

ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора технических наук

Конопацкого Евгения Викторовича

на диссертацию Шуткина Василия Николаевича

«Метод иерархических динамических уровней детализации для рендеринга больших трехмерных сцен с детерминированной динамикой»,

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. Рендеринг сложных трёхмерных сцен является одной из фундаментальных и наиболее актуальных проблем современной компьютерной графики. Эта проблема приобретает особую значимость в таких областях, как научная визуализация, автоматизированное проектирование (CAD/CAM/CAE), создание цифровых двойников, разработка компьютерных игр и анимации, виртуальной и дополненной реальности. В каждом из этих направлений предъявляются высокие требования к качеству визуализации, производительности и интерактивности работы с графическими данными.

Сложность современных трёхмерных сцен обусловлена множеством факторов: значительным числом объектов с индивидуальными геометрическими моделями, разнообразием аналитических и приближённых представлений, высокой степенью детализации материалов и текстур, а также сложной композицией и динамикой объектов. С ростом вычислительных мощностей графических процессоров и кластерных систем увеличиваются потребности в математическом и программном обеспечении для реализации более сложных сцен с высокой частотой кадров и без потери визуального качества.

Для решения этих задач применяются различные методы оптимизации рендеринга, включая отсечение невидимых объектов, выделение значимых элементов сцены, использование уровней детализации, а также оптимизацию графического конвейера и балансировку нагрузки между центральным и графическим процессорами. Среди современных подходов особое место занимают иерархические уровни детализации, которые обеспечивают эффективное масштабирование и позволяют хранить представления сцены во внешней памяти.

Существующие методы иерархических уровней детализации (HLOD) хорошо зарекомендовали себя для статических сцен, но практически не

применимы к динамическим сценам с детерминированными изменениями (появление/исчезновение объектов, движение техники, поэтапное строительство) из-за высоких вычислительных затрат на перестроение структур. Диссертация соискателя направлена на устранение этого разрыва, что делает работу актуальной как с научной, так и с практической точки зрения.

Диссертационная работа Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения, списка литературы из 135 источников и приложения А из 5 подпунктов. Общий объем диссертационной работы составляет 161 страницу.

Во введении обоснована актуальность темы исследования, определены и сформулированы цель и задачи исследования, представлены научная новизна, теоретическая и практическая значимость результатов исследования, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава содержит обзор методов удаления невидимых поверхностей, уровней детализации (дискретных, непрерывных, зависящих от камеры, иерархических) и техник упрощения полигональных сеток. Показано, что существующие HLOD (Hierarchical Level of Detail) неэффективны для сцен с высокой динамикой.

Вторая глава вводит формальное определение динамической сцены, классификацию объектов (статические, псевдо-динамические, динамические) и сам метод HDLOD (Hierarchical Dynamic Level of Detail). Описаны функции присутствия $p_c(t)$, движения $m_c(t)$, погрешности $\delta_c(t)$ и ограничивающего объёма. Представлен алгоритм рендеринга HDLOD и многовариантная модификация.

Третья глава посвящена генерации HDLOD: построению дерева кластеров снизу-вверх с учётом пространственно-временной близости, кластеризации с контролем размера и временного расхождения, полигональному упрощению (объединение вершин в радиусе ϵ с доказательством погрешности по Хаусдорфу), удалению внутренних граней и построению текстурных атласов. Рассмотрены инкрементальные обновления.

В четвертой главе описан рендеринг HDLOD во внешней памяти: разделение на скелет и содержимое, консервативный режим (гарантия качества) и интерактивный (поддержка частоты кадров), а также политику кэширования LRU. Приведены оценки сложности алгоритмов.

Пятая глава описывает программную реализацию на C++/OpenGL, расширение формата 3D Tiles, модули генератора и рендерера, а также импорт из IFC, CityGML и распространённых 3D-форматов.

Шестая глава содержит результаты вычислительных экспериментов: масштабируемость (ускорение в 100+ раз при удалении камеры), сравнение

консервативного и интерактивного режимов, влияние параметров (размер кластера, прогрессия, относительная погрешность), сравнение с Cesium Ion (преимущество HDLOD в производительности на крупных моделях), эффективность распараллеливания (ускорение до 3,6 раз) и удаления внутренних граней (сокращение объёма данных до 50%).

В седьмой главе приведены три внедрения: сервис управления замечаниями (BCF), система Synchro 4D и веб-приложение для градостроительного планирования.

В заключении перечислены полученные автором основные научные результаты и сформулированы выводы.

Оппонируемая диссертационная работа имеет стройную структуру, реализованную соискателем в четкой логической последовательности. Работа изложена хорошим научно-техническим языком и оформлена в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.11-2011 «Диссертация и автореферат диссертации».

Основные результаты диссертации опубликованы в 11 научных работах, из них 2 работы – в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 5 работ – в журналах, индексируемых в международных наукометрических базах Web of Science и Scopus, а также 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Результаты исследования в достаточной степени докладывались и обсуждались на научных и научно-практических конференциях разного уровня.

Научная новизна. В качестве основных научных результатов, полученных лично соискателем, можно выделить следующие:

1. Выделен и формально описан класс полигональных сцен с детерминированным дискретно-непрерывным характером динамики, для которого введены функции присутствия и движения объектов, а также метрики временного расхождения и пространственно-временной близости. В отличие от существующих работ по уровням детализации, ограничивающихся статическими сценами или деформируемой геометрией, предложенная классификация впервые позволяет учитывать дискретные события (появление, исчезновение, перемещение объектов) как неотъемлемую часть структуры уровней детализации, что открывает возможность предварительного построения иерархических представлений для сцен с изменяющейся во времени композицией.

2. Предложен метод иерархических динамических уровней детализации HDLOD, в котором каждый кластер дерева наделён зависящими от времени функциями присутствия, движения и геометрической погрешности, а отношение агломерации удовлетворяет свойствам монотонности погрешности

и вложенности ограничивающих объёмов. В отличие от классических иерархических уровней детализации HLOD, не обладающих временной размерностью, метод HDLOD вводит время как самостоятельное измерение иерархии, что позволяет единообразно описывать как упрощение геометрии, так и частичное присутствие объектов, а также доказывать теоретические свойства структуры.

3. Разработан алгоритм генерации HDLOD во внешней памяти, включающий пространственно-временную кластеризацию объектов с контролируемым временным расхождением и полигональное упрощение с доказуемой верхней границей погрешности по метрике Хаусдорфа. В отличие от известных алгоритмов упрощения, не гарантирующих строгого ограничения ошибки, и методов кластеризации, учитывающих только пространственную близость, предложенный подход обеспечивает одновременно формальные гарантии точности упрощённых представлений и возможность объединения объектов со схожим динамическим поведением на ранних этапах построения иерархии.

4. Созданы алгоритмы консервативного и интерактивного рендеринга HDLOD во внешней памяти, реализующие раздельное хранение структурной схемы иерархии (остова дерева кластеров), содержащей только компактные атрибуты (ограничивающие объёмы, функции погрешности и присутствия), и геометрических моделей кластеров, загружаемых асинхронно с использованием LRU-кэширования в основной и видеопамяти, а также возможность переключения между режимом, гарантирующим заданную точность, и режимом, поддерживающим целевую частоту кадров. В отличие от существующих out-of-core решений для HLOD, не рассчитанных на динамические сцены, предложенные алгоритмы впервые обеспечивают эффективную работу с изменяющейся во времени геометрией и поведением объектов, сохраняя при этом масштабируемость на сцены, не помещающиеся в оперативную и видеопамять.

Основные научные результаты, полученные в диссертационной работе, соответствуют паспорту научной специальности 2.3.5 – Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей по: п. 1 – Модели, методы и алгоритмы проектирования, анализа, трансформации, верификации и тестирования программ и программных систем; п. 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; п. 8 – Модели и методы

создания программ и программных систем для параллельной и распределенной обработки данных, языки и инструментальные средства параллельного программирования.

Достоверность научных положений и выводов диссертационного исследования обеспечивается корректностью математической постановки задач, наличием строгих доказательств свойств алгоритмов, репрезентативностью экспериментальных данных, воспроизводимостью методик, согласованностью теоретических и экспериментальных результатов, широкой апробацией и практической реализацией.

Все вводимые понятия и формальные конструкции имеют строгое математическое определение. Класс динамических сцен задаётся через функции присутствия $p_s(t)$ и движения $m_s(t)$. Иерархия HDLOD определяется как дерево кластеров с отношением агломерации, для которого доказаны свойства монотонности погрешности и вложенности ограничивающих объёмов. Метрика временного расхождения $\gamma(O)$ введена через интеграл от разности максимальной и минимальной функций присутствия, что позволяет количественно оценивать степень динамической близости объектов.

Ключевые алгоритмические решения представлены в виде теорем с доказательствами корректности и оценками вычислительной сложности (сложность алгоритма кластеризации, сложность алгоритма полигонального упрощения, корректность алгоритма полигонального упрощения, сложность алгоритма выбора кластеров, корректность алгоритма построения дерева кластеров). Наличие таких доказательств исключает эмпирический характер утверждений и подтверждает обоснованность заявленных свойств.

Экспериментальная часть исследований построена на репрезентативном наборе тестовых сцен, включающем как синтетические модели, так и реальные индустриальные данные: модели небоскрёба (79 396 объектов, 3,6 млн. треугольников), стадиона (52 630 объектов, 9,8 млн. треугольников), бизнес-центра (56 157 объектов, 4,3 млн. треугольников), нефтеперерабатывающего завода (225 305 объектов, 19,7 млн. треугольников), а также городские модели Монреаля и Таллина. Использование реальных проектных данных повышает достоверность выводов о применимости метода в практических задачах.

Используемая соискателем методология проведения вычислительных экспериментов обеспечивает воспроизводимость результатов:

– все эксперименты проводились на фиксированных конфигурациях оборудования с подробным описанием характеристик (процессор, объём памяти, тип накопителя, графический адаптер);

- для каждого эксперимента указаны параметры генерации HDLOD (размер листового кластера, относительная погрешность, прогрессия роста);
- при сравнении с Cesium Ion использовались одинаковые условия: фиксированное положение камеры, предельная экранная погрешность 1 пиксель, два разрешения экрана (HD и 4K);
- для сцен с динамикой модельное время изменялось по единому сценарию с фиксацией моментов измерений (начало, 1/3, 2/3, конец периода, анимация).

Практическое внедрение метода в трёх промышленных системах (сервис управления замечаниями в строительстве, система визуального пространственно-временного моделирования Synchro 4D, веб-приложение для градостроительного планирования) подтверждает работоспособность и применимость разработанных алгоритмов в условиях реальной эксплуатации на больших объёмах данных.

Таким образом, научные положения и выводы диссертационной работы теоретически обоснованы, аргументированы и подтверждены в достаточной степени.

Научная ценность работы и ее практическая значимость. Научная ценность работы определяется введением новых формальных моделей и метрик, а также разработкой алгоритмов с доказанными свойствами, расширяющих теоретический аппарат компьютерной графики в области представления динамических сцен.

Практическая ценность проведенного соискателем исследования подтверждается программной реализацией, экспериментальными результатами и внедрением в промышленные системы.

Разработанный метод и алгоритмы реализованы в виде библиотек на языке C++ с использованием OpenGL, насчитывающих более 19 тыс. строк кода. Предложено расширение формата Cesium 3D Tiles для хранения динамических характеристик кластеров, что обеспечивает совместимость со стандартными средствами визуализации и позволяет использовать HDLOD в существующих геопространственных системах.

Проведённые вычислительные эксперименты на реальных промышленных сценах демонстрируют, что применение HDLOD позволяет достичь рендеринга в реальном времени для моделей, которые без использования уровней детализации не могут быть визуализированы с приемлемой частотой кадров. На сценах, содержащих миллионы треугольников, метод обеспечивает высокую масштабируемость при изменении расстояния до объектов, что подтверждено сублинейным ростом времени рендеринга при увеличении видимого размера сцены на экране.

Сравнение с коммерческим решением Cesium Ion показывает превосходство HDLOD по производительности на крупных моделях, что свидетельствует о практической конкурентоспособности разработанного подхода.

Разработанные алгоритмы консервативного и интерактивного рендеринга во внешней памяти позволяют визуализировать сцены, не помещающиеся в оперативную и видеопамять. Эксперименты показывают, что интерактивный режим обеспечивает сглаживание просадок частоты кадров за счёт управляемой загрузки кластеров, а консервативный режим гарантирует заданную визуальную точность. Возможность переключения между режимами во время исполнения приложения предоставляет разработчику гибкий инструмент балансировки между качеством изображения и производительностью.

Эффективность генерации HDLOD повышена за счёт распараллеливания обработки кластеров одного уровня, что подтверждено экспериментами с ускорением на многоядерных системах. Техника удаления внутренних граней позволяет сократить объём генерируемых данных и время последующего рендеринга, что особенно важно для индустриальных моделей с высокой плотностью внутренних элементов. Инкрементальные обновления HDLOD при локальных изменениях сцены сокращают время регенерации по сравнению с полным перестроением, что критически важно для интерактивных редакторских сред.

Также практическая ценность подтверждается внедрением результатов исследований в три прикладные разработки:

- сервис управления замечаниями в архитектурно-строительных проектах, обеспечивающий веб-рендеринг больших IFC-моделей при работе с замечаниями в формате BCF;

- систему визуального пространственно-временного моделирования индустриальных проектов Synchro 4D, поддерживающая многовариантное отображение сцены с альтернативными расписаниями и стилями;

- веб-приложение для градостроительного планирования, реализующее многоуровневую организацию HDLOD для интеграции моделей городов и детальных моделей зданий.

Замечания по диссертации:

1. В работе отсутствует сравнение с современными методами на основе нейронных сетей (NeRF, 3D Gaussian Splatting). В обзоре упоминаются эти технологии, но в экспериментах нет количественного сравнения с ними. Такое сравнение несомненно усилило бы работу.

2. В диссертации упоминается проблема трещин в контексте Unreal Engine Nanite, но не описывается, почему она не возникает и как

предложенный метод HDLOD её решает. Для полигональных упрощений на границах кластеров это может быть существенным недостатком предложенного метода.

3. Оценка временной погрешности $\delta_c(t)$ (раздел 3.5) использует кусочно-линейную аппроксимацию на основе $p_c(t)$ и w_c . Однако нет анализа того, насколько эта аппроксимация соответствует реальной геометрической погрешности по Хаусдорфу, особенно в динамическом случае.

4. Сравнение программной реализации HDLOD с Cesium Ion (раздел 6.6) не вполне корректно, поскольку Cesium Ion использует другой способ уточнения (ADD против REFINE) и ориентирован на потоковую передачу через сеть, а не на локальный рендеринг. Сравнение производилось в условиях, изначально благоприятных для HDLOD. Более корректным было бы сравнение времени загрузки и объёма переданных данных при одинаковой экранной погрешности.

5. Алгоритм удаления внутренних граней (раздел 6.7.2) показал огромное ускорение генерации, но при малом числе лучей возможно появление артефактов. В диссертации отсутствуют рекомендации по выбору достаточного количества лучей для каждого кластера позволяющего избежать появления артефактов, что снижает практическую применимость результатов исследований.

6. В работе не исследован случай, когда в интерактивном режиме при быстром перемещении камеры или резком изменении модельного времени может потребоваться загрузка множества кластеров, превышающая лимит на кадр, что может привести к появлению артефактов.

7. Имеются определённые издержки стиля и оформления. Список литературных источников в диссертации оформлен с нарушением ГОСТ Р7.0.11-2011.

Приведенные замечания в большей степени относятся к изложению и оформлению материала диссертации и не влияют на общую положительную оценку работы.

Заключение по диссертационной работе. Диссертация Шуткина В.Н. является законченной научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований решена актуальная задача разработки метода иерархических динамических уровней детализации для эффективного рендеринга больших динамических сцен с детерминированным поведением. Работа обладает высоким уровнем научной новизны, теоретической и практической ценностью. Результаты достоверны, апробированы на международных конференциях и опубликованы в 11 работах

(включая издания из перечня ВАК и международные наукометрические базы). По результатам исследования получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Диссертационная работа соответствует паспорту научной специальности 2.3.5. «Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей» и удовлетворяет требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор, Шуткин Василий Николаевич, 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:
д-р техн. наук, профессор

Конопацкий Е.В.

«01» апреля 2026 г.

Конопацкий Евгений Викторович, проректор по научной работе и цифровому развитию федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет».