

ОБ ОДНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ ТРАССИРОВКИ ПУТЕЙ ДЛЯ ГРАФИЧЕСКОГО ПРОЦЕССОРА

Д.К. Боголепов¹, Д.Я. Ульянов², В.Е. Турлапов¹

¹*Нижегородский госуниверситет им. Н.И. Лобачевского*

²*Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева*

E-mail: denisbogol@gmail.com, danila-ulyanov@ya.ru, vadim.turlapov@gmail.com

Предложен оптимизированный метод трассировки путей, дополненный концепцией регуляризации. Для комбинирования вкладов различных путей в одну несмещенную оценку предложена эффективная реализация многократной выборки по значимости.

Введение

Методы глобального освещения широко применяются в компьютерной графике, в том числе в научной и медицинской визуализации для отображения данных, полученных в ходе инженерных расчетов, оптических экспериментов, компьютерной или магнитно-резонансной томографии. В данных областях часто возникают ситуации, в которых расчет освещенности традиционными несмещенными методами затруднен. Типичными примерами служат задачи моделирования сложных материалов, оптических систем и конфигураций источников света, включающих в себя лазеры и светодиоды. Указанные типы источников характеризуются малой площадью излучающей поверхности (которая может сочетаться с узконаправленным потоком излучения), что позволяет их моделировать в виде точечных (направленных) источников света. Другой типичный пример затрудненного расчета освещенности – источники света, закрытые прозрачной оболочкой (абажур лампы). Наконец, определенные трудности вызывают сцены с зеркальными или прозрачными объектами, особенно в сочетании с источниками света малой площади. Примером может служить стеклянный лист на столе, который освещается точечным источником. Если при этом используется модель камеры с точечной диафрагмой (стеноп), то традиционные несмещенные методы (включая двунаправленную трассировку путей и Metropolis Light Transport) в принципе не способны сформировать изображение поверхности стола под слоем стекла.

Указанные выше проблемы расчета освещенности связаны с особенностями (сингулярностями) подынтегрального выражения в уравнении визуализации. Хорошо известно, что алгоритм BPT недостаточно эффективно обрабатывает пути переноса излучения, которые содержат SDS-подпоследовательности вершин (через S и D обозначены вершины пути, в которых поверхность обладает соответственно зеркальными и диффузными рассеивающими свойствами) [4]. Причина этой проблемы кроется в техниках построения SDS-путей, которые реализуются в методе BPT. Пути данного класса характеризуются малой плотностью вероятности, которая может даже обращаться в ноль (если используются точечные источники света и камера с точечной диафрагмой). Указанные особенности алгоритма принято именовать проблемой недостаточного числа техник построения путей [2].

В настоящей работе концепция *регуляризации*, предложенная в статье [1], применяется для обработки «сложных» путей с SDS-фрагментами, вклад которых проблематично оценить традиционными несмещенными методами. В отличие от оригинальной работы регуляризация применяется для ввода дополнительных «смещенных» техник

генерации путей, которые наряду с обычными «несмещенными» техниками позволяют получить Монте-Карло-оценку интеграла измерения. Для комбинации вкладов «смещенных» и «несмещенных» техник вновь используется многократная выборка по значимости, что позволяет значительно поднять скорость сходимости в «сложных» фрагментах изображения. В ходе расчета дополнительные «смещенные» техники вводятся только в том случае, если обычных «несмещенных» техник недостаточно (или таковые отсутствуют вовсе), что ведет к минимальному отклонению оценки (которая в любом случае остается состоятельной).

1. Трассировка путей (Path Tracing)

Поскольку рассматриваемая концепция регуляризации путей не зависит от конкретного алгоритма визуализации, в настоящей работе она иллюстрируется на примере трассировки путей с многократной выборкой по значимости. Алгоритм трассировки путей включает в себя построение двух типов путей от диафрагмы виртуальной камеры:

1. Каждая вершина y_i пути соединяется со случайной точкой z на источнике света, за счет чего формируется *явная видовая* траектория переноса излучения $y_0 \dots y_i z$.
2. Если в процессе продолжения пути очередная вершина y_i оказалась на источнике света, то промежуточная последовательность $y_0 \dots y_i$ образует *неявную видовую* траекторию переноса излучения.

Вклады различных путей комбинируются в одну оценку с помощью многократной выборки по значимости [3].

2. Проблема дефицита техник генерации путей

Многократная выборка по значимости (MIS) позволяет понизить дисперсию Монте-Карло-оценки за счет использования различных техник генерации путей. Однако, если в подобласти G исходной области интегрирования $\mathcal{P}$ доступна только одна техника, многократная выборка по значимости вырождается в обычную выборку по значимости. При этом для путей из области G повышается дисперсия оценки, что наглядно проявляется на изображении в виде ярких точек. В работе [2] данная ситуация получила название проблемы дефицита техник генерации путей. Важно подчеркнуть, что некоторые пути в принципе не могут быть обработаны традиционными несмещенными алгоритмами. Для таких путей не существует ни одной техники генерации, а их вклад в результирующее изображение будет не учтен.

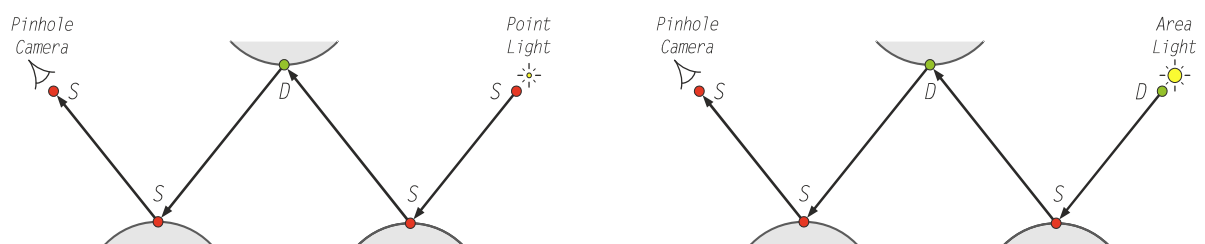


Рис. 1. Примеры путей, которые не могут быть обработаны (слева) или допускают только одну технику генерации (справа)

Как правило, дефицит техник генерации вызван особенностями подынтегральной функции измерения f_j . Особые точки возникают в областях с «зеркальными» свойствами, рассеяние света на которых описывается δ -функциями Дирака. В частности, BRDF идеального отражения может быть описана δ -функцией, которая обращается в ноль всюду, кроме направления зеркального отражения R (где она принимает бесконечно большое значение):

$$f_r(\mathbf{x}, \Psi \rightarrow \Theta) = F_r(\Psi) \frac{\delta(R - \Psi)}{|N_{\mathbf{x}} \cdot \Psi|}. \quad (1)$$

При этом доля отраженной световой энергии определяется коэффициентом Френеля F_r . Для генерации направления вторичного луча в вершине с «зеркальными» свойствами используется плотность вероятности, которая также выражается δ -функцией:

$$p_{\omega^\perp}(\Psi) = \frac{\delta(R - \Psi)}{|N_{\mathbf{x}} \cdot \Psi|}. \quad (2)$$

Аналогичным образом определяется BTDF идеального преломления.

3. Выборочная регуляризация путей переноса излучения

Таким образом, крайнее проявление проблемы дефицита техник построения выражается в наличии «нерегулярных» путей, которые в принципе не могут быть построены несмещенными методами синтеза изображений (включая двунаправленную трассировку путей и Metropolis Light Transport). В других случаях дефицит техник построения приводит к снижению эффективности многократной выборки по значимости, которая при наличии всего одной техники вырождается в обычную выборку по значимости.

В работе [1] авторы исследовали первый аспект данной проблемы, предложив простое и элегантное решение на основе выборочной регуляризации путей – замены δ -функции в одной или нескольких особых точках на приближенные распределения с протяженным носителем. В частности, метод классической трассировки путей не позволяет учесть вклад прямого освещения в точке с «зеркальными» свойствами (одно из последствий выражается в отсутствии каустик от точечных источников света). Однако, за счет замены δ -функции в BSDF «зеркальной» вершины на близкое распределение, для данной точки можно сгенерировать теневой луч и приближенно оценить вклад пути в яркость соответствующего пикселя. В работе [1] для аппроксимации δ -распределения используется кусочно-постоянная функция, которая за пределами малого угла σ обращается в ноль:

$$\phi_\sigma(D - \Psi) = \frac{1}{2\pi(1 - \cos \sigma)} I_{\angle \Psi D < \sigma}. \quad (3)$$

В данном выражении через D обозначено направление идеального отражения или преломления (в зависимости от типа BSDF в «зеркальной» вершине пути), а через I – индикаторная функция, которая указывает на принадлежность направления Ψ прямому круговому конусу Ω с осью D и половинным углом раствора σ .

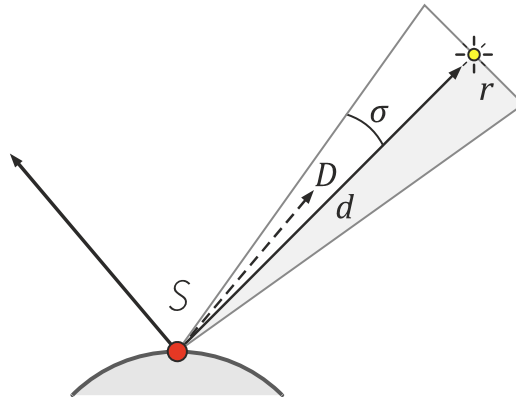


Рис. 2. Регуляризация S -вершины путем замены δ -функции на функцию с протяженным носителем

На практике угол σ удобнее вычислять на основе расстояния d между соединяемыми вершинами и заданного радиуса «аппроксимации» r . В этом случае

$$\cos \sigma = \frac{d}{\sqrt{d^2 + r^2}}. \quad (4)$$

Следует отметить, что после регуляризации Монте-Карло-оценка интеграла измерения уже не будет *несмещенной*, однако необходимо обеспечить ее *состоятельность*. В работе [1] данное требование удовлетворяется за счет уменьшения радиуса r после каждого шага интегрирования согласно формуле $r_N = r_0 N^{-\lambda}$ (здесь r_0 – заданный начальный радиус, а параметр $\lambda = 1/6$ для случая регуляризации только одной из двух соединяемых вершин). В результате, с ростом числа шагов интегрирования (объем выборки $N \rightarrow \infty$) систематическая (неслучайная) ошибка оценки будет стремиться к нулю.

3.1. Регуляризация как механизм повышения числа техник генерации

В данной работе исследуется другой аспект проблемы, вызванной особыми точками путей переноса излучения. Принцип регуляризации предлагается использовать для повышения числа стратегий генерации «сложных» путей, для которых не доступен полный набор «несмещенных» техник построения (что повышает дисперсию Монте-Карло-оценки). Регуляризация отдельных вершин позволяет расширить набор традиционных «несмещенных» техник дополнительными «смещенными» техниками генерации путей. В результате растет эффективность многократной выборки по значимости и понижается дисперсия оценки в «сложных» областях изображения. Необходимо подчеркнуть, что новые техники построения путей дают конкурирующие оценки по отношению к традиционным, поэтому возникает проблема оптимального комбинирования обычных несмещенных оценок с дополнительными смещенными в единую оценку интеграла измерения. При решении данной проблемы необходимо обеспечить баланс между скоростью сходимости и величиной систематической ошибки.

На этапе трассировки путей от диафрагмы виртуальной камеры регуляризация выполняется для вершин, соединяемых теньевыми лучами с источником света. В результате к единственной *неявной* траектории добавляется «смещенная» *явная* траектория переноса света. Регуляризация вершины выполняется заменой δ -функции в «зеркальной» BSDF на приближенную функцию ϕ_{σ_N} , при этом косинус угла σ_N вычисляется на основе текущего радиуса «аппроксимации» r_N по формуле (4).

Результаты

Для сравнения техник была выбрана сцена со сложными SDS-путями. Сравнивалась трассировка путей (PT) без регуляризации и с регуляризацией. Скорость сходимости была измерена используя разницу (L2 norm) с эталонным изображением (PT 4 часа).

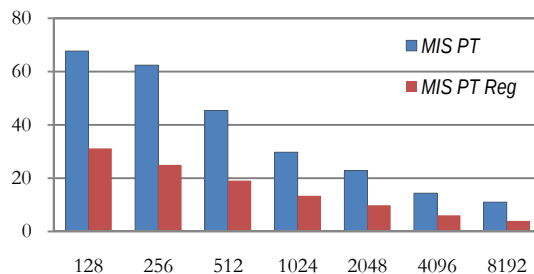


Рис. 3. Абсолютная ошибка в зависимости от числа итераций на пиксел



Рис. 4. РТ (слева) и РТ с регуляризацией (справа), 64 итерации на пиксел

Заключение

В настоящей работе представлен метод оптимизации, позволяющий ускорить сходимость даже базовых техник визуализации, таких как MIS РТ, более чем в два раза без значительной потери качества. Алгоритм регуляризации также хорошо масштабируется на более сложные техники визуализации, такие как двунаправленная трассировка путей и MLT.

Литература

1. Kaplanyan A.S., Dachsbacher C. Path Space Regularization for Holistic and Robust Light Transport // Proc. of Eurographics – 2013.
2. Kollig T., Keller A. Efficient bidirectional path tracing by randomized quasi-monte carlo integration // In MCQMC Methods. 2000. 290–305.
3. Veach E. Robust Monte Carlo methods for light transport simulation. PhD thesis. Stanford University, 1998.
4. Heckbert P.S. Adaptive radiosity textures for bidirectional ray tracing // Computer Graphics (Proc. of SIGGRAPH). 24. 4. 1990. 145–154.