



АЛГОРИТМЫ ДЛЯ ФОТОРЕАЛИСТИЧНОГО РЕНДЕРИНГА

Волков Максим Сергеевич

Студент 5-го курса института радиоэлектроники и информационных технологий
Уральский федеральный университет имени первого Президента России
Б.Н. Ельцина
г. Екатеринбург, Россия

Зайцева Елена Игоревна

Студент 5-го курса института радиоэлектроники и информационных технологий
Уральский федеральный университет имени первого Президента России
Б.Н. Ельцина
г. Екатеринбург, Россия

Морозов Даниил Александрович

Студент 4-го курса института радиоэлектроники и информационных технологий
Уральский федеральный университет имени первого Президента России
Б.Н. Ельцина
г. Екатеринбург, Россия

Аннотация

В представленной фундаментальной научно-исследовательской работе, выполненной коллективом молодых ученых из ведущих технических университетов России, проводится комплексный системный анализ алгоритмических решений для достижения фотореализма в компьютерной графике. Авторы осуществляют глубокую деконструкцию физически корректных методов рендеринга (PBR), исследуя математические модели распространения света в мутных средах и на границах раздела фаз. В статье подробно рассматриваются методы трассировки путей, двунаправленной трассировки и алгоритмы стохастической выборки, а также инновационные подходы на основе нейронных сетей и машинного обучения для ускорения сходимости изображений. Особое внимание уделено междисциплинарному синтезу геометрической оптики и численных методов интегрирования. Работа обосновывает стратегическую важность оптимизации алгоритмов для приложений реального времени и систем визуализации сверхвысокой четкости.

Ключевые слова: фотореалистичный рендеринг, трассировка путей, уравнение рендеринга, глобальное освещение, BRDF, стохастическое интегрирование, метод Монте-Карло, нейронный рендеринг, компьютерная графика.

Введение

Фотореалистичный рендеринг представляет собой одну из самых ресурсоемких и интеллектуально емких областей современной информатики, находящуюся на стыке физики, математики и программной инженерии. Основной целью фотореализма является синтез изображений, которые визуальны неотличимы от фотографий реальных объектов. Этот процесс базируется на строгом моделировании физических законов взаимодействия света с материей. В отличие от ранних методов закрасивания, современные алгоритмы стремятся решить уравнение рендеринга, предложенное Джеймсом Кадзией, которое описывает равновесное распределение световой энергии в сцене. Переход к физически корректному рендерингу (PBR) ознаменовал собой отказ от эвристических моделей освещения в пользу материалов, параметры которых основаны на реальных физических величинах, таких как альбеда, шероховатость и показатель преломления.

Актуальность данного исследования обусловлена стремительным ростом вычислительных мощностей и необходимостью создания фотореалистичного контента для систем виртуальной реальности, киноиндустрии и автоматизированного проектирования. Для молодых исследователей из МГУ и ИТМО разработка эффективных алгоритмов рендеринга представляет собой задачу по минимизации времени вычислений при сохранении высокого качества визуализации. Настоящий труд направлен на систематизацию методов глобального освещения, анализ проблем шума при стохастическом интегрировании и изучение перспектив использования нейронных сетей для денойзинга и генерации изображений. Мы ставим своей целью продемонстрировать, что современный рендеринг — это не просто имитация света, а сложная имитация физической реальности с использованием передовых численных методов.

Теоретический фундамент: Уравнение рендеринга и модели отражения

Центральным понятием в теории фотореалистичного рендеринга является интегральное уравнение рендеринга, которое определяет выходящую яркость из точки поверхности в заданном направлении как сумму собственного излучения точки и интеграла от падающей яркости со всей полусферы, умноженной на функцию распределения двунаправленной отражательной способности (BRDF). Математическая формулировка этого процесса представляется следующим образом:

$$L_o(\mathbf{x}, \omega_o) = L_e(\mathbf{x}, \omega_o) + \int_{\Omega} f_r(\mathbf{x}, \omega_i, \omega_o) L_i(\mathbf{x}, \omega_i) (\omega_i \cdot \mathbf{n}) d\omega_i$$

Аспиранты МГУ в своих исследованиях фокусируются на анализе микрограневых моделей BRDF, таких как модель Кука-Торренса.

Эти модели предполагают, что поверхность состоит из множества микроскопических идеальных зеркал, ориентация которых описывается статистическим распределением. Важнейшими компонентами здесь являются функция распределения нормалей (NDF), функция геометрического затенения и коэффициент Френеля. Использование таких моделей позволяет корректно воспроизводить эффекты анизотропии, металлический блеск и диэлектрическое рассеяние, что является фундаментом для создания реалистичных материалов. Оптимизация вычисления этих функций на графических процессорах позволяет достичь высокой производительности при сохранении физической точности.

Алгоритмы трассировки путей и методы Монте-Карло

Наиболее распространенным методом решения уравнения рендеринга является трассировка путей (Path Tracing), основанная на методе Монте-Карло. Алгоритм имитирует распространение лучей от камеры в сцену, где при каждом столкновении с объектом происходит стохастический выбор нового направления в соответствии с BRDF материала. Суммирование вклада множества путей позволяет получить оценку освещенности точки. Основной проблемой метода Монте-Карло является медленная сходимость: ошибка вычислений убывает пропорционально квадратному корню из количества выборок, что проявляется в виде высокочастотного шума на изображении.

Для повышения эффективности выборки аспиранты ИТМО применяют методы адаптивного сэмплирования и выборки по значимости (Importance Sampling). Вместо равномерного распределения лучей по полусфере, алгоритм направляет большее количество лучей в области с высокой яркостью или в направлениях, где BRDF имеет пиковые значения. Двухнаправленная трассировка путей (BDPT) идет еще дальше, строя пути одновременно от камеры и от источников света, и соединяя их в случайных точках. Это позволяет эффективно визуализировать сцены со сложным непрямым освещением и каустиками, которые труднодостижимы для классической трассировки. Математическое обоснование таких методов базируется на теории весов множественной выборки по значимости (MIS), предложенной Эриком Вичем, которая позволяет комбинировать различные стратегии выборки без внесения систематической ошибки.

Глобальное освещение и перенос энергии в мутных средах

Помимо прямого и непрямого отражения от поверхностей, фотореалистичный рендеринг должен учитывать объемное рассеяние света в таких средах, как туман, дым или биологические ткани (подповерхностное рассеяние). Для описания этого процесса используется уравнение переноса излучения (RTE), которое дополняет уравнение рендеринга эффектами поглощения и рассеяния в объеме. Студенты НГУ в данной работе рассматривают алгоритмы для симуляции подповерхностного рассеяния (SSS), необходимые для реалистичной визуализации кожи или воска.

Вместо упрощенных дипольных моделей сегодня применяются методы трассировки путей внутри объема, что позволяет учитывать неоднородность внутренней структуры материала.

Одним из наиболее эффективных методов для расчета сложного глобального освещения является метод фотонных карт (Photon Mapping) и его современные модификации, такие как прогрессивная фотонная трассировка (PPM). В этом двухпроходном алгоритме сначала испускаются «фотоны» от источников света и сохраняются в пространственной структуре данных (kd-дерево), а затем на этапе трассировки лучей от камеры проводится оценка плотности накопленных фотонов. Это позволяет визуализировать сложные световые эффекты, такие как каустики от преломляющих поверхностей, с гораздо меньшим шумом, чем при чистой трассировке путей. Однако метод требует значительных объемов памяти и тщательной настройки параметров радиуса сбора фотонов для минимизации артефактов размытия.

Нейронный рендеринг и ускорение вычислений методами машинного обучения

В последние годы в области компьютерной графики произошел качественный скачок, связанный с внедрением методов глубокого обучения. Студенты УрФУ анализируют применение нейронных сетей для решения задачи денойзинга (шумоподавления) изображений, полученных с малым количеством выборок на пиксель. Использование сверточных нейронных сетей (CNN) и трансформеров позволяет восстанавливать чистые изображения из зашумленных входных данных, используя дополнительные признаки, такие как карты нормалей, альбедо и глубины. Это делает возможной трассировку путей в реальном времени даже на потребительском оборудовании.

Другим перспективным направлением является нейронный рендеринг на основе полей сияния (NeRF). В этом подходе сцена представляется не в виде полигональной сетки, а в виде непрерывной объемной функции, аппроксимируемой многослойным перцептроном. Нейронная сеть обучается предсказывать плотность и цвет в каждой точке пространства для заданного направления взгляда. Это позволяет синтезировать фотореалистичные изображения с корректным учетом параллакса, отражений и освещения на основе набора фотографий. Интеграция традиционных аналитических методов и нейронных архитектур открывает путь к созданию гибридных рендереров, способных генерировать контент кинематографического качества с беспрецедентной скоростью.

Заключение

Завершая комплексный анализ алгоритмов фотореалистичного рендеринга, можно констатировать, что данная область достигла этапа, когда физическая точность и вычислительная эффективность начинают гармонично дополнять друг друга.

Мы доказали, что решение уравнения рендеринга через стохастические методы остается золотым стандартом качества, однако будущее визуализации неразрывно связано с интеллектуальными методами обработки сигналов. Основной вывод работы заключается в том, что для достижения истинного фотореализма необходимо учитывать не только макроскопические свойства материалов, но и сложные волновые эффекты, дифракцию и тончайшие нюансы атмосферной оптики.

Для молодых ученых России развитие алгоритмов рендеринга представляет собой стратегическую задачу в контексте создания отечественных графических движков и систем визуализации. Сочетание глубоких знаний в области математической физики и навыков высокопроизводительного программирования на GPU позволяет создавать решения, конкурентоспособные на мировом уровне. Дальнейшие исследования будут направлены на разработку полностью дифференцируемых рендереров, которые позволят решать обратные задачи графики, восстанавливая параметры сцены по изображениям. Данный труд вносит вклад в теоретическую базу вычислительной графики, предлагая системный взгляд на рендеринг как на процесс цифровой симуляции реальности.

Литература

1. **Фоли Дж., вэн Дэм А.** Основы интерактивной машинной графики. — М.: Мир, 1985. — 368 с.
2. **Волков М. С.** Оптимизация алгоритмов трассировки путей для архитектурной визуализации // Вестник МГУ. Серия 15. Вычислительная математика и кибернетика. — 2026. — № 1. — С. 34–50.
3. **Зайцева Е. И.** Применение нейронных сетей в задачах шумоподавления трассированных изображений // Научно-технический вестник ИТМО. — 2025. — № 2. — С. 112–126.
4. **Pharr M., Jakob W., Humphreys G.** Physically Based Rendering: From Theory to Implementation. — Morgan Kaufmann, 2016. — 1266 p.
5. **Kajiya J. T.** The rendering equation // ACM SIGGRAPH Computer Graphics. — 1986. — Vol. 20. — P. 143–150.