

УДК 681.3.06

УСКОРЕНИЕ ВЫЧИСЛЕНИЙ ФОРМ-ФАКТОРОВ ПРИ РАСЧЕТЕ ОСВЕЩЕННОСТИ СЦЕНЫ МЕТОДОМ ИЗЛУЧАТЕЛЬНОСТИ

© 2012 г.

П.С. Кулясов, Е.А. Никулин

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

p.kulyasov@gmail.com

Поступила в редакцию 15.02.2012

Рассмотрена задача построения высокореалистичных изображений. Предложены алгоритмы расчета форм-факторов и адаптивного разбиения сцены на фрагменты, позволяющие ускорить работу метода излучательности за счет сокращения объема вычислений наиболее трудоемкого из его этапов. На их основе реализована система визуализации трехмерных сцен и проведен анализ достигнутого прироста производительности.

Ключевые слова: компьютерная графика, синтез изображений, излучательность, форм-фактор, вычислительная сложность алгоритма.

Введение

В области компьютерной графики одной из наиболее актуальных задач является синтез высокореалистичных изображений, т.е. изображений, полностью или до некоторой степени детализации соответствующих реальности. В отличие от известных методов построения изображений метод излучательности [1] основан на законе сохранения и переноса энергии в замкнутой системе. Благодаря этому возможен учет сложных оптических эффектов, например, диффузного отражения, и расчет освещенности протяженными источниками света.

Следует отметить, что наряду с перечисленными выше достоинствами метод излучательности обладает крупным недостатком, заключающимся в необходимости значительных временных затрат для выполнения расчетов и обусловленным высокой вычислительной сложностью алгоритма. Оценим вычислительную сложность классического алгоритма метода излучательности относительно числа фрагментов n , на которые разбивается сцена.

Для оценки вычислительной сложности алгоритма необходимо определить сложность основных его шагов [1]:

1. Разбиение объектов сцены на фрагменты.
2. Расчет форм-факторов для всех пар фрагментов сцены (форм-фактор представляет собой долю световой энергии, покинувшей один фрагмент и полученной другим фрагментом; имеет значение в диапазоне от 0 до 1).
3. Решение системы уравнений энергетического баланса.

Наибольший объем вычислений приходится на шаги 2 и 3, сложность которых определяется следующим образом:

1. Необходимость расчета n^2 форм-факторов. В том случае, когда нет необходимости учета видимости фрагментов, форм-фактор может быть определен с константной сложностью, однако требование учета видимости приводит к необходимости проверки каждого фрагмента на перекрытие, в результате чего сложность определения форм-фактора становится $O(n)$. В результате итоговая сложность получения всех форм-факторов составляет $O(n^3)$.

2. Решение системы линейных алгебраических уравнений точным методом (например, методом Гаусса) также имеет кубическую сложность $O(n^3)$. Однако использование численных методов (например, метода итераций) позволяет сократить время вычислений.

В результате вычислительная сложность алгоритма метода излучательности относительно числа фрагментов, на которые разбивается сцена, получается кубической $O(n^3)$.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что сложность второго шага (расчет форм-факторов) играет определяющую роль в результирующей сложности алгоритма метода излучательности. В данной работе предлагаются два подхода к снижению последней: алгоритм расчета форм-факторов, обладающий квадратичной вычислительной сложностью, а также алгоритм разбиения сцены на фрагменты, позволяющий уменьшить их количество и, тем самым, объем вычислений при расчете форм-факторов.

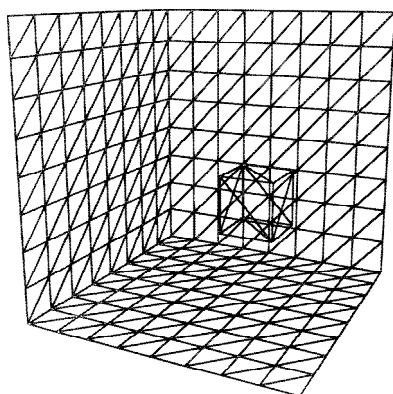


Рис. 1. Разбиение сцены на фрагменты

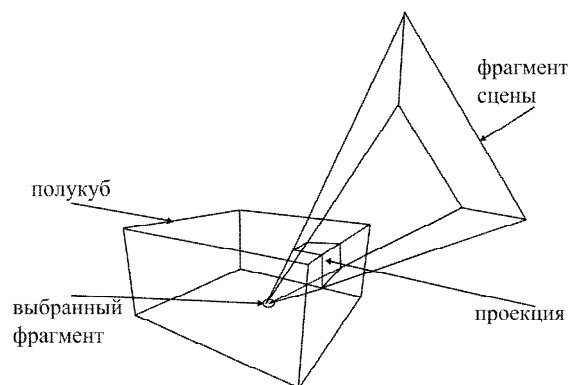


Рис. 2. Построение полукуба на выбранном фрагменте

1. Алгоритм расчета форм-факторов

Разработанный алгоритм расчета форм-факторов основывается на перенесении части вычислений с центрального процессора ЭВМ на графический и предполагает следующую последовательность действий:

1. Сцена равномерно разбивается на непесекающиеся треугольные фрагменты (рис. 1).

2. Каждому фрагменту присваиваются порядковый номер и свой уникальный цвет (для работы алгоритма необходимо, чтобы глубина цвета (бит/пиксель) была достаточной для назначения каждому фрагменту уникального цвета).

3. Выбирается один фрагмент (фрагменты рассматриваются согласно их порядковым номерам).

4. Вокруг центральной точки выбранного фрагмента строится полукуб (рис. 2).

5. Строятся проекции остальных фрагментов сцены на все пять граней полукуба. При построении проекций фрагментов необходимо учитывать их видимость (фрагменты могут полностью или частично перекрываться). Этот шаг алгоритма выполняется с помощью средств OpenGL: использование буфера глубины является одним из наиболее легких путей удаления невидимых поверхностей [2].

6. Вычисляются площади проекций каждого фрагмента сцены на каждую из пяти граней полукуба. Площадь проекции определяется числом пикселей одного цвета, поскольку цвет уникален для каждого фрагмента сцены.

7. Для каждого фрагмента суммируются площади пяти его проекций на грани полукуба. Для исключения искажений площади суммируются с учетом весовых коэффициентов, зависящих от расстояния между проецируемым фрагментом и гранью полукуба.

8. Вычисляются форм-факторы всех пар фрагментов (выбранного, на котором был построен полукуб, и всех остальных фрагментов

сцены) – они равны отношению соответствующей суммы площадей проекций фрагмента на грани полукуба к суммарной площади граней полукуба. Так находится одна строка матрицы форм-факторов.

9. Шаги 3–8 выполняются для всех еще не рассмотренных фрагментов сцены, пока не будут получены все строки матрицы форм-факторов.

Оценим вычислительную сложность представленного алгоритма расчета форм-факторов относительно числа фрагментов n , на которые разбивается сцена. Использование метода полукуба позволяет определять не отдельные форм-факторы, а сразу целую строку матрицы. Для этого все фрагменты сцены с учетом их глубины (видимости) проецируются на все грани полукуба, что может быть выполнено с линейной сложностью $O(n)$. Поскольку количество фрагментов равно n , вычислительная сложность расчета форм-факторов получается квадратичной $O(n^2)$.

2. Алгоритм адаптивного разбиения сцены

Другим путем ускорения расчета форм-факторов является уменьшение количества фрагментов, на которые разбивается сцена. В представленном выше алгоритме, так же как и в том, который применяется в классическом методе излучательности [1], используется равномерное разбиение сцены [3], в связи с чем уменьшение количества фрагментов возможно только за счет увеличения их размера, что приведет к потере точности вычислений и, в конечном итоге, ухудшению качества получаемого изображения. Следовательно, для того чтобы добиться сокращения количества фрагментов и не потерять при этом качество изображения, необходим алгоритм разбиения, учитывающий взаимодействие между объектами. В тех участках сцены, где объекты расположены близко

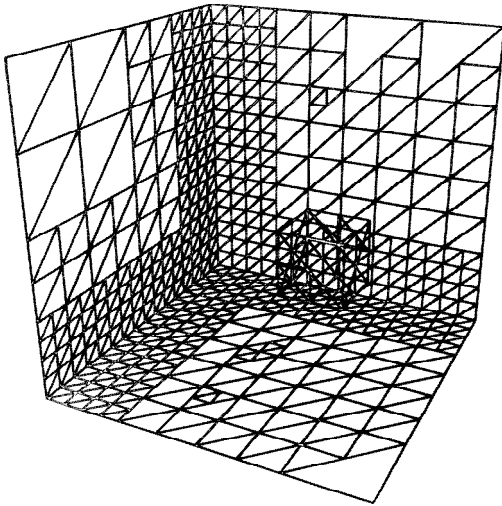


Рис. 3. Адаптивное разбиение сцены на фрагменты

друг к другу и их взаимодействие выражено сильно, необходимо разбиение на достаточно мелкие фрагменты, а в участках, где взаимодействие выражено достаточно слабо, допустимо разбиение на более крупные фрагменты.

В качестве меры взаимодействия объектов сцены предлагается использовать форм-фактор. Поскольку для расчета форм-факторов необходимо предварительное разбиение сцены на фрагменты, требующее дополнительных вычислений на начальном этапе, суммарный объем вычислений может быть снижен за счет применения следующего подхода. Сцена разбивается на фрагменты очень большого размера, вследствие чего их количество получится небольшим, и расчет форм-факторов потребует малого объема вычислений. Затем рассчитанные форм-факторы следует сравнивать с заданным значением допустимой погрешности вычислений, после чего фрагменты, форм-фактор которых больше значения погрешности, разбиваются на более мелкие, а фрагменты с форм-фактором меньше значения погрешности остаются большого размера. Такое разбиение следует выполнять циклически до тех пор, пока сцена не будет разбита на фрагменты, форм-факторы которых меньше значения погрешности. Для того чтобы избежать чрезмерного разрастания количества фрагментов, используется дополнительное условие выхода из цикла: ограничение на минимально допустимый размер фрагмента. В результате сцена оказывается разбитой на фрагменты, размер которых зависит от степени взаимодействия объектов (рис. 3).

На основании изложенного выше разработанный алгоритм адаптивного разбиения сцены предполагает следующую последовательность действий:

1. Сцена предварительно разбивается на фрагменты большого размера. Количество этих фрагментов будет достаточно небольшим, вследствие чего расчет форм-факторов на следующем этапе не потребует значительных временных затрат.

2. Для всех пар фрагментов рассчитываются форм-факторы и сравниваются с некоторым наперед заданным значением допустимой погрешности вычисления форм-факторов.

3. Фрагменты, форм-факторы которых больше значения допустимой погрешности, разбиваются на более мелкие. Фрагменты, форм-факторы которых меньше значения допустимой погрешности, остаются большого размера.

3. Экспериментальная часть

На основе изложенных выше алгоритмов разработана система визуализации трехмерных сцен, с помощью которой проведено сравнение производительности предложенных алгоритмов и реализации классического алгоритма метода излучательности.

В качестве тестовых использовались следующие сцены: сцена 1 – семь простых объектов (под простым объектом будем понимать объект в форме простой геометрической фигуры – куб, сферу и т.д.) и два протяженных источника света, сцена 2 – восемь простых объектов, один высокополигональный объект, три протяженных источника света, сцена 3 – восемь простых объектов, один высокополигональный объект, четыре протяженных источника света (два из источников света имеют форму высокополигональных объектов). Для каждой из этих сцен были рассчитаны форм-факторы при четырех различных значениях размера фрагмента, на которые она разбивается.

В табл. 1 представлено сравнение результатов работы программных реализаций классического алгоритма метода излучательности и разработанного, в основе которого лежит предлагаемый метод расчета форм-факторов. Полученный прирост производительности будем определять по следующей формуле:

$$T = \frac{v_2 - v_1}{v_1} \cdot 100\%,$$

где v_1 – скорость работы классического алгоритма (количество сцен, рассчитываемых в единицу времени, определяется по формуле $v_1 = \frac{1}{t_1}$), v_2 – скорость работы разработанного алгоритма (определяется аналогично v_1).

Таблица 1

№ сцены	Размер фрагмента	Количество фрагментов	Время (классический алгоритм) t_1 , с	Время (разработанный алгоритм) t_2 , с	Прирост производительности T
1	10.0	552	5	1.328	276.51%
	1.0	2796	27	6.171	337.53%
	0.7	7407	107	19.485	449.14%
	0.1	32688	681	122.350	456.60%
2	10.0	4676	46	10.235	349.44%
	1.0	6896	82	16.001	412.47%
	0.7	11684	188	31.390	498.92%
	0.1	38672	1178	155.844	655.88%
3	10.0	8148	169	30.344	456.95%
	1.0	13744	299	35.672	738.19%
	0.7	18868	586	56.797	931.74%
	0.1	41488	2633	203.047	1196.74%

Таблица 2

№ сцены	Размер фрагмента	Количество фрагментов (равномерное разбиение)	Количество фрагментов (адаптивное разбиение)	Время (равномерное разбиение) t_1 , с	Время (адаптивное разбиение) t_2 , с	Прирост производительности T
1	10.0	552	534	1.328	2.265	-41.37%
	1.0	2796	2190	6.171	10.203	-39.52%
	0.7	7407	3954	19.485	20.171	-3.40%
	0.1	32688	9438	122.350	58.890	107.76%
2	10.0	4676	4603	10.235	19.781	-48.26%
	1.0	6896	6380	16.001	27.718	-42.27%
	0.7	11684	8090	31.390	39.891	-21.31%
	0.1	38672	13361	155.844	85.031	83.28%
3	10.0	8148	8121	30.344	57.063	-46.82%
	1.0	13744	13525	35.672	65.656	-45.67%
	0.7	18868	15994	56.797	91.156	-37.69%
	0.1	41488	23137	203.047	164.453	23.47%

Следует отметить, что величина прироста производительности зависит от количества фрагментов, на которые разбивается сцена: чем больше это значение, тем больший достигается прирост производительности. Данный факт объясняется тем, что использование разработанного алгоритма в отличие от классического позволяет определять не отдельные форм-факторы, а сразу целую строку матрицы форм-факторов, в результате чего при увеличении количества фрагментов рост затрат времени на расчеты менее значителен, чем в случае классического алгоритма. Количество фрагментов, в свою очередь, зависит от заданного максимального значения размера фрагмента, а также от сложности сцены (количества объектов, их размеров, взаимного расположения, а также наличия высокополигональных объектов, которые не всегда могут быть разбиты на более крупные фрагменты заданного размера).

Таким образом, достигнутый прирост производительности составил примерно 200–1100%, что соответствует ускорению расчетов в 3–12 раз.

В табл. 2 представлено сравнение результатов работы разработанного алгоритма, в основе которого лежит предлагаемый метод расчета

форм-факторов, с включенным механизмом адаптивного разбиения сцены и без него. Значение допустимой погрешности вычисления форм-факторов задано равным 0.02 – наибольшему значению (найденному экспериментальным путем), при котором не наблюдается заметной потери качества получаемого изображения.

Следует отметить, что применение алгоритма адаптивного разбиения сцены дает выигрыш производительности только в случае малых размеров фрагментов разбиения сцены, т.к. только в этом случае затраты времени на предварительное разбиение сцены не превышают выигрыша времени при последующем расчете форм-факторов. Данную особенность не следует считать недостатком алгоритма, поскольку именно в случае малых размеров фрагментов достигается высокое качество получаемого изображения. Еще одной особенностью является меньший прирост производительности при наличии в сцене высокополигональных объектов ввиду невозможности их разбиения на крупные фрагменты без потери точности расчетов, вследствие чего уже на этапе предварительного разбиения сцены получается большое количество фрагментов.

Таблица 3

Значение допустимой погрешности вычисления форм-факторов	Количество фрагментов (сцена 1)	Время вычисления форм-факторов (сцена 1), с	Количество фрагментов (сцена 2)	Время вычисления форм-факторов (сцена 2), с
0.5	228	1.312	4439	19.078
0.4	363	1.843	4562	19.812
0.3	522	2.796	4736	20.813
0.2	1311	6.781	5459	24.937
0.1	4041	21.875	8117	41.172
0.05	5406	30.015	9329	48.953
0.02	9438	58.890	13361	85.031
0.01	11877	72.203	15857	94.828

В табл. 3 представлены результаты работы алгоритма адаптивного разбиения при различных значениях допустимой погрешности вычисления форм-факторов для сцены, состоящей из простых и высокополигональных объектов (сцена 2), и сцены, состоящей только из простых объектов (сцена 1).

Результаты исследований показали, что характер зависимости количества фрагментов от значения допустимой погрешности вычисления форм-факторов одинаков для сцен с разным количеством и типом объектов.

Таким образом, разработанный алгоритм адаптивного разбиения позволяет не только ускорить расчет форм-факторов (по сравнению с алгоритмом равномерного разбиения, используемым в классическом методе излучательности), но и влиять на время вычислений за счет контролируемого снижения либо повышения качества получаемого изображения.

Заключение

Разработанная система позволяет получать высокореалистичные изображения трехмерных сцен на основе метода излучательности, основанного на законе сохранения и переноса энергии в замкнутой системе. Применение разработанных алгоритмов расчета форм-факторов и адаптивного разбиения сцены позволяет значительно ускорить работу метода излучательности за счет сокращения объема вычислений на наиболее трудоемком этапе вычисления форм-факторов при расчете освещенности сцены.

Список литературы

1. Cohen M.F., Wallace J.R. Radiosity and realistic image synthesis. New York: Academic Press Professional, 1995. 381 p.
2. Ву М., Девис Т., Нейдер Дж., Шрайнер Д. OpenGL. Руководство по программированию. 4-е изд. СПб.: Питер, 2006. 624 с.
3. Никулин Е.А. Компьютерная геометрия и алгоритмы машинной графики: Учеб. пособие для вузов. СПб.: БХВ-Петербург, 2003. 560 с.

ACCELERATING THE FORM FACTOR COMPUTATION IN SCENE ILLUMINATION CALCULATIONS BY THE RADIOSITY METHOD

P.S. Kulyasov, E.A. Nikulin

The problem of highly realistic image synthesis is considered. We propose the algorithms for computing the form factors and for adaptive partitioning of the scene into fragments to accelerate the radiosity method by reducing the amount of computation at the most time-consuming stage. Based on these algorithms, a three-dimensional scene visualization system has been implemented and an analysis has been carried out of the increase in performance achieved.

Keywords: computer graphics, image synthesis, radiosity, form factor, computational complexity of an algorithm.