

Эффективный метод расчета освещения для сцен с большой глубиной зеркальных отражений и преломлений

Константин Востряков
Институт Прикладной Математики им. М.В.Келдыша
vostryakov@gin.keldysh.ru

Аннотация

Разработана модификация алгоритма стохастических прогрессивных фотонных карт, которая позволяет эффективно рассчитывать освещенность в сценах имеющих большую сложность зеркальных отражений и преломлений. В таких сценах большинство лучей света попадают в камеру претерпев десятки и даже сотни переотражений. Данный тип сцен редко встречается в компьютерных играх, производстве визуальных спецэффектов, но широко распространен в светотехнике и оптике, например, светопроводящих системах.

1 ВВЕДЕНИЕ

Светопроводящие системы появились еще в 19 веке. В них использовались зеркала внутри полой трубки, обеспечивая пропускание света по изогнутому туннелю благодаря зеркальным переотражениям от его стенок. Использование традиционных зеркал приводит к значительным потерям световой энергии из-за поглощения, поскольку наилучшие зеркала отражают лишь 95% падающего света. Таким образом после 10 переотражений остается лишь 60% первоначальной энергии света, а после 100 переотражений уже менее 1%. Как известно, световоды, изготовленные из стекла или пластика, могут обеспечивать передачу света более эффективно благодаря эффекту полного внутреннего отражения. Свет, многократно отражаясь от внутренних стенок световода, достигает противоположного конца проводника с очень маленьким поглощением.

Хотя световоды очень практичны при малых размерах и малых энергиях, они становятся тяжелыми и дорогими, если необходимо создать большую по размерам светопроводящую систему. Не так давно, в 1981 году, была предложена призматическая светопроводящая система. Пустая внутри, как и самые первые системы 19 века, но использующая вместо зеркал тонкие призматические пластинки. Эти пластинки имеют плоскую внутреннюю сторону и призматическую внешнюю. Поскольку эта система работает на принципе полного внутреннего отражения, то она практически также эффективна, как и световоды. Благодаря своей полой конструкции система имеет более малый вес и низкую цену в сравнении со световодами. Призматическая светопроводящая система может быть изготовлена достаточно больших размеров и служить для пропускания солнечного света внутрь зданий и сооружений, сокращая потребление электроэнергии. Она получила название светового колодца (light tube or light pipe).

Сегодня существует повсеместное распространение бытовой электроники. Вся она имеет пользовательский интер-

фейс со световой индикацией. Передача света от светодиода обеспечивается светопроводящей системой на основе обычных или призматических световодов, это позволяет более оптимально расположить все электронные компоненты внутри корпуса, на печатной плате и т.п.

Светопроводящие системы могут применяться для создания источников света сложной формы. От источника параболическим рефлектором свет направляется в призматический световод. Многократно отражаясь от стенок световода, неравномерности излучения источника теряются, свет относительно равномерно распределяется по всей длине световода. Через многочисленные отверстия свет покидает световод. Размер многочисленных отверстий позволяет создать желаемое распределение света вокруг оптической системы. Такие светопроводящие системы позволяют создать источники света сложной формы, что очень привлекательно для светового дизайна. А использование светодиодов позволяет добиться компактности и энергоэффективности.

2 СПЕКУЛЯРНАЯ СЛОЖНОСТЬ

Для автоматизации проектирования оптических систем, примеры которых приведены выше, требуется моделирование распространения света. Но такие объекты имеют большую, так называемую, спекулярную сложность. Это значит, что большинство лучей света попадают в камеру претерпев десятки и даже сотни зеркальных отражений и преломлений. Спекулярная сложность значительно увеличивает время расчета, путь света становится очень извилистым, лишь ничтожная часть всех траекторий световых путей соединяет источники света и камеру. Расчет глобальной освещенности становится затруднительным как для прямого, так и обратного метода Монте-Карло трассировки лучей.

В алгоритме трассировки лучей Whitted'a [1], после столкновения луча с поверхностью, отраженный и преломленный лучи трассируются последовательно, что приводит к экспоненциальному увеличению числа возможных траекторий. Монте-Карло трассировка путей (path tracing) [2] позволяет смягчить проблему, случайно выбирая отражение, пропускание или поглощение, на основе коэффициентов спекулярного отражения и пропускания. Так выбираются более значимые траектории. Но коэффициенты отражения и пропускания дают доступ лишь к локальной информации о значимости данной траектории. При большой спекулярной сложности это оказывается недостаточно. То же самое можно сказать про Марковские методы Монте-Карло [2], которые используют предыдущую траекторию для построения следующей. Трудно найти важные траектории в таких сценах на основе локальной информации.

Как было показано в работе [3] метод фотонных карт более эффективен для расчета каустик. При этом он может выполняться в прогрессивной манере, обеспечивая сходимости к точному решению при наличии конечной памяти, т.е. оценка световой плотности статистически состоятельна. Суть прогрессивного стохастического метода фотонных карт состоит в последовательном выполнении следующих действий на каждой итерации:

- прямая трассировка световых траекторий с сохранением точек столкновения с поверхностями сцены (фотонов);
- обратная трассировка световых траекторий с сохранением точек столкновения с поверхностями сцены;
- оценка световой плотности в точках обратной трассировки, используя точки прямой трассировки из окрестности.

Уменьшение окрестности поиска после каждой итерации обеспечивает постоянное сокращение ошибки дискретизации, т.е. состоятельность оценки. К сожалению, данный метод позволяет эффективно рассчитывать яркость только для неспекулярных функций отражения, которая наблюдается лишь через небольшое число спекулярных переотражений.

3 МОДИФИКАЦИЯ МЕТОДА ПРОГРЕССИВНЫХ ФОТОННЫХ КАРТ

Предлагаемый алгоритм, основываясь на методе прогрессивных фотонных карт, позволяет эффективно рассчитать сцены большой сложности. Ограничив глубину обратной трассировки лучей удалось получить, пусть и смещенную, но все-таки состоятельную Монте-Карловскую оценку световой плотности, то есть сходящуюся к точному решению.

Оценка яркости света в классическом методе фотонных карт может быть получена, используя уравнение визуализации, следующим образом.

$$L(x, \omega) = \int_{\Omega} p(x, \omega, \omega'_p) \frac{d^2\Phi(x, \omega'_p)}{dA} \quad (1)$$

$$= \sum_{p=1}^n p(x, \omega, \omega'_p) \frac{\Phi_p(x, \omega'_p)}{\Delta A}, \quad (2)$$

где рассеянное поверхностью излучение $L(x, \omega)$ в точке x в направлении ω равно интегралу по всем направлениям на полусфере Ω по произведению функции отражения и пропускания $p(x, \omega, \omega')$, падающего дифференциального потока $\Phi(x, \omega')$ по площади поверхности и телесному углу, косинуса угла между нормалью к поверхности и направлением ω' . В уравнении (2) имеем сумму произведений $p(x, \omega, \omega')$ на мощности ближайших фотонов деленные на площадь окрестности.

В модифицированном алгоритме при достижении фиксированной максимальной глубины траектории идущей из камеры берется оценка световой плотности, подобно уравнению (2), но уже используя фотоны из окрестности зеркального луча (рис. 1). Полученная световая яркость умножается на спекулярный коэффициент поверхности

и коэффициент передачи траектории от камеры до этой точки:

$$L(x, \omega) = \sum_{p=1}^n p_s(x, \omega, \omega'_p) \frac{\Phi_p(x, \omega'_p)}{\Delta A \Delta \Omega}, \quad (3)$$

где p_s значение коэффициента зеркального отражения (преломления), $\Delta A = \pi r^2$, $\Delta \Omega = 2\pi(1 - \cos\theta_{max})$, а r и θ_{max} — это текущие радиус и угол дискретизации оценки.

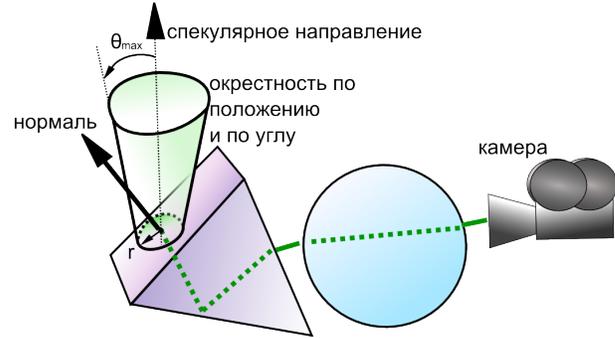


Рис. 1: Достигнута фиксированная максимальная глубина траектории. В окрестности спекулярного луча выполняется поиск фотонов.

4 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана модификация алгоритма стохастических прогрессивных фотонных карт, которая позволяет эффективно рассчитывать освещенность в сценах имеющих большую глубину зеркальных отражений и преломлений. Данный тип сцен редко встречается в компьютерных играх, производстве визуальных спецэффектов, но широко распространен в светотехнике и оптике, например, светопроводящих системах. Ограничив глубину обратной трассировки лучей удалось получить, пусть и смещенную, но все-таки состоятельную Монте-Карловскую оценку световой плотности, то есть сходящуюся к точному решению. Эффективное моделирование таких сцен позволяет создать более совершенные системы автоматизированного оптического проектирования.

Работа поддержана грантами Президента РФ НШ-8129.2010.9, РФФИ № № 09-01-00472, 10-01-00302, а также компанией Integra Inc.

Список литературы

- [1] Turner Whitted. An improved illumination model for shaded display. *Commun. ACM*, 23(6):343–349, 1980. 2
- [2] Eric Veach and Leonidas J. Guibas. Metropolis light transport. In *SIGGRAPH '97: Proceedings of the 24th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 65–76, New York, NY, USA, 1997. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co. 2
- [3] Toshiya Hachisuka and Henrik Wann Jensen. Stochastic progressive photon mapping. *ACM Trans. Graph.*, 28(5):1–8, 2009. 2