

01, январь 2016

УДК 004.925.3

Использование метода фотонных карт при построении трехмерных изображений

***Руднев Д.Н.**, студент*

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Программное обеспечение ЭВМ и информационные технологии»*

***Пахомов А.А.**, студент*

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Программное обеспечение ЭВМ и информационные технологии»*

Научный руководитель: Волкова Л.Л., ассистент

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Программное обеспечение ЭВМ и информационные технологии»*

lvolkova@bmstu.ru

Введение

Для создания реалистичных изображений необходимо использование алгоритмов, которые могут учитывать не только свет, напрямую исходящий из источника света, но и не прямое освещение, проявляющееся в зеркальном и диффузном отражении, а также в преломлении света и наличии теней. Подобные алгоритмы называются алгоритмами глобального освещения. Это те алгоритмы, которые опираются на физические основы для более реалистичной имитации света.

Было разработано множество подобных алгоритмов. Большая часть из них основывается на одной из двух базовых технологий: точечная выборка (трассировка лучей) и конечные элементы (излучение). Стоит отметить, что существуют гибридные методы, сочетающие в себе обе базовые технологии.

Метод фотонных карт использует другой подход, заключающийся в отделении информации об освещенности от геометрии сцены, сохраняя ее в отдельной структуре данных — “фотонной карте”, которая содержит информацию о столкновениях фотонов, излученных источниками света, с поверхностями. Разделение фотонной карты и геометрии сцены позволяет не только упростить расчеты, но и получить возможность эффективно визуализировать сцены со сложной геометрией. Алгоритм, объединяющий метод фотонных карт и обратную трассировку лучей, позволяет эффективно получать

реалистичные результаты, которые также близки к физической модели. Алгоритм состоит из двух частей: сначала строится фотонная карта, получаемая из трассировки фотонов по сцене и занесения их взаимодействия с поверхностями в карту, далее освещение рассчитывается обратной трассировкой лучей, использующей информацию, предоставляемую фотонной картой.

Можно отметить многочисленные преимущества этого метода. Метод является алгоритмом глобального освещения и приближенно решает уравнение рендеринга. Разделение информации об освещении и геометрии сцены позволяет рассчитывать части уравнения рендеринга отдельно и хранить в различных картах, что повышает удобство и эффективность расчетов. И это означает, что при передвижении наблюдателя необходимо будет лишь провести сбор освещенности с фотонной карты на этапе рендеринга, а не выполнять алгоритм полностью каждый раз. Также метод позволяет визуализировать преломление света через прозрачные объекты с образованием каустики, что не могут рассчитать методы трассировки лучей.

Общая схема алгоритма

Выделяют два основных этапа выполнения алгоритма:

1. Трассировка фотонов:
 - 1.1. Излучение фотонов из источников света;
 - 1.2. Построение фотонной карты. На данном этапе определяется состояние фотона после столкновения. Фотон может быть рассеян в пространстве, зеркально отражен, поглощен;
2. Моделирование сцены с использованием информации, хранящейся в фотонных картах.

Излучение фотонов

Фотоны создаются непосредственно в координатах источника света. Свет моделируется с помощью типичных для компьютерной графики точечного, направленного или квадратного источников света (рис. 1).

Для точечного источника излучение каждого фотона происходит в одном из случайных направлений, равномерно распределенных по сфере от положения источника. Фотоны из квадратного источника излучаются в случайном направлении, ограниченном полусферой. При этом удобно использовать выборку с отклонением для генерации направлений. Для точечного источника измеряются значения трех случайных величин, равномерно распределенных на $[0, 1]$. Если точка, составленная из этих значений,

попадает внутрь единичной сферы, то фотон излучается. И так происходит, пока не будут излучены все фотоны.

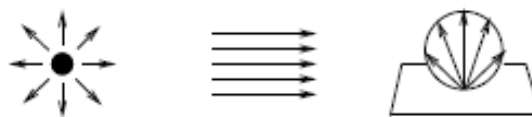


Рис. 1. Излучение фотонов из источника света: точечного, направленного, квадратного

Трассировка фотонов

Излученные фотоны прослеживаются методом, похожим на трассировку лучей. Фотон перемещается до столкновения с объектом сцены. При столкновении фотон может быть отражен, преломлен или поглощен. Решение производится эффективным методом «Русской рулетки».

Рассмотрим материал с коэффициентами диффузного отражения d , зеркального — s , пропускания — t , таких что $d + s + t \leq 1$. Также выберем равномерно распределенную случайную величину $\xi \in [0, 1]$. Можно принять следующие решения:

- $\xi \in [0, d]$ — диффузное отражение;
- $\xi \in (d, d + s]$ — зеркальное отражение;
- $\xi \in (d + s, d + s + t]$ — преломление;
- $\xi \in (d + s + t, 1]$ — поглощение.

Процесс трассировки (задается глубина трассировки, по истечении которой процесс прекращается) состоит из следующих этапов:

1. Найти ближайшее пересечение фотона с объектом сцены.
2. Получить результат — столкновение, с помощью метода “Русской рулетки”
 - 2.1. Рассеивание — добавить фотон к фотонной карте, изменить направление, цвет и координаты, продолжить трассировку.
 - 2.2. Отражение, преломление аналогично рассеиванию, но не добавлять фотон к карте.
 - 2.3. Поглощение — добавить фотон к карте, завершить трассировку.

При расчете каустики к фотонной карте добавляются только фотоны, испытавшие зеркальное отражение или преломление и столкнувшиеся с рассеивающей поверхностью.

Построение фотонной карты

Фотоны сохраняются в карте только тогда, когда они сталкиваются с незеркальными поверхностями, так как хранение фотонов, попавших в зеркальные объекты, не дает полезной информации для рендеринга, — это можно рассчитать трассировкой лучей на этапе визуализации. При каждом взаимодействии фотона с поверхностью в карту заносятся координаты фотона, мощность и направление. Для более эффективного расчета фотонная карта разделяется на несколько подкарт:

- *глобальная карта* содержит взаимодействия со всеми диффузными поверхностями;
- *карта каустики* содержит фотоны, которые претерпели хотя бы одно зеркальное отражение или преломление перед взаимодействием с рассеивающей поверхностью.

Оценка яркости

Фотонная карта может быть рассмотрена как представление поступающего потока энергии, таким образом, для расчета энергетической яркости необходимо проинтегрировать эту информацию:

$$L_r(x, \vec{\omega}) = \int_{\Omega_x} f_r(x, \vec{\omega}', \vec{\omega}) L_i(x, \vec{\omega}') (\vec{n}_x \times \vec{\omega}') d\vec{\omega}' \quad (1)$$

где L_r — отраженная светимость в x в направлении $\vec{\omega}$. Ω_x — сфера поступающих направлений, f_r — BRDF (bidirectional reflectance distribution function, двулучевая функция отражающей способности) в x , L_i — поступающая яркость. Для нахождения значения интеграла необходимо знать поступающую энергетическую яркость, для этого используется информация из фотонной карты:

$$L_i(x, \vec{\omega}') = \frac{d^2 \Phi_i(x, \vec{\omega}')}{(\vec{n}_x \times \vec{\omega}') d\vec{\omega}'_i A_i} \quad (2)$$

Подставим выражение (2) в формулу (1) и получим:

$$L_r(x, \vec{\omega}) = \int_{\Omega_x} f_r(x, \vec{\omega}', \vec{\omega}) \frac{d^2 \Phi_i(x, \vec{\omega}')}{(\vec{n}_x \times \vec{\omega}') d\vec{\omega}'_i dA_i} (\vec{n}_x \times \vec{\omega}') d\vec{\omega}'_i =$$

$$\int_{\Omega_x} f_r(x, \vec{\omega}', \vec{\omega}) \frac{d^2 \Phi_i(x, \vec{\omega}')}{dA_i}$$

Приближенное значение поступающего потока рассчитывается из фотонной карты путём нахождения n фотонов, расположенных наиболее близко к x . Каждый фотон p

имеет мощность $\Delta\Phi_p(\omega_p)$. При предположении, что фотон пересекает поверхность в x , получаем:

$$L_r(x, \vec{\omega}) \approx \sum_{p=1}^N f_r(x, \vec{\omega}_p, \vec{\omega}) \frac{\Delta\Phi_p(x, \vec{\omega}_p)}{\Delta A}$$

Расчет может быть представлен как процесс расширения сферы в x , пока в нее не попадет n фотонов. Вводя допущение, что поверхность вблизи x локально плоская, можно найти $\Delta A = \pi r^2$, где r – радиус сферы, т.е. расстояние между x и самым дальним фотоном.

В результате:

$$L_r(x, \vec{\omega}) \approx \frac{1}{\pi r^2} \sum_{p=1}^N f_r(x, \vec{\omega}_p, \vec{\omega}) \Delta\Phi_p(x, \vec{\omega}_p)$$

Точность зависит от количества используемых фотонов, и сфера может включать в себя лишние фотоны в углах и на краях объектов, но размер ошибочных регионов уменьшается с ростом числа фотонов.

Если устремить число фотонов в бесконечность, получим:

$$\lim_{N \rightarrow +\infty} \frac{1}{\pi r^2} \sum_{p=1}^N f_r(x, \vec{\omega}_p, \vec{\omega}) \Delta\Phi_p(x, \vec{\omega}_p) = L_r(x, \vec{\omega}) \quad (3)$$

Из уравнения (3) следует, что бесконечное количество фотонов точно представит распределение яркости в сцене. Таким образом, можно получить хорошую оценку, используя достаточное количество фотонов.

Визуализация

Каждый пиксель изображения рассчитывается с помощью *метода трассировки лучей*, использующей информацию из фотонной карты. Каустика рассчитывается отдельно.

Яркость, получаемая каждым лучом, равна

$$L_o(x, \vec{\omega}) = L_e(x, \vec{\omega}) + L_r(x, \vec{\omega})$$

где L_e — излучаемая поверхностью энергетическая яркость, а L_r находится из формулы:

$$L_r(x, \vec{\omega}) = \int_{\Omega} f_r(x, \vec{\omega}', \vec{\omega}) L_i(x, \vec{\omega}') (\vec{\omega}' \times \vec{n}) d\omega'$$

BRDF f_r может быть разделена на сумму двух компонент: зеркальной — f_r^s и диффузной — f_r^d ,

$$f_r(x, \vec{\omega}', \vec{\omega}) = f_r^s(x, \vec{\omega}', \vec{\omega}) + f_r^d(x, \vec{\omega}', \vec{\omega})$$

Поступающую яркость можно разделить на 3 компоненты:

1. $L_i^l(x, \vec{\omega}')$ — прямая освещенность от источников света,

2. $L_i^c(x, \vec{\omega}')$ — непрякая освещенность через зеркальное отражение и преломление,
3. $L_i^d(x, \vec{\omega}')$ — непрякая освещенность через диффузное отражение,

получаем:

$$L_i(x, \vec{\omega}') = L_i^l(x, \vec{\omega}') + L_i^c(x, \vec{\omega}') + L_i^d(x, \vec{\omega}')$$

Теперь L_r можно разделить на 4 компоненты.

$$L_r(x, \vec{\omega}) = I_1 + I_2 + I_3 + I_4 \quad (4)$$

где I_1, I_2, I_3, I_4 рассчитываются следующим образом:

$$\begin{aligned} I_1 &= \int_{\Omega_x} f_r(x, \vec{\omega}', \vec{\omega}) L_i^l(x, \vec{\omega}') (\vec{\omega}' \times \vec{n}) d\omega' \\ I_2 &= \int_{\Omega_x} f_r^s(x, \vec{\omega}', \vec{\omega}) (L_i^c(x, \vec{\omega}') + L_i^d(x, \vec{\omega}')) (\vec{\omega}' \times \vec{n}) d\omega' \\ I_3 &= \int_{\Omega_x} f_r^d(x, \vec{\omega}', \vec{\omega}) L_i^c(x, \vec{\omega}') (\vec{\omega}' \times \vec{n}) d\omega' \\ I_4 &= \int_{\Omega_x} f_r^d(x, \vec{\omega}', \vec{\omega}) L_i^d(x, \vec{\omega}') (\vec{\omega}' \times \vec{n}) d\omega', \end{aligned}$$

где

I_1 — представляет вклад в отражаемую яркость от прямой освещенности и может быть рассчитан методами трассировки лучей, можно повысить скорость расчета, введя карту теневых фотонов.

I_2 — зеркальное и глянцевое отражение, эта часть хорошо рассчитывается методами Монте-Карло, т.е. трассировкой лучей, для оптимизации можно использовать выборку по значимости.

I_3 — каустика, рассчитывается из фотонной карты каустики с большим числом фотонов.

I_4 — свет хотя бы раз отраженный от диффузной поверхности, дает более точную освещенность и цветовое заполнение (color bleeding), рассчитывается трассировкой лучей, собирающей освещенность с фотонной карты.

Подход, при котором конечный результат формируется из множества частей, позволяет по отдельности разобрать и наглядно продемонстрировать каждую из компонент. Ниже приведены визуализации всех четырех компонент формулы (4): расчета прямой освещенности I_1 — рис. 2, формулы расчета зеркальных и глянцевых поверхностей I_2 — рис. 3, формулы вычисления каустик I_3 — рис. 4, формулы непрямого освещения I_4 — рис. 5.

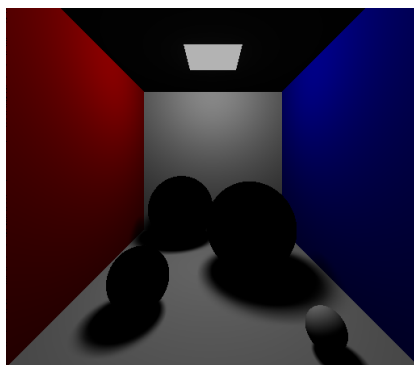


Рис. 2. Визуализация прямой освещенности сцены

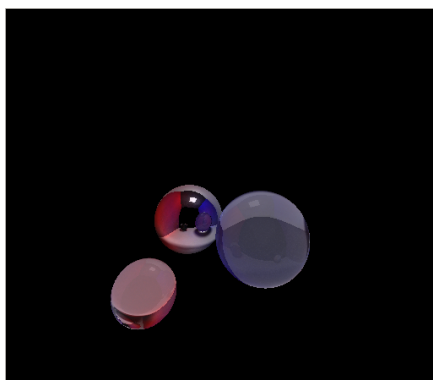


Рис. 3. Визуализация зеркальных поверхностей

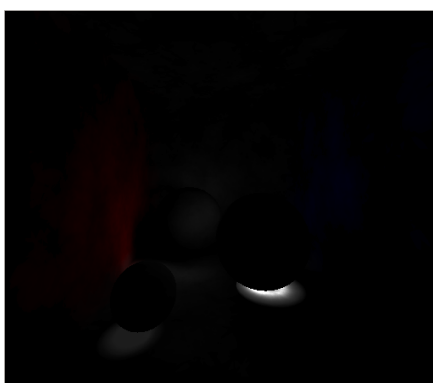


Рис. 4. Визуализация карты каустик

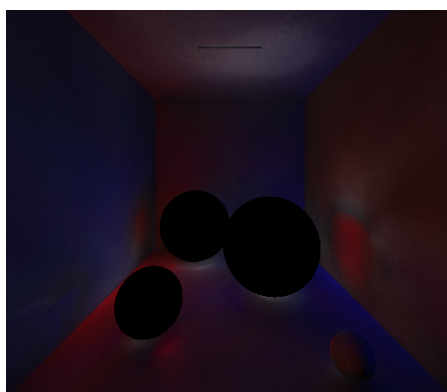


Рис. 5. Визуализация непрямого освещения

Визуализация глобальной фотонной карты отдельно от других компонентов также не представляет труда и представлена на рис. 6.

Собрав все компоненты в единое целое, мы получим законченный рендеринг сцены (рис. 7).

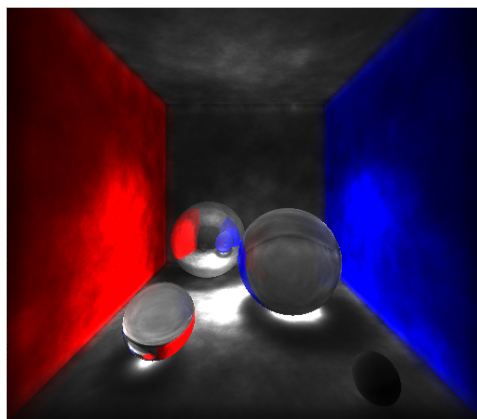


Рис. 6. Визуализация глобальной фотонной карты

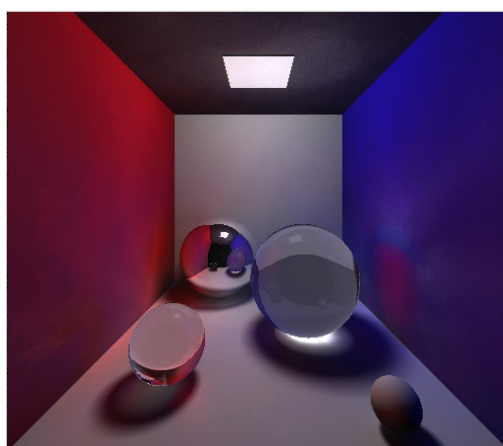


Рис. 7. Рендеринг сцены с использованием метода фотонных карт

Заключение

Метод фотонных карт является сравнительно молодым алгоритмом рендеринга. Однако это никак не умаляет всех его достоинств перед другими методами. Он прост в реализации, имеет высокую скорость работы, а главное – обрабатывает визуальные эффекты, которые не под силу другим методам.

Список литературы

- [1] Калинина Н.Д., Куров А.В. Анализ методов распознавания и поиска образов на космических снимках // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2012. №1(1). С. 174-188.

- [2] Шикуть А.В., Аристов Б.К. Использование графического интерфейса в приложениях на С++ в решении задач вычислительной математики // Инженерный вестник. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2014. № 12. Режим доступа: <http://engbul.bmstu.ru/doc/742574.html> (дата обращения 26.05.2015).
- [3] Wald I. Realtime Ray Tracing and Interactive Global Illumination: PhD thesis, Computer Graphics Group, Saarland University, 2004. 297 p.
- [4] Ngan A. Experimental validation of analytical BRDF models // SIGGRAPH Asia '04. New York: ACM, 2004. P. 90.
- [5] Hachisuka T. Progressive photon mapping // SIGGRAPH Asia '08. New York: ACM, 2008. P. 129-140.
- [6] Hachisuka T., Jensen H.W. Stochastic progressive photon mapping // SIGGRAPH Asia '09. New York: ACM, 2009. P. 100–108.
- [7] Jensen H.W. Realistic image synthesis using photon mapping. Natick: A.K. Peters, 2001. 193 p.
- [8] Foley J.D. [etc.]. Computer graphics: principles and practice (2nd ed.). Boston: Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc, 1990. 1200 p.
- [9] Jensen H.W. Global illumination using photon maps // Eurographics workshop on Rendering techniques '96. Proceedings. London: Springer-Verlag, 1996. P. 21–30.