

Сравнение двух алгоритмов генерации мягких теней

Илья Новиков

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,
Новосибирск, Россия

iliya.novikov@gmail.com

Аннотация

В данной работе рассматриваются два алгоритма генерации мягких теней: single sample soft shadows на основе карт глубины (SSSS), основанный на методе теневых карт, и метод световых сеток (МСС), являющийся модификацией алгоритма обратной рекурсивной лучевой трассировки. Сравнение качества изображений, получаемых по SSSS и МСС, показало, что SSSS подходит только для быстрого получения предварительных изображений. В то время как МСС позволяет рассчитывать изображения, свободные от графических артефактов, в рекурсивном случае, в том числе для сцен, содержащих полупрозрачные объекты.

Ключевые слова: лучевая трассировка, мягкие тени, метод теневых карт, метод световых сеток.

1. Введение

Алгоритм обратной рекурсивной лучевой трассировки [15] (ОРЛТ), известный также как ray tracing, в основном применяется на практике (киноиндустрия, реклама, дизайн и т.д.) для реалистической визуализации трехмерных сцен. В данной работе *пространственная сцена* – это кусочно-непрерывная непрозрачная поверхность, представленная набором из nO примитивов, обладающих следующими свойствами:

- В каждой точке поверхности определены свойства отражения, которые задаются коэффициентами: k_d – коэффициент диффузного отражения, k_s – коэффициент зеркального отражения.
- Для поверхности определена операция пересечения с лучом.
- В каждой точке поверхности P определена нормаль $\vec{n}(P)$.

Сцена освещается nL точечными источниками освещения, специфицированными интенсивностями излучения I_i и позициями в пространстве L_i , $i = 1, \dots, nL$.

ОРЛТ заключается в попиксельном расчете изображения. Через каждый пиксель выпускается луч из камеры в сцену. Отыскивается ближайшая точка пересечения луча со сценой, и значение закраски пикселя рассчитывается, исходя из свойств материала поверхности сцены в точке и источников освещения, из которых она видна. Пусть луч из камеры имеет ближайшее пересечение со сценой в точке P . Базовую формулу расчета значения закраски в точке P по ОРЛТ $I_{RT}(P)$ можно выразить формулой:

$$I_{RT}(P) = A + \sum_{i=1}^{nL} V(L_i, P) \Omega(i, P) + k_s I_r = A + U_{RT}(P) + k_s I_r, \quad (1)$$

где A – интенсивность рассеянного света, $V(P, Q)$ – булева функция видимости между точками P и Q , I_r – интенсивность, приходящая с направления отраженного луча, $\Omega(i, P)$ учитывает все отражательные свойства поверхности в точке P и параметры i -го источника.

В ОРЛТ используется точечный источник освещения, поэтому ОРЛТ теоретически может производить только *четкие* тени, характеризующиеся резкой границей между освещенной и неосвещенной областями, тогда как на практике (в природе) мы чаще видим *мягкие* тени, имеющие плавный переход от освещенной области к неосвещенной (рис. 1).

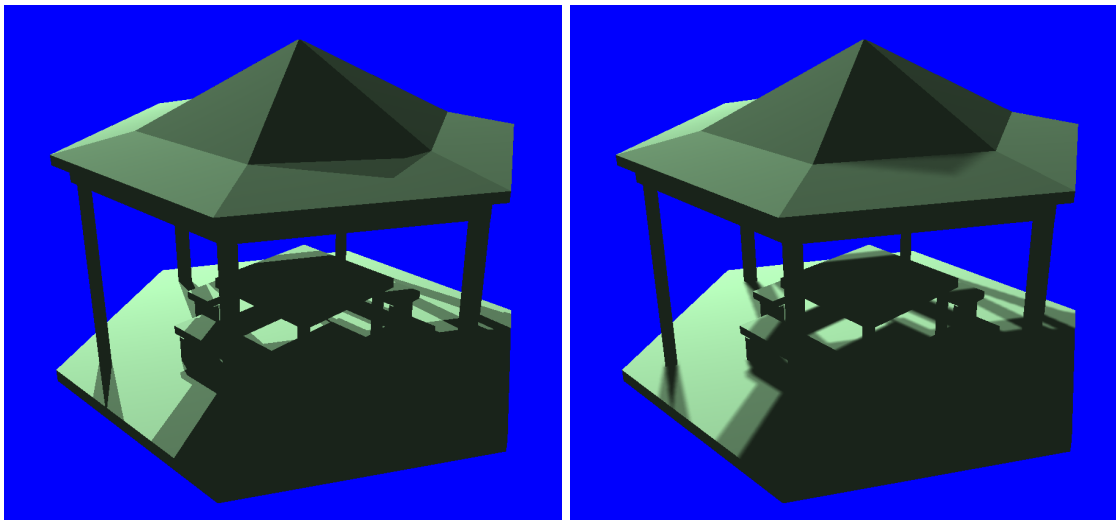


Рис. 1. Четкие (слева) и мягкие (справа) тени

Исследования [9] подтверждают важность теней в восприятии трехмерной сцены, тени несут информацию об относительном положении объектов сцены и динамике его изменения, деталях геометрии затеняемого объекта и затеняющего объекта. Четкие тени часто порождают фантомы, т.е. иллюзию того, что тень является отдельным объектом сцены или рисунком на поверхности объекта. Мягкие тени не только повышают реалистичность изображения, но также несут дополнительную информацию: размеры и конфигурация источника, взаимное расположение источника, затеняющего объекта и затеняемого объекта.

Мягкие тени можно получить с помощью ОРЛТ, если заменить объемный источник множеством точечных источников (рис. 2). Этот подход к генерации мягких теней назовем *наивным* (например, он реализован как “Area shadows” в Autodesk 3ds Max), т.е. ОРЛТ не изменяется (источник остается точечным), но изменяется сама сцена (множество источников вместо одного).

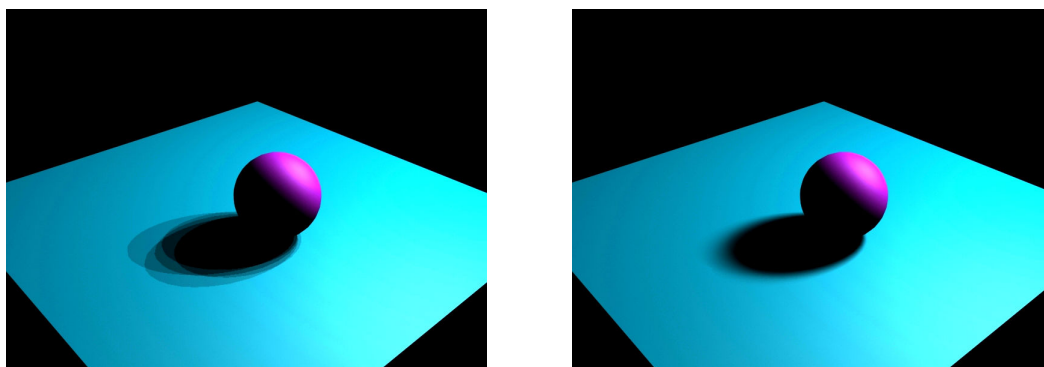


Рис. 2. Наивный подход: 5 источников (слева) и 225 источников (справа)

Заметим, что выражение “генерация теней” обобщает два разных понятия: “расчет теней” и “имитация теней”. Наивный подход позволяет **рассчитывать** тени, корректные с точки зрения используемой модели освещения, но при этом требует очень больших вычислительных затрат: сотни и тысячи точечных источников, чтобы получить качественное изображение. На практике часто требуется быстрый расчет изображения, пусть даже значительно более низкого качества. Это, прежде всего, относится к получению предварительных изображений при создании, например, трехмерного

мультфильма. В таком случае дерево лучей, как правило, не строится, т.е. ОРЛТ заменяется нерекурсивной *обратной лучевой трассировкой* (ОЛТ), известной как ray casting. При этом достаточно **имитировать** мягкие тени, создавая иллюзию реалистичности. Анализ существующих алгоритмов генерации мягких теней показывает, что большинство из них подходит только для быстрого получения предварительных изображений. Большая часть алгоритмов генерации мягких теней основана на предложенном Вильямсом в 1978 г. методе теневых карт [16] (shadow maps).

2. Метод теневых карт

Метод теневых карт связан с понятием *z-буфера* – буфера глубин точек в сцене относительно камеры. *Теневая карта* (рис. 3а) – это z-буфер, рассчитанный для камеры, находящейся в позиции источника (*камеры источника*). Чтобы определить видимость, расстояние от объектной точки до источника сравнивается со значением из теневой карты. Если значение из теневой карты меньше, источник не виден, иначе виден.

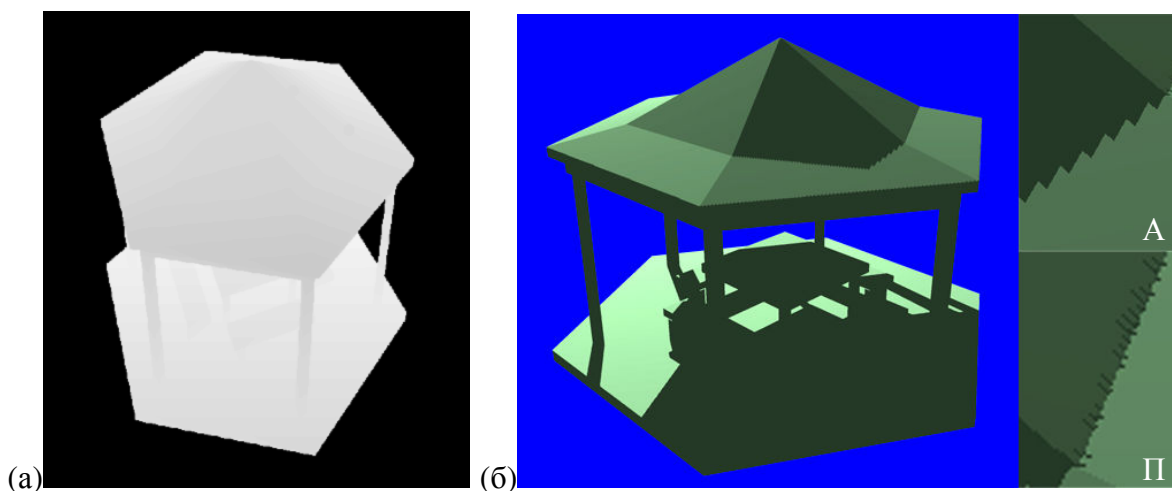


Рис. 3. (а): теневая карта (б): алиасинг (“А”) и протечки света/тени (“П”)

Метод теневых карт страдает от многочисленных графических артефактов (рис. 3б). Большинство артефактов связано с дискретным характером метода: информация о глубине точек в сцене представлена таблицей конечного размера, значит неизбежны ошибки при вычислении видимости. *Алиасинг* включает в себя целую группу артефактов, присущих методу теневых карт, наиболее известное проявления алиасинга – “зубчатая” граница тени. Этот артефакт проявляется, когда нескольким пикселям изображения соответствует один и тот же элемент теневой карты. *Протечки света/тени* – другой артефакт, выражающийся в виде темных (светлых) полос или пятен, например, на стыках некомпланарных полигонов. В процессе расчета могут ошибочно использоваться элементы теневой карты, соответствующие частям сцены, лежащим за непрозрачной преградой. Тогда свет (тень) как бы “протекает” сквозь преграду.

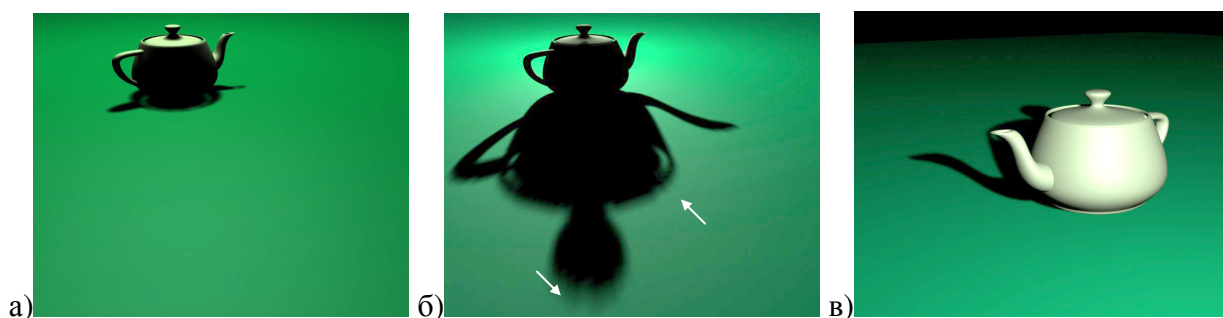


Рис. 4. Зависимость от КИ и КН: изображение (б) можно получить из (а) сдвигом источника или из (в) сдвигом камеры

Еще одна проблема метода – зависимость качества изображения от камеры источника (КИ) и камеры наблюдателя (КН). КИ определяет телесный угол части сцены, соответствующей одному элементу теневой карты, увеличение телесного угла приводит к проявлению алиасинга. Например, при приближении источника к сцене часть сцены, видимая источником, уменьшается. Возникает необходимость увеличивать растровый шаг камеры, что приводит к увеличению телесного угла и, следовательно, алиасингу. Аналогичный эффект получаем при приближении КН к сцене. Построив дополнительные теневые карты или увеличив размер теневых карт, можно решить проблему, но только для фиксированной конфигурации сцены. Не предложено реализации метода теневых карт, которая *гарантированно* позволяла бы получать изображения, *свободные от артефактов*. Значит, например, в динамической сцене, где параметры камер источников и наблюдателя изменяются, следует ожидать проявления графических артефактов (рис. 4).

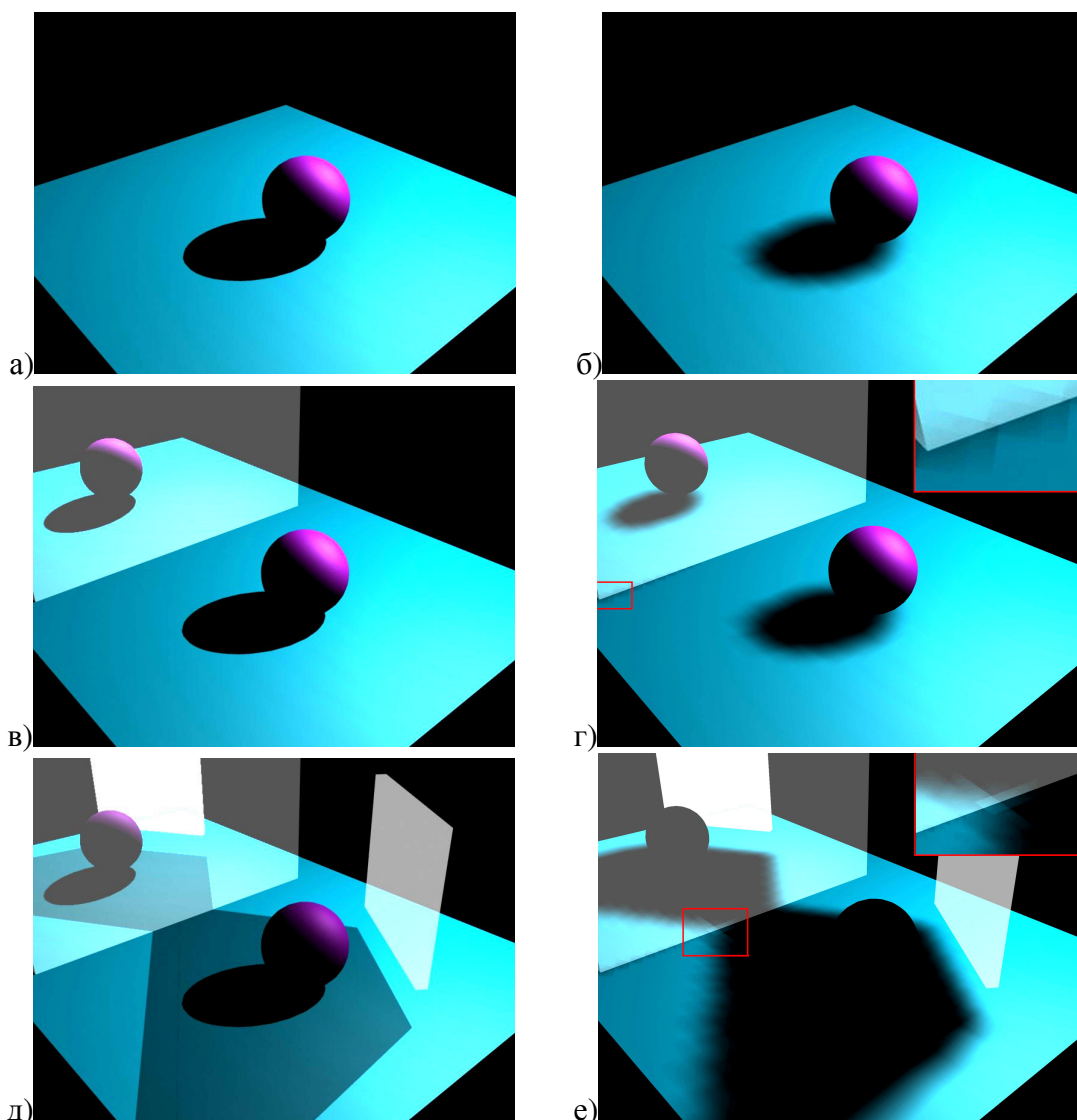


Рис. 5. ОРЛТ (слева) и теневые карты (справа): (а) и (б) – расчет без рекурсии, алиасинг; (в) и (г) – рекурсивный расчет, протечки света/тени; (д) и (е) – тень от полупрозрачного объекта, протечки света/тени

Метод теневых карт теоретически позволяет получать изображения с тенями и в рекурсивном случае. Однако подбор параметров расчета, позволяющих получить изображения без графических артефактов, становится еще более сложным, даже для статических сцен. В рекурсивном случае артефакты нарастают, что подтверждается экспериментами (рис. 5г и 5е), поэтому из практических соображений метод теневых карт не применяется, когда требуется получить качественное изображение. Кроме того, метод

теневого карт не работает для полупрозрачных объектов, что также экспериментально подтверждено на примере реализации метода в Autodesk 3ds Max (рис. 5е).

3. Алгоритмы генерации мягких теней

Большая часть алгоритмов генерации мягких теней основывается на методе теневых карт, т.е. либо является модификацией этого метода, либо имеет схожий принцип работы. Это прежде всего означает, что эти алгоритмы наследуют как преимущества, так и недостатки метода теневых карт. К ним можно отнести: Single sample soft shadows using depth maps [5], Soft shadows using a single light sample [11], Layered attenuation maps [3], Penumbra deep shadow maps [14], Soft shadow textures using convolution [13], Shadow penumbras [10], Soft shadows using occlusion textures [6], Soft shadow mapping by backprojection [7], Soft shadow maps [4], Bitmask soft shadows [12], Adaptive Soft Shadow Mapping [8].

Таким образом, существует множество алгоритмов, позволяющих генерировать мягкие тени в изображении трехмерной сцены, но подавляющее большинство из них оказывается неприменимым с практической точки зрения в случае рекурсивной лучевой трассировки. Если ограничиться ОЛТ, то даже в этом случае рассмотренные алгоритмы имеют ограниченную область применимости. Алгоритмы, основанные на методе теневых карт, демонстрируют большое количество графических артефактов, т.е. не подходят в случаях, когда требуется получить качественное изображение. Кроме того, эти алгоритмы не работают для полупрозрачных объектов. Таким образом, многообразие алгоритмов генерации мягких теней подходит только для быстрого получения предварительных изображений. Ускорение генерации мягких теней в рамках рекурсивного ОРЛТ для создания конечного качественного изображения, остается практически не исследованным. На практике для создания конечного изображения по-прежнему используется наивный подход, требующий больших вычислительных затрат. Следовательно, очень важна разработка алгоритма генерации мягких теней, который бы работал в ОРЛТ и позволял получать качественное изображение за минимально возможное время.

4. Метод световых сеток

МСС [1] (рис. 5) является модификацией ОРЛТ, разработанной для создания мягких теней в изображении трехмерной пространственной сцены. *Световая сетка* $LM = \{x_k\}_{k=1}^{N^{LM}}$ – это равномерная сетка размером $N^{LM} = N_x^{LM} \times N_y^{LM} \times N_z^{LM}$ в пространстве сцены, каждая точка световой сетки x_k (*световая точка*) хранит шкалу видимости для каждого источника. Для расчета видимости в точке ближайшего пересечения луча с поверхностью (*объектной точкой*) P строится *интерполяционная сфера* $SLM(P)$ радиуса r по следующему правилу

$SLM(P) = \{x_k\}_{k=1}^{N^{LM}} : |P - x_k| < r, (\vec{n}(P), x_k - P) > 0, V(P, x_k) = 1$. Т.е. интерполяционная сфера включает в себя только световые точки, лежащие на расстоянии меньшем r от точки P с видимой стороны поверхности и видимые точкой P . Результирующая видимость для объектной точки получается усреднением значений видимости из световых точек интерполяционной сферы. Аналогично формуле (1) базовую формулу расчета значения закраски в точке P по МСС $I_{LM}(P)$ представим как

$$I_{LM}(P) = A + \left(\sum_{k=1}^{N^{LM}} \chi(P, x_k) \right)^{-1} \sum_{k=1}^{N^{LM}} \chi(P, x_k) \left[\sum_{i=1}^{nL} V(L_i, x_k) \Omega(i, P) \right] + k_s I_r = A + U_{LM}(P) + k_s I_r, \quad (2)$$

$$\text{где } \chi(P, x_k) = \begin{cases} 1, & x_k \in SLM(P) \\ 0, & x_k \notin SLM(P) \end{cases}.$$

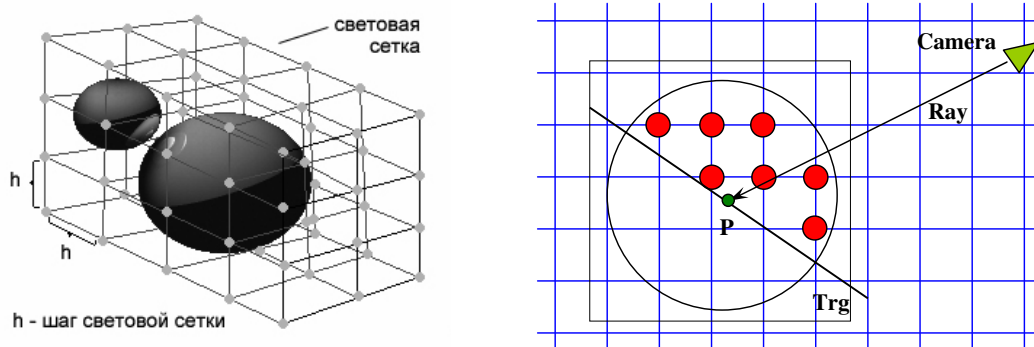


Рис. 5. Световая сетка (слева) и схема МСС (справа)

МСС аппроксимирует решения, получаемые по ОРЛТ. Сравним формулы (1) и (2). Очевидно, что вдали от границ теней, где значения видимости для близких сеточных точек совпадают, результаты расчетов по формулам (1) и (2) также совпадают. Вблизи границ теней результаты, отличаются, но, если мы устремим шаг световой сетки h и радиус интерполяционной сферы r к нулю, то решение по МСС будет сходиться к решению по ОРЛТ.

Построение МСС как аппроксимации ОРЛТ имеет много преимуществ:

1. МСС работает в рекурсивной лучевой трассировке, что отражено в формуле (2).
2. Интерполяция значений видимости дает эффект плавного перехода от освещенной области к неосвещенной, т.е. мягкую тень (рис. 6).
3. МСС может быть встроен в любое приложение, осуществляющее расчет изображения на основе ОРЛТ.
4. В работе [2] предложена модификация МСС, позволяющая работать с полупрозрачными объектами.

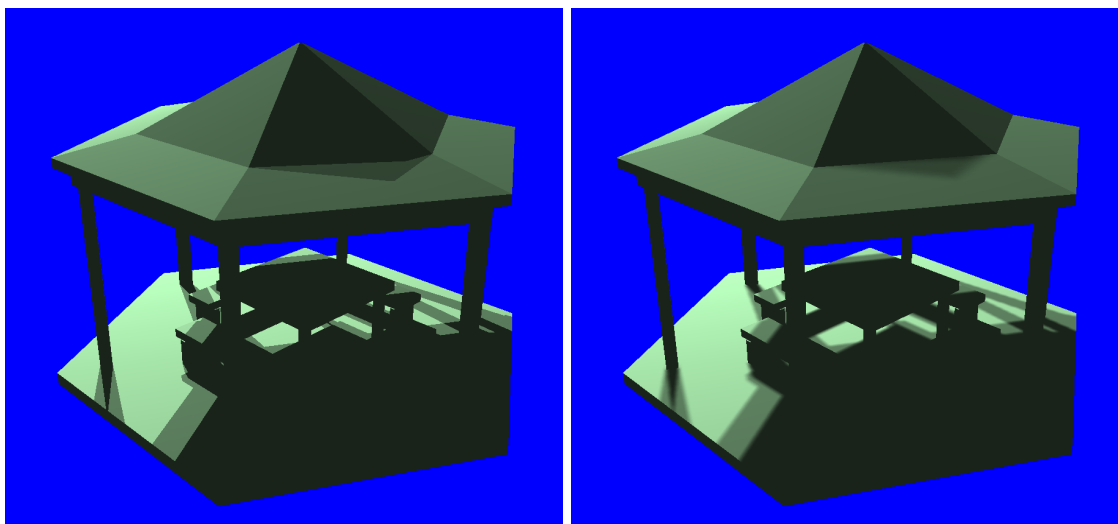


Рис. 6. Изображения, полученные по ОРЛТ (слева) и МСС (справа)

5. МСС и Single sample soft shadows на основе карт глубины: сравнение качества изображений

Ни один из алгоритмов на базе метода теневых карт, рассмотренных в обзоре, не применим на практике в случае рекурсивной лучевой модели. Поэтому их сравнение с МСС будем проводить в рамках ОРЛТ, т.е. в худшем для МСС случае, поскольку МСС разрабатывался специально для рекурсивных расчетов.

Для сравнения МСС с методом теневых карт был выбран алгоритм Single sample soft shadows на основе карт глубины [5] (SSSS), который, по нашему мнению, дает наиболее сбалансированное решение по скорости расчета и качеству изображения в сравнении с подобными алгоритмами. SSSS использует теневую карту, чтобы определить расстояние от объектной точки до границы четкой тени и использовать найденное расстояние для имитации изменения видимости источника. В результате получается линейное изменение видимости при движении как наружу от границы четкой тени, так и вовнутрь, т.е. граница четкой тени размывается (рис. 7).

На изображении, полученном с помощью SSSS (рис. 8), мы видим те же артефакты, которые присущи базовому методу теневых карт: алиасинг и протечки света/тени. Также обратим внимание на темные полосы на стыках треугольников, образующих объект. Причина появления этих полос связана с тем, что в расчетах по SSSS используются уникальные идентификаторы (ID) объектов сцены. ID необходимы, чтобы определить является ли затеняемый объект одновременно затеняемым (самозатенение). Рассматриваемое изображение было рассчитано для случая, когда каждый треугольник сцены имеет уникальный ID. Применим более сложный подход к распределению ID: компланарные треугольники получают одинаковый ID. Видно (рис. 9), что проблема решена лишь частично. Авторы SSSS исходят из предположения, что типичная трехмерная сцена – это набор отдельных объектов с разными ID. В нашем случае изображенная беседка является одним объектом. Ее можно разделить на несколько объектов, но для этого требуется либо разработать более сложный алгоритм распределения ID (авторы SSSS не исследовали эту проблему), либо специально подготавливать сцену для расчетов по SSSS, что потребует от дизайнера времени, пропорционального сложности сцены. Но даже предварительная подготовка сцены не способна полностью решить проблему. На стыке верхней и нижней части крыши беседки, имеющих разные ID, мы видим темную полосу. Но если объединить их (присвоить одинаковый ID), верхняя часть крыши не сможет затенять нижнюю по SSSS. Следовательно, в этом случае темную полосу нельзя устранить, т.е. она является графическим артефактом.

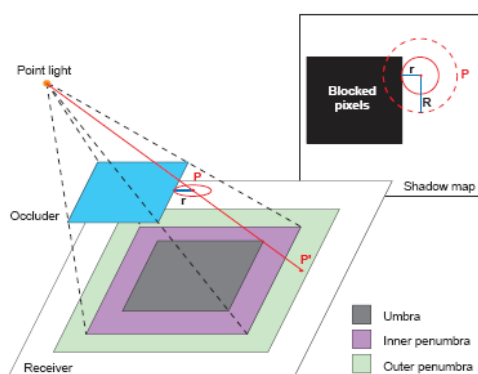


Рис. 7. Схема SSSS (взято из [5])

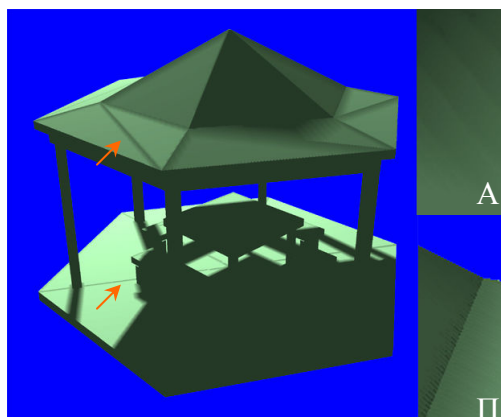


Рис. 8. SSSS, артефакты

Таким образом, на примере SSSS мы получили, что алгоритмы генерации мягких теней, основанные на методе теневых карт не только страдают от тех же артефактов, что и базовый метод, но и имеют свои специфические недостатки. Отметим, что МСС свободен от всех перечисленных артефактов (рис. 10).

6. Заключение

Генерация мягких теней в изображении трехмерной сцены – актуальная задача, которой посвящено множество исследований. Область применения большинства алгоритмов генерации мягких теней ограничена: они не работают с полупрозрачными поверхностями,

не предназначены для рекурсивной лучевой трассировки, страдают от графических артефактов, и поэтому пригодны только для быстрого получения предварительных изображений. МСС специально создан для генерации мягких теней в рамках рекурсивного ОРЛТ и позволяет рассчитывать изображения, свободные от графических артефактов, в том числе для сцен, содержащих полупрозрачные объекты.

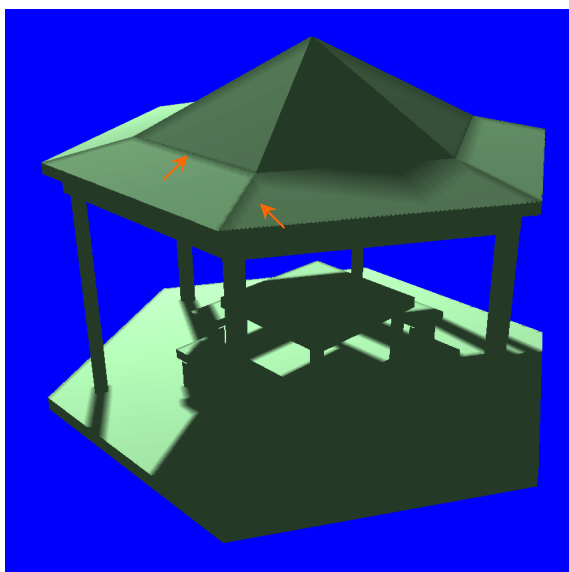


Рис. 9. SSSS, артефакты

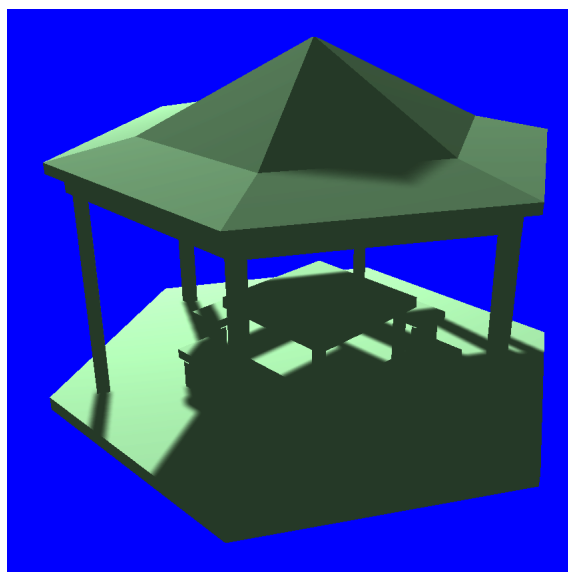


Рис. 10. МСС

Литература

1. Дебелов В.А., Васильева Л.Ф., Новиков И.Е. *Развитие метода световых сеток для алгоритма лучевой трассировки: аппроксимация решения, реализация на графическом акселераторе // Тр. 15-й междунар. конф. по компьютерной графике и ее приложениям Графикакон'2005. – Новосибирск, 2005. – С. 355–359.*
2. Дебелов В.А., Васильева Л.Ф., Смирнова Г.Г. *Метод световых сеток для случая полупрозрачных поверхностей // Тр. 16-й междунар. конф. по компьютерной графике и машинному зрению Графикакон'2006. – Новосибирск, 2006. – С. 298–302.*
3. Agrawala M., Ramamoorthi R., Heinrich A., Moll L. *Efficient image-based methods for rendering soft shadows. In SIGGRAPH 2000, pages 375–384, July 2000.*
4. Atty L., Holzschuch N., Lapierre M., Hasenfratz J.-M., Hansen C., Sillion F. *Soft shadow maps: Efficient sampling of light source visibility. Computer Graphics Forum 25, 4 (2006).*
5. Brabec S., Seidel H.-P. *Single Sample Soft Shadows Using Depth Maps // Proc. Graphics Interface, Pp. 219-228, Calgary, Alberta, 2002.*
6. Eisemann E., Décoret X. *Plausible image based soft shadows using occlusion textures. In Proc. of the Brazilian Symposium on Computer Graphics and Image Processing (2006), IEEE.*

7. Guennebaud G., Barthe L., Paulin M. *Real-time soft shadow mapping by backprojection. In Proc. of Eurographics Symposium on Rendering (2006).*
8. Guennebaud G., Barthe L., Paulin M. *High-Quality Adaptive Soft Shadow Mapping. In Proc. of Eurographics Symposium on Rendering. – 2007. – Vol. 26, № 3.*
9. Hasenfratz J.-M., Lapierre M., Holzschuch N., Sillion F. *A survey of real-time soft shadows algorithms. In Computer Graphics Forum, volume 22, 2003.*
10. Keating B., Max N. *Shadow penumbras for complex objects by depth-dependent filtering of multilayer depth images. In Rendering Techniques 1999 (10th Eurographics Workshop on Rendering), pages 205–220. Springer-Verlag, 1999.*
11. Kirsch F., Doellner J. *Real-time soft shadows using a single light sample. Journal of WSCG (Winter School on Computer Graphics 2003), 11(1), 2003.*
12. Schwarz M., Stamminger M. *Bitmask Soft Shadows / In Proc. of Eurographics Symposium on Rendering. – 2007. – Vol. 26, № 3.*
13. Soler C., Sillion F.X. *Fast calculation of soft shadow textures using convolution. In Computer Graphics (SIGGRAPH 1998), Annual Conference Series, pages 321–332. ACM SIGGRAPH, 1998.*
14. St-Amour J.-F., Paquette E., Poulin P. *Soft Shadows from Extended Light Sources with Penumbra Deep Shadow Maps. Graphics Interface 2005, Pp. 105-112, 2005.*
15. Whitted T. *An Improved Illumination Model for Shaded Display / Commun. ACM. – 1980. – Vol. 23, № 6. – P. 343-349.*
16. Williams L., *Casting curved shadows on curved surfaces // Computer Graphics. – 1978. Vol. 10, № 2. – P. 270-274.*