

ПОСТРОЕНИЕ ФИЗИЧЕСКИ КОРРЕКТНЫХ МОДЕЛЕЙ РАСЧЕТА ОСВЕЩЕННОСТИ, ФОРМИРУЕМОЙ ОПТИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ, С ПРИМЕНЕНИЕМ ФОТОННЫХ КАРТ

Д.Д. Жданов^{1,2,3}, Г.К. Криммель¹
НИУ ИТМО¹, ИПМ им. М.В. Келдыша², ГОИ им. С.И. Вавилова³

Рассмотрены вопросы компьютерного моделирования и расчета освещенности в сложных сценах с использованием фотонных карт. Предлагаемое решение обеспечивает эффективную и физически аккуратную модель распространения света в сложных сценах и позволяет осуществить компьютерное моделирование за приемлемое время за счет использования графического процессора.

Общее описание

Одним из наиболее распространенных методов компьютерного моделирования глобальной освещенности оптически сложных сцен с неоднозначным направлением распространения лучей является прямая стохастическая трассировка лучей, сохраняющая результат трасс лучей в виде фотонных карт [1, 2]. Фотоны в данном методе — это частицы, переносящие некоторую дискретную порцию световой энергии. Эти фотоны "летают" по сцене, попадают на различные поверхности и продолжают свое распространение, пока не покинут сцену или не поглотятся. Эти точки попадания в объекты сцены, являющиеся результатом трасс лучей, сохраняются в фотонной карте. Для хранения фотонов был использован специализированный вариант k-мерного дерева — kd-дерева. Этот выбор продиктован тем, что, несмотря на трудоемкое построение, он обладает низкими требованиями к памяти, а также для него существует простой и эффективный алгоритм траверса, в том числе и для GPU систем.

Важным достоинством метода фотонных карт является тот факт, что расчеты не зависят от положения камеры, что позволяет во многих случаях рассчитать освещенность всего один раз. Фотонная карта не зависит от вида и может быть вычислена относительно быстро. Это делает ее идеальной для аппроксимации освещенности в сцене, когда вместе с ней используются другие, более точные методы, типа метода прямого вычисления или карты освещенности.

При этом стоит отметить, что в общем случае фотонная карта дает менее точную аппроксимацию освещенности сцены, чем другие методы, особенно когда она содержит мелкие детали. Так, например, карта освещенности строится адаптивно, а фотонная карта — нет. Главным недостатком фотонной карты является граничное смещение. Этот нежелательный эффект особенно виден вокруг углов и граней объектов, которые выглядят темнее, чем должны. Карта освещенности тоже может продемонстрировать граничное смещение, однако ее адаптивная природа позволяет очень сильно уменьшить этот эффект.

Фотонная карта наиболее полезна для интерьерных сцен с искусственным освещением или относительно маленькими окнами, которые в таком случае также могут рассматриваться как источники искусственного освещения. Таким образом данный метод является практически значимым и применяется при проектировании различных оптических устройств.

На начальном этапе работы алгоритма фотоны испускаются из источника света в соответствии с распределением световой энергии у данного источника. Для этого был применен метод прямой стохастической трассировки лучей, также называемый методом Монте-Карло. Метод Монте-Карло моделирует распространение световых лучей (фотонов) от источника света до приемника излучения и тем самым статистически воспроизводит распределение освещенности, интенсивности или яркости на приемнике излучения. В стохастическом методе основные случайные события, влияющие на спектральный состав и параметры распространения луча, это:

1. Случайное излучение света источником.

2. Стохастическое рассеивание света на поверхности.
3. Стохастическое распространение света в среде, моделирующее эффекты объемного рассеивания.

Это позволяет максимально приблизиться к реальному поведению источников освещения и получить физически корректную модель распространения света, исходящего от искусственных источников освещения, в интерьерных сценах.

Метод Монте-Карло является наиболее подходящим методом решения уравнения рендеринга [3], основанного на лучевом методе расчетов:

$$L(\vec{p}, \vec{v}, c) = \tau(\vec{p}, \vec{v}, c) \left(L_0(\vec{p}, \vec{v}, c) + \frac{1}{\pi} \int_{4\pi} BSDF(\vec{p}, \vec{v}, \vec{v}', c) L(\vec{p}, \vec{v}', c) (\vec{n} \cdot \vec{v}') d\omega \right) \quad (1)$$

где:

$L_0(\vec{p}, \vec{v}, c)$ – собственная яркость объекта в точке наблюдения \vec{p} , направлении наблюдения \vec{v} и для компоненты цвета c .

$\tau(\vec{p}, \vec{v}, c)$ – пропускание (прозрачность) среды между наблюдателем и точкой наблюдения,

$BSDF(\vec{p}, \vec{v}, \vec{v}', c)$ – ДФР поверхности от источника освещения \vec{v}' в направлении на наблюдателя,

$L(\vec{p}, \vec{v}', c)$ – яркость внешнего освещения в телесном угле $d\omega$, направленная в точку наблюдения.

\vec{n} – локальная нормаль в точке наблюдения.

В процессе трассировки фотоны ударяются о различные поверхности сцены. В зависимости от свойств материала поверхности, с ними могут происходить разные события: прохождение через поверхность, полное поглощение, зеркальное отражение либо диффузное отражение / пропускание фотона (т.е. его отражение / пропускание в случайном направлении). При взаимодействии фотона с диффузным объектом запись о фотоне сохраняется в обычном списке или массиве. Решение же о том, какое из событий происходит с фотоном в результате диффузного отражения, принимается на основании метода «русской рулетки».

После завершения трассировки фотонов необходимо произвести непосредственно построение фотонной карты, которая представляет собой специальную структуру распределения фотонов на поверхностях сцены. Данный этап позволяет избежать значительных вычислительных затрат, поскольку если бы фотоны просто сохранялись в виде массива или списка, то к ближайших фотонов к текущему каждый раз приходилось бы вычислять перебором, что значительно снижает быстродействие алгоритма.

В ходе выполнения данной работы был использован специализированный вариант k-мерного дерева – kd-дерево для хранения фотонов. Kd-дерево представляет из себя несбалансированное бинарное дерево, разбивающее пространство плоскостями, параллельными осям координат, и предназначено для упорядочивания точек в k-мерном пространстве. Данная структура позволяет значительно снизить вычислительную сложность построения модели освещенности, поскольку в отличие от простого перебора, имеющего квадратичную трудоемкость, kd-деревья позволяют выполнить поиск диапазона за $O(n^{1-1/k})$.

Алгоритм построения kd-дерева можно представить следующим образом (будем называть прямоугольный параллелепипед англоязычным словом "бокс").

1. "Добавить" все примитивы в ограничивающий бокс, т.е. построить ограничивающий все примитивы бокс, который будет соответствовать корневому узлу дерева.
2. Если примитивов в узле мало или достигнут предел глубины дерева, завершить построение.
3. Выбрать плоскость разбиения, которая делит данный узел на два дочерних. Будем называть их правым и левым узлами дерева.
4. Добавить примитивы, пересекающиеся с боксом левого узла в левый узел, примитивы, пересекающиеся с боксом правого узла в правый.
5. Для каждого из узлов рекурсивно выполнить данный алгоритм начиная с шага 2.

Наиболее сложным в построении kd-дерева является выбор плоскости разбиения узла. От него напрямую зависит эффективность ускоряющей структуры. В ходе данной работы был выбран метод выбора разбиения плоскости, который основан на введении функции стоимости прослеживания, отражающей, насколько затратным по вычислительным ресурсам проследить данный узел. Тогда для нахождения оптимальной плоскости его разбиения нам необходимо найти минимум функции стоимости. Данную функцию предлагается вычислять следующим образом:

$$f(x) = E_c + S_{Left} * N_{Left} + S_{Right} * N_{Right} \quad (2)$$

где E_c – стоимость прослеживания пустого узла (некоторая константа), S – площадь поверхности соответствующего узла, а N – число примитивов в нем.

Весьма вероятными кандидатами на минимум данной функции могут служить границы примитивов. Простой алгоритм построения выглядит следующим образом. Каждый раз при выборе плоскости нужно перебрать все возможные границы примитивов по трем измерениям, вычислить в них значение функции стоимости и найти минимум среди всех этих значений. Когда мы вычисляем функции стоимости прослеживания для каждой плоскости, то нам необходимо знать количество примитивов справа и слева от плоскости. Если вычислять N простым перебором, в итоге получится квадратичный по сложности алгоритм построения. Введение функции стоимости прослеживания порождает более интеллектуальный критерий остановки, чем предел глубины дерева или малое количество примитивов. Если для выбранной плоскости разбиения суммарная стоимость прослеживания дочерних узлов больше, чем стоимость прослеживания текущего узла как листа, то построение дерева следует остановить.

По завершении построения фотонной карты осуществляется считывание освещенности с поверхностей сцены. Для этого предлагается использовать распределенную трассировку лучей с тем отличием, что каждый раз при ударе луча о поверхность необходимо выполнить сбор освещенности в этой точке, найдя k ближайших фотонов, суммировав их энергию и поделив полученную энергию на площадь поверхности сферы, радиус которой равен расстоянию от текущего до самого дальнего фотона. Алгоритм, таким образом, динамически выбирает радиус сбора: там, где фотонов много, радиус сбора маленький, где мало – большой, что позволяет добиться равномерного уровня шума для всего изображения. Альтернативой данному подходу может служить использование константного радиуса сбора и искать не k ближайших фотонов, а собирать освещение со всех фотонов, попавших в сферу заданного радиуса. Но такой метод дает больший шум

На практике фотонные карты применяют для вычисления каустиков и вторичной освещенности с использованием кэша излучения и финального сбора. Для вычисления интеграла освещенности непосредственно их обычно не применяют, так как это дорого по вычислительным ресурсам (нужно очень много фотонов для получения приемлемого результата – как минимум несколько миллиардов даже для относительно малых сцен), изображение получается шумное и наблюдается характерный артефакт – потемнение краев. Потемнение краев наблюдается по той причине, что на границах поверхности сбор освещенности происходит только с части сферы, а результат делится на площадь поверхности всей сферы. Чтобы устранить шум и убрать темные края, необходимо применять метод финального сбора.

При использовании этого метода сами фотонные карты задействуются только для вычисления непрямои освещенности. Тени, отражения и другие эффекты (кроме каустиков, разумеется, для которых финальный сбор не нужен) рассчитывают при помощи распределенной трассировки лучей или какого-нибудь другого метода. Вместо непосредственного сбора освещенности с фотонов в методе финального сбора из заданной точки испускается некоторое число лучей по полусфере, и освещенность собирается уже в тех местах, куда попали лучи. Как правило нужно трассировать значительно меньше лучей, чем в трассировке путей.



Рис. 1. Результат выполнения метода фотонных карт

Метод вычисления глобального освещения с использованием фотонных карт является практически значимым и применяется при проектировании различных технических устройств. Его основными достоинствами являются универсальность и физическая корректность результата вычисления интеграла освещенности в самом общем случае и тот факт, что фотонная карта может быть вычислена относительно быстро. Это делает его идеальным для аппроксимации освещенности в сцене, когда вместе с ним используются другие, более точные методы, такие как метод прямого вычисления или карты освещенности. Несмотря на некоторые ограничения и ряд недостатков, данный метод позволяет получить результат за приемлемое время с достаточной точностью и применим для решения достаточно широкого спектра практических задач проектирования сложных оптических систем.

Литература

- [1] Henrik Wann Jensen, Per Christensen. High quality rendering using ray tracing and photon mapping /SIGGRAPH '07.
- [2] Toshiya Nishisaka and Henrik Wann Jensen. Stochastic progressive photon mapping. ACM Trans. Graph., 28(5):1–8, 2009.
- [3] Kajiya, J. T. The rendering equation / Siggraph 1986: 143.