

Развитие метода световых сеток для алгоритма лучевой трассировки: аппроксимация решения, реализация на графическом акселераторе

Виктор Дебелов, Людмила Васильева, Илья Новиков
Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,
Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия
{debelov, ludvas}@oapmg.sccc.ru; limit@demakova.net

Аннотация

Наиболее физически корректные методы расчета изображений пространственных сцен (Монте-Карло и излучательность [1]) очень трудоемки и на практике применяются на порядки реже, чем метод обратной рекурсивной лучевой трассировки (ОРЛТ) [2], который дает вполне реалистические изображения сцен, построенных из поверхностей, имеющих отражающие свойства в достаточно широком диапазоне. В докладе рассматривается развитие метода световых сеток (МСС), аппроксимирующее решение, полученное лучевой трассировкой. МСС обладает следующими характеристиками: а) возможностью имитации на изображении мягких теней от точечных источников; б) ускорением расчета по сравнению с ОРЛТ для сложных сцен с большим количеством источников света.

В докладе также рассматривается задача реализации предложенной модификации МСС на графическом акселераторе (ГА).

Ключевые слова: лучевая трассировка, световые сетки, мягкие тени, графический акселератор.

1. ВВЕДЕНИЕ

В рассматриваемой постановке пространственная сцена – это непрозрачная кусочно-непрерывная поверхность S со следующими свойствами (например, см. [1]):

- В каждой точке поверхности определены зеркальный и диффузный коэффициенты отражения падающей световой энергии.
- Для поверхности определена операция пересечения с лучом.
- В каждой точке поверхности определена нормаль.

Сцена освещается nL точечными источниками, специфицированными интенсивностью, цветом излучения и позицией в пространстве L . Представим, что луч из камеры имеет ближайшее пересечение с S в точке P , тогда нам надо рассчитать в этой точке цвет закраски изображения. Основная расчетная формула обратной рекурсивной лучевой трассировки, введенной еще Уиттедом в 1980 году [2], может быть представлена (исходя из наших задач) следующим образом:

$$U_{RT}(P) = \sum_{i=1}^{nL} V(i, P) \Omega(i, P), \quad (1)$$

где $U_{RT}(P)$ – это искомая закраска, $V(i, P)$ – видимость (0 или 1) i -го источника из точки P , а $\Omega(i, P)$ учитывает все отражательные свойства поверхности в точке P и параметры i -го источника. Как определение точки P , так и вычисление теста на видимость $V(i, P)$, может заключаться в пересечении луча или отрезка со всеми геометрическими примитивами, из которых сконструирована сцена. Отсюда возникает вычислительная сложность алгоритма – для сцен, состоящих из нескольких десятков тысяч примитивов, время счета может исчисляться часами на современных персональных ЭВМ. Не останавливаясь подробно на этом вопросе, отметим, что в настоящее время для тестов видимости применяются различные ускорения типа иерархических сеток (Nested Grids) [3, 4] и им подобным. Основное назначение этих методов ускорения – это добиться, по возможности, выполнения следующего **критерия** (*):

тест пересечения отрезка со сценой должен занимать время приблизительно пропорциональное длине этого отрезка.

Алгоритм ОРЛТ теоретически может давать только четкие тени, поскольку освещение осуществляется только точечными источниками. Но дизайнер, ставя в сцене такие источники, все же ожидает, что они действуют как шарообразные лампы. В связи с этим задача имитации мягких теней в рамках ОРЛТ является достаточно популярной в компьютерной графике [5, 6]. Впервые метод световых сеток (МСС), как модификация ОРЛТ, был введен в работах [7, 8] и детально рассмотрен в [9]. Основная задача, решаемая на том этапе, – это имитация мягких теней при расчете изображений по алгоритму ОРЛТ. Реалистичность мягких теней по МСС была достаточно высока в сравнении с методами, разработанными другими авторами. Тем не менее, решение по МСС надо было как-то привязать к другим известным решениям, например, показать, как соотносятся изображения, рассчитанные по МСС и по эталонному ОРЛТ. При дальнейшем развитии метода световых сеток нам удалось построить его как аппроксимацию стандартного ОРЛТ [10].

2. МЕТОД СВЕТОВЫХ СЕТОК

Световая сетка LM – это равномерная сетка точек в пространстве сцены, h – шаг сетки. Для МСС важен еще один параметр kI , определяющий интерполяционную сферу радиуса $r = h \cdot kI$, которая будет определена ниже.

Шаг препроецирования. В каждой сеточной точке X определим маску видимости источников света $N_x = \{V(i, x)\}_{i=1}^{nL}$.

Введем обозначение $N_x(i) = V(i, x)$. Тогда расчет значения закраски по МСС $U_{LM}(P)$ для точки P можно описать следующим алгоритмом:

1. Введем интерполяционное множество сеточных точек $DLM(P)$, в которое сначала поместим все световые точки, лежащие внутри сферы с центром в P , т.е. $\|x_k - P\| \leq kl \cdot h$.
2. Отбросим те x_k , которые лежат с невидимой стороны непрозрачной поверхности, т.е. $(\vec{n}(P), x_k - P) \leq 0$, здесь $\vec{n}(P)$ – нормаль в точке P .
3. Отбросим те x_k , которые невидимы из точки P , т.е. заслоняются другими поверхностями сцены. Таким образом, для всех оставшихся точек выполняется условие видимости $V(x_k, P) = 1$.
4. Получили $DLM(P) = \{x_1, \dots, x_m\}$.
5. Если $DLM(P) \neq \emptyset$ (т.е. $m > 0$), то вычисляем следующее выражение:

$$U_{LM}(P) = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \left[\sum_{i: N_x^k(i)=1} \Omega(i, P) \right]. \quad (2)$$

6. Если $DLM(P) = \emptyset$, то мы применим формулу (1), т.е. стандартный алгоритм ОРЛТ.

Вдали от границ теней видимости близких сеточных точек совпадают, и формула (2) совпадает с формулой (1). А вот вблизи границы тени, с разных ее сторон, сеточные точки имеют различные видимости от источника, дающего данную тень. В связи с этим обеспечивается плавный переход от полной тени к полному ее отсутствию. А ширина этой зоны полутени определяется как удвоенный радиус интерполяционной сферы.

На рисунках приведены изображения простой модельной сцены, освещенной тремя точечными источниками света: а) четкие тени – расчет по алгоритму ОРЛТ (рис. 1); б) мягкие тени – расчет по МСС с различными параметрами световой сетки (рис. 2 и рис. 3). На рис. 4. приведено изображение теней от листьев деревьев. Это наиболее замечательная характеристика метода световых сеток. Другие "быстрые" методы, имитирующие мягкие тени в рамках модели ОРЛТ, распространяют зону полутени только вовне контура четкой теоретической тени, а МСС распространяет полутень как вовне, так и вовнутрь. Действительно, в реальной жизни тень, создаваемая лампой от мелкого объекта (меньше лампы), может вообще отсутствовать – фонарь на столбе и лист дерева.

3. ЗАМЕЧАНИЕ ПО СКОРОСТИ РАСЧЕТА ИЗОБРАЖЕНИЯ

Для сравнения скоростей расчета по обоим методам ОРЛТ и МСС достаточно сравнить затраты на использование форму-

лы (1) в ОРЛТ и формулы (2) в МСС, поскольку все остальные вычисления одни и те же. Пусть N_{pix} – это число пикселей изображения сцены, тогда нам надо оценить знак и порядок выражения

$$\Delta t = time(MCC) - time(ORLT).$$

В формуле (1) критической является операция вычисления видимости источника и точки – $V(i, P)$. Согласно критерию (*), введенному в п. 1, время выполнения этой операции пропорционально длине отрезка, соединяющего источник и точку P : $c_1 \|L_i - P\|$.

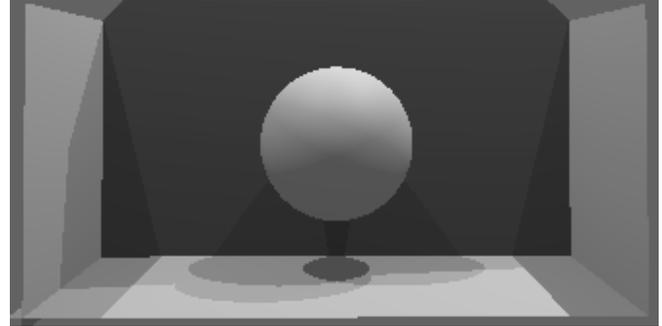


Рис. 1. Четкие тени. Расчет по алгоритму ОРЛТ

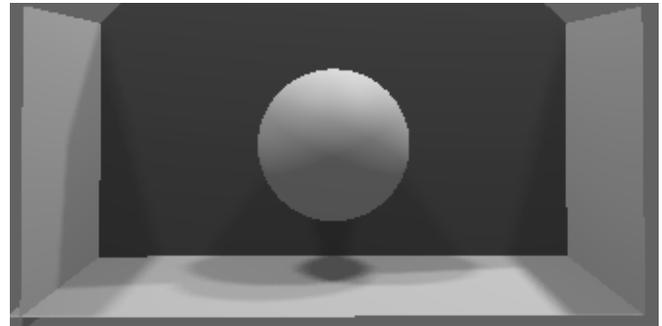


Рис. 2. Мягкие тени. Расчет по алгоритму МСС

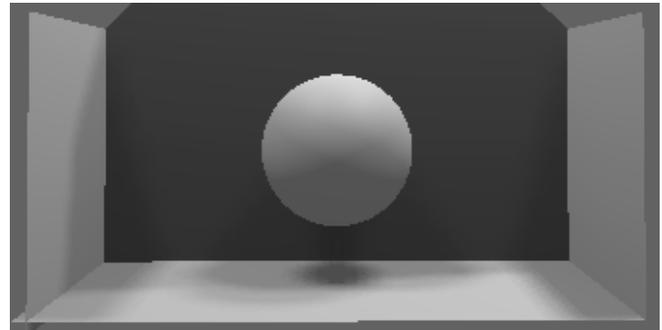


Рис. 3. "Более мягкие" тени. Расчет по алгоритму МСС

Реально шаг препроцессинга не выполняется, поскольку не все сеточные точки используются при расчете. Только перед вычислением по формуле (2) алгоритм МСС определяет видимости от источников сеточных точек, попавших в интерполяционное множество. В реальных расчетах число сеточных точек N_{LM} , для которых определены видимости источников, меньше N_{pix} , см. также [9]. Время определения одного

значения видимости $V(i, x)$ в сеточной точке x также определяется, как $c_1 \|L_i - x\|$. В целом на эту подзадачу трактуются $c_1 \|L_i - x\| \cdot N_{LM}$. На шаге 3 алгоритма производится вычисление видимости $V(x_k, P)$ для каждой сеточной точки x_k , попавшей в полусферу с центром в точке P , а это примерно $c_1 \|P - x_k\|$. В среднем расстояния $\|L_i - P\|$ и $\|L_i - x\|$ одного порядка $LONG$ и достаточно большие – сравнимы с габаритами всей сцены, а расстояние $\|P - x_k\|$ ограничено радиусом сферы $SHORT$. Обозначим через $n(kI)$ число точек сетки, попавших в полусферу, тогда на основании предыдущих рассуждений оценим Δt :

$$\Delta t \sim \{N_{LM} \cdot nL \cdot LONG + Npix \cdot n(kI) \cdot SHORT\} - \{Npix \cdot nL \cdot LONG\}$$



Рис. 4. Расчет по алгоритму ОРЛТ (слева), расчет по алгоритму МСС (справа)

Отсюда видно, что при росте числа источников и разрешения изображения в сложных сценах наступает момент, когда $\Delta t < 0$, т.е. алгоритм МСС начинает выигрывать по времени у алгоритма ОРЛТ.

4. ЗАМЕЧАНИЕ ПО КАЧЕСТВУ ИЗОБРАЖЕНИЯ

Самым вычислительно сложным является шаг 3, приведенного выше алгоритма. В работах [7 – 9] приводились изображения, для расчета которых этот шаг не применялся, т.е. не делались тесты видимости $V(x_k, P) = 1$. Тем не менее, сцены выглядели достаточно реалистично. Число таких тестов – это число точек, попавших в полусферу, – является функцией от $r = h \cdot kI$.

kI	2.1	2.5	3.0
Среднее число тестов	16.5	30.4	53.4

Очевидно, что игнорирование этих тестов видимости существенно ускоряет расчет по МСС:

$$\Delta t \sim \{N_{LM} - Npix\} \cdot nL \cdot LONG.$$

Обозначим через МСС1 модификацию МСС, при которой не производятся тесты видимости на шаге 3. Судя по таблице, МСС1 работает в 16 (30 или 53) раз быстрее и вполне пригоден для получения тестовых изображений во время отладки геометрии и освещенности сцены.

5. РЕНДЕРИНГ ДИНАМИЧЕСКИХ СЦЕН

При расчете анимаций очевидно желание как можно полнее использовать информацию, полученную при расчете предыдущего кадра.

Движение камеры, динамическое изменение отражающих свойств поверхностей, изменение цвета и интенсивности источников освещения. В данном случае геометрия сцены не меняется от кадра к кадру, поэтому однажды рассчитанное значение в точке световой сетки просто используется при расчете последующих кадров.

Изменение геометрии сцены. Здесь оказывается существенным соотношение количеств статических и динамических элементов сцены. В настоящее время авторами проводится исследование применительно к "уличным" сценам, когда статическая часть достаточно большая – городской квартал или часть пустыни, а динамические объекты (движущиеся автомобили, качающиеся деревья и т.п.) по габаритам значительно меньше. Для таких сцен мы поддерживаем различные Nested Grid для статической части и для каждого из динамических объектов. Это связано с тем, что перестройка иерархической сетки для всей сцены при переходе от кадра к кадру является достаточно дорогой по времени.

6. РЕАЛИЗАЦИЯ МСС НА ГРАФИЧЕСКОМ АКСЕЛЕРАТОРЕ

Рассмотрим снова МСС, опираясь на формулу (2). Нам необходимо вычислять:

1. Значения шкал видимости источников света в точках световой сетки x_k .
2. Тесты видимости $V(x_k, P)$ для сеточных точек, лежащих внутри полусферы с центром в точке P .
3. Значения $\Omega(i, P)$ в точках поверхности сцены.

Современный графический ускоритель позволяет применить к сцене Z-буфер и выполнить универсальные вычисления. Заметим, что реализация лучевой трассировки не имеет в настоящее время практического значения, поскольку акселератор, как и центральный процессор (ЦП), не предлагает средств, которые поддерживали бы введенный в п. 1 критерий (*). В отличие от полного МСС модификация МСС1 не требует вычисления тестов видимости $V(x_k, P)$. Именно эту модификацию мы и реализовали на ускорителе. Реализация имеет следующие особенности:

- Световая сетка хранится как трехмерная текстура. Каждая точка сетки занимает 4 байта (RGBA) и характеризует видимость сеточной точки для источников (до 31-го).
- При вычислении значения видимости для каждого источника создается камера, верхушка которой находится в данном источнике. Раствор камеры достаточен для того, чтобы в пирамиду видимости вошла вся сцена. Выполняется операция Z-буфера над примитивами сцены. На основе значений глубины (расстояний от источника \dot{i}) определяются значения $N_x^k(i)$. Для каждой сеточной точки рассчитывается значение глубины в сцене и сравнивается со значением, лежащим в z-буфере. В случае если значение из z-буфера больше, узел виден источником, в противном случае – нет. Очевидно, в случае слишком большого угла раствора камеры необходимо пирамиду видимости делить на несколько меньших. В настоящее время ведется исследование для случаев, когда источник находится внутри сцены.
- Вычисление $\Omega(i, P)$ производится на основе запомненных в текстуре сеточных значений, параметров источника и материала поверхности.

Для расчета изображения используется пиксельный шейдер версии 2.x, особенностью которого является поддержка логического ветвления и управление последовательностью исполнения инструкций. Эта технология реализована в чипсетах GeForce 6600FX от NVIDIA и Radeon X800 от ATI. При расчете видимости пикселя выбираются узлы световой сетки из полусферической окрестности и применяется формула (2). В результате получается интенсивность освещения в пикселе.

Вычислительные затраты. Чтобы оценить трудоемкость метода на ЦП, достаточно понять, что из каждого узла световой сетки пускаются теневые зонды на каждый источник света, что требует нахождения пересечения каждого зонда со всей сценой.

Реализация метода на ГА не требует генерации теневых зондов, т.к. использует аппаратный z-буфер, что делает метод гораздо менее чувствительным к сложности сцены и резко уменьшает затраты на создание световой сетки.

Другим преимуществом ГА является поддержка векторных операций над пикселем, тогда как на ЦП значение закраски для каждого цветового канала считается отдельно. К тому же пиксельные операции на ГА выполняются параллельно на нескольких пиксельных конвейерах.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагаемый метод расчета фотореалистических изображений расширяет арсенал средств визуализации пространственных сцен. Используя сгущение или разреживание сетки в различных местах сцены, а также регулируя радиус интерполяционной сферы, дизайнер может подбирать плавность перехода и ширину полутеней на изображении.

На основе модификации МСС1 уже сейчас можно применять графические акселераторы для быстрого расчета кадров во время отладки компоновки сцены и ее освещения, подготовки сценария анимации и т.п. На рис. 5 и 6 приведены изображения, полученные на акселераторе.

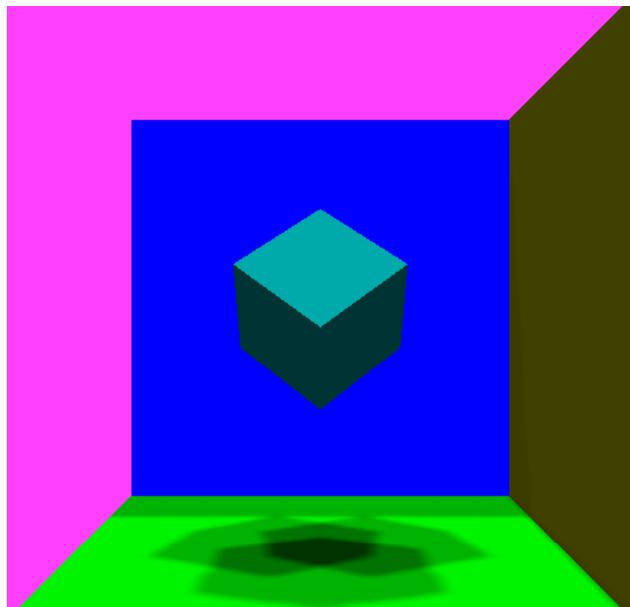


Рис. 5. Расчет на ГА по алгоритму МСС1



Рис. 6. Расчет на ГА по алгоритму МСС1

Авторы выражают благодарность А.М. Мацокину, который предоставил ряд геометрических алгоритмов, Д. Арискину и А. Золотухину, участвовавшим в реализации и проведении численных экспериментов.

Данная работа осуществлялась при частичной финансовой поддержке института SAIT (Samsung Advanced Institute of Technology), Южная Корея.

8. БИБЛИОГРАФИЯ

- [1] Foley J., Van Dam A., a.o. *Computer Graphics Principles and Practice / 2nd Edition.* – Addison Wesley, 1990. [2].
- [2] Whitted T. *An Improved Illumination Model for Shaded Display / Commun. ACM.* – 1980. – Vol. 23, № 6. – P. 343-349.
- [3] Klimaszewski K. S., Sederberg T.W. *Faster ray tracing using adaptive grids / IEEE Computer Graphics and Applications.* – 1997. – Vol. 17, № 1. – P. 42-51.
- [4] Amanatides J., Woo A. *A Fast Voxel Traversal Algorithm for Ray Tracing / Proc. Eurographics'87.* – Amsterdam, Netherlands. – 1987. – P. 1-10.
- [5] Parker S., Shirley P., Smits B. *Single Sample Soft Shadows / Tech. Rep. UUCS-98-019.* – Computer Science Department, University of Utah. – 1998.
- [6] Haines E. *Soft Planar Shadows Using Plateaus / J. of Graphics Tools.* – 2001. – Vol. 6, № 1. – P. 19-27.
- [7] Дебелов В.А., Севастьянов И.М. *Оригинальный подход к имитации мягких теней и учету диффузных переотражений в лучевой трассировке // Тр. 11-й междунар. конф. по компьютерной графике и машинному зрению Графikon'2001.* – Нижний Новгород, 2001. – С. 18–24.
- [8] Debelov V.A., Sevastyanov I.M. *Light Meshes – Original Approach to Produce Soft Shadows in Ray Tracing // Lecture Notes in Computer Science.* – Springer-Verlag. – 2002. – Vol. 2330. – P. 13–21.
- [9] Debelov V.A., Sevastyanov I.M. *Soft shadows as interpolation of visibility // Future Generation Computer Systems.* – 2004. – Vol. 20, № 8. – P. 1299–1315.
- [10] Дебелов В.А. Васильева Л.Ф. *Аппроксимация решения алгоритма лучевой трассировки при синтезе реалистических изображений // Междунар. научно-практич. конфер. "Связь-2004". Материалы семинара "Вычислительные методы и решение оптимизационных задач". 22-29 авг. 2004, Иссык-Куль.* – С. 64-69.

Об авторах

Дебелов Виктор Алексеевич – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории численного анализа и машинной графики Института вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, доцент Новосибирского государственного университета (читает курс лекций по машинной графике).

E-mail: debelov@oapmg.sgcc.ru

Васильева Людмила Федоровна – кандидат физ.-мат. наук, старший научный сотрудник той же лаборатории.

E-mail: ludvas@oapmg.sgcc.ru

Новиков Илья Евгеньевич – магистрант механико-математического факультета Новосибирского государственного университета.

E-mail: limit@demakova.net

Light meshes development: approximation of ray tracing solution, GPU implementation

Abstract

Physically-based synthesis of photorealistic images of 3D scenes is fulfilled on the base of the rendering equation. The most accurate methods of rendering (Monte Carlo and radiosity) are very time consuming and used in practice too rare with respect to light backwards recursive ray tracing algorithm (RRTA), which provide quite realistic images of scenes consisting of surfaces with different reflectance properties. The given report is devoted to a new light meshes method, which allows: a) to simulate soft shadow from point light sources; b) to speedup calculations of complex scenes with respect to RRTA if an image has large resolution or a scene is illuminated by a large number of point light sources. The presented modification of Light Meshes Method (LMM) provides an approximation of RRTA solution.

The authors describe an implementation of LMM on GPU also.

Keywords: Ray tracing, light mesh, soft shadow, GPU.

About the author(s)

Victor A. Debelov is a doctor of technical sciences and holds position of leading researcher at Computer Graphics Lab. Of the Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics. Also he is an associate professor at Novosibirsk State University.

E-mail: debelov@oapmg.sgcc.ru

Lioudmila F. Vassilieva, Ph.D., holds position of senior researcher at the same Lab.

E-mail: ludvas@oapmg.sgcc.ru

Iliya Novikov comes to the end of his Master course at Novosibirsk State University.

E-mail: limit@demakova.net