в решении задачи обновления матрицы форм-факторов, которая актуальна для алгоритмов, построенных на базе метода излучательности. Для предложенного метода подробно описаны подходы к обновлению множественных отражений в матрице форм-факторов и показано превосходство в скорости относительно базового метода.

В пятой главе описывается метод виртуальных площадок, который предлагает оригинальное решение для применения метода излучательности к объектам с высокой детализацией. Вместо традиционного подхода — генерации упрощённой геометрии, автор указывает, какие из данных необходимы для вычисления освещения и предлагает алгоритмы для вычисления именно этих данных на базе исходной геометрии сцены.

В заключительной шестой главе описывается метод темпоральной излучательности. Этот подход решает известную проблему темпальных артефактов, присущую алгоритмам на базе метода излучательности. Предложенное решение использует новую интерпретацию значений форм-факторов в качестве плотности вероятности, что позволяет значительно упростить операцию умножения матрицы на вектор для вычисления освещения. В конце главы проводится сравнение предложенного метода с классическим методом излучательности и методом RTXGI, где показывается преимущество предложенного метода в скорости и точности (при сравнении с RTXGI).

Новые научные результаты исследования, предложенные автором, таковы:

- предложен метод матрицы нескольких отражений — новый подход к предварительной подготовке сцены с вычислением матрицы форм-факторов, позволяющий вычислять глобальное освещение одним умножением матрицы на вектор. Ключевой особенностью метода является избавление от линейной зависимости сложности от числа переотражений, что в комбинации с переупорядочиванием площадок и компрессии матрицы

ускоряет вычисления в 10 раз (для 3 переотражений) практически без накладных расходов по памяти;

- предложен метод локальной матрицы – новый метод эффективного пересчета данных матрицы форм-факторов для метода излучательности при движении камеры, обеспечивающий потоковую обработку данных для сцен большого масштаба и сокращающий вычисления в 6–15 раз;
- предложен метод виртуальных площадок – новый подход к построению прокси-геометрии, основанной на виртуальных площадках, в которые могут попадать точки различных полигонов, кластеризуемые с использованием разработанной в работе метрики близости (учитывает цвет, нормаль и форм-факторы). Предложенная прокси геометрия, не имея представления в виде полигональной сетки, все еще позволяет вычислять освещение с высокой точностью на существенно сокращенном (например, с 200000 до 12000) количестве элементов.
- предложен метод темпоральной излучательности – новый алгоритм вычисления вторичного освещения, основанный на форм-факторах, позволяющий распределить основную нагрузку вычислений между множеством кадров с использованием алиас-таблиц, тем самым ускоряющий вычисления до 100 раз по сравнению с базовым методом излучательности.

Эти методы суммарно обеспечивают ускорение до 100 раз при сохранении точности (SSIM отличается не более чем на 0.04 от эталона на рассматриваемых примерах данных).

Достоверность полученных результатов обосновывается теоретическим обоснованием и проведенным экспериментальным исследованием с использованием различных 3D-сцен.

Практическая значимость заключается в том, что предложенные методы хорошо абстрагированы от остальных систем, использующихся в визуализации, что позволяет интегрировать их в различные графические приложения без

ограничений на их архитектуру и получить глобальное освещение с высокой точностью и скоростью, достаточной в том числе и для приложений виртуальной реальности. Помимо этого, разработанные подходы применимы к широкому спектру вычислительных устройств.

К содержанию работы есть следующие замечания:

1. В работе рассмотрено влияние динамических объектов и источников света на расчет глобального освещения, однако отсутствует четкое описание механизма применения вычисленных значений освещения непосредственно к самим движущимся объектам: каким образом передается освещение от статической сцены к динамическим моделям, как обрабатываются границы между статическими и движущимися элементами, какие используются методы интерполяции и фильтрации освещения при анимации.
2. Терминология иногда неоднозначна: "упрощенная геометрия" и "прокси-геометрия" порой используются как синонимы, несмотря на различия в их концепциях. Уточнение используемой терминологии повысило бы точность научного изложения.
3. В описании метода виртуальных площадок отсутствует иллюстрация результирующих виртуальных площадок после кластеризации, хотя бы для какой-то тестовой, упрощенной сцены, что было бы полезно для лучшего понимания работы метода.
4. Некоторые рисунки, демонстрирующие сравнение работы методов (рис. 4.9, 4.10, 4.11, 5.3, 5.4), недостаточно наглядны. Стоило выбрать более яркую цветовую схему для разностного кадра, либо выделить ключевые различия стрелками в случае отсутствия разностного кадра.

Однако, указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования.

Диссертационная работа отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М. В. Ломоносова к

работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует специальности 2.3.5 Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей (по физико-математическим наукам), а также критериям, определённым пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М. В. Ломоносова, а также оформлена согласно требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова.

Таким образом, соискатель Щербаков Александр Станиславович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 2.3.5 Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей.

Официальный оппонент:

кандидат физико-математических наук

старший научный сотрудник

лаборатории математических методов обработки изображений

кафедры математической физики

факультета вычислительной математики и кибернетики

Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова

Сорокин Дмитрий Васильевич

«28» мая 2025 г.

Контактные данные:

Тел.: +7 (495) 939-11-29 email: dsorokin@cs.msu.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом была защищена

диссертация: 05.13.18 Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

Адрес места работы: 119991, Россия, Москва, Ленинские горы, 1с52, ауд. 538.

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова.

Тел.: +7 (495) 939-11-29 email: dsorokin@cs.msu.ru