

# Моделирование отражательных свойств материалов плоских объектов по фотоизображениям

Андрей Ильин, Андрей Лебедев, Виталий Синявский, Алексей Игнатенко

*Факультет Вычислительной Математики и Кибернетики*

*Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия*

[ailyin, alebedev, vsinyavsky, ignatenko}@graphics.cs.msu.ru](mailto:{ailyin, alebedev, vsinyavsky, ignatenko}@graphics.cs.msu.ru)

## Аннотация

Синтез реалистичных изображений является обязательным этапом при проектировании и предварительном расчете освещенности материалов автомобилей, зданий, помещений и т.п. Для физической корректности синтеза необходимо иметь средства для адекватного представления моделей материалов в цифровом виде. В данной работе предлагается физически корректная модель освещения и способ её компактного хранения. Разработанная модель освещения автоматически реконструируется по небольшому числу фотоизображений плоской поверхности объекта. В работе предложена схема интерактивной визуализации модели материала с использованием графического процессора (GPU).

*Ключевые слова: модели освещения, реконструкция моделей материалов, интерактивная визуализация, ДФО*

## 1. Введение

В настоящее время существует множество различных подходов для реконструкции моделей материалов. Все они отличаются способом получения данных, используемой моделью освещения и её форматом хранения, схемой визуализации модели материала.

Предлагаемый нами подход основан на получении данных о материале с фотоизображений. При этом поверхность материала считается плоской, что избавляет от необходимости восстанавливать информацию о геометрии поверхности материала. Разработанные нами алгоритмы производят восстановление ДФО (двулучевая функция отражения) и представляют её в специальном формате. Для наиболее полного восстановления разработанной модели материалов требуется порядка 5-6 фотографий. При этом весь процесс реконструкции абсолютно автоматический. От пользователя требуется только набор фотоизображений.

Для материалов с ярким бликом имеется поддержка изображений широкого динамического диапазона, которые можно получить из нескольких обычных фотоизображений, сделанных с разной выдержкой.

Также были разработаны алгоритмы для интерактивной визуализации моделей с использованием графического процессора (GPU).

В данной работе были получены следующие результаты:

- Разработана модель освещения, являющаяся физически корректной, полностью реконструируемая по небольшому числу входных данных и обеспечивающая реалистичность на стадии визуализации;

- Реализован алгоритм для автоматической реконструкции предложенной модели освещения; проведена оценка объема входных данных, обеспечивающих требуемое качество на этапе визуализации;
- Предложен формат для хранения и визуализации моделей освещения, занимающий небольшой объем памяти; для формата предложена схема интерактивной визуализации на GPU;

В следующем разделе приводится краткий обзор существующих методов реконструкции моделей материалов. В разделе 3 производится описание необходимых входных данных для предложенных алгоритмов и их предобработка. В разделе 4 описывается реализованная модель освещения, формат ее хранения и приводится алгоритм восстановления данных моделей по фотоизображениям. Раздел 5 посвящен схеме интерактивной визуализации предложенной модели. В разделе 6 производится анализ необходимых данных. В заключении, в разделе 7 изложены основные результаты.

## 2. Обзор существующих методов

Все существующие модели освещения можно условно разбить на две группы моделей: аналитических и заданных ДФО (двулучевая функция отражения). Аналитические модели – это параметрическое семейство функций яркости точки материала от положения наблюдателя и источника света. Как правило, они зависят от небольшого числа параметров, что приводит к нереалистичному моделированию реальных материалов. К тому же некоторые аналитические модели (например, модель Фонга) не являются физически корректными, а значит, они непригодны для предварительного расчета освещения в задачах проектирования. В работе [1] представлена система, которая по набору фотоизображений восстанавливает аналитические модели. Из-за неточных и неполных данных о яркости материала, получаемых с фотографий, в оптимизационном процессе происходит неточное определение параметров модели.

Другой подход заключается в вычислении ДФО [2]. Часто ДФО представляется в табличном виде [3]. Доступ к таблице осуществляется по четырем аргументам: двум углам, задающим направление на источник света и двум углам, задающим направление на камеру. Для большинства материалов, необходима достаточно подробная таблица (достаточно малый шаг по углам) и, как следствие, большие объемы для хранения данных, записанных в таблице. Проблема хранения особенно актуальна для современных графических приложений, работающих в реальном времени. В них используют аппаратную поддержку вычислений на графическом процессоре, что требует хранения табличных ДФО в памяти видеокарты. Подобные аппаратные

ограничения сильно сужают класс реконструированных типов материалов.

Для решения проблем с необходимым большим объемом памяти применяют различные способы. Один из них – факторизация 4-х мерной функции на две двумерные функции. При этом используется свойство взаимности света [2]. Этот подход позволяет сильно сократить размеры таблиц. Также для него разработаны эффективные схемы интерактивной визуализации на GPU.

Одним из решений, является предоставление модели материала в виде табличной функции, определенной на неравномерной сетке. При этом сетка является более детализированной в зоне блика материала и менее детализированной в остальных областях. Однако при использовании подобного подхода сильно усложняются алгоритмы аппаратного ускорения визуализации таких сеточных функций.

Наш подход является компромиссом между непосредственным хранением табличной ДФО и параметрическим представлением материалов. При этом удается решить проблемы, связанные с физической корректностью модели, большими объемами памяти для хранения, сложностью реконструкции.

На стадии получения данных используются различные подходы. Некоторые из существующих методов предполагают использование сложных фотометрических установок [4]. Другие же используют фотоизображения объекта, сделанные с разных позиций камеры. При этом в ряде работ предлагается получать изображения с разной выдержкой для последующего восстановления изображений широкого динамического диапазона [5]. Это необходимо для восстановления моделей материалов с очень ярким бликом. В данной работе мы используем именно такой подход. При восстановлении моделей материалов по фотоизображениям критическим фактором является точность калибровки камеры и положения источника света.

В ряде работ помимо восстановления материала реконструируется информация о геометрии объектов. Это достигается путем введения в сцену дополнительных объектов, сделанных из того же материала. В работе [7] используется шарик для определения направления на источник света. Также предполагается, что рассматриваемые материалы хорошо отражают свет. В нашем подходе изначально предполагается, что поверхность материала является плоской.

Некоторые из существующих методов позволяют восстанавливать широкий класс материалов [8]. Наша модель освещения способна качественно задавать только изотропные материалы. Тем не менее, большинство материалов реального мира являются изотропными, поэтому подобные ограничения на не являются критичными.

### 3. Получение данных

Получение и преобработка данных состоит из трех шагов:

- Фотографирование плоской поверхности материала с разной выдержкой;
- Получение изображений широкого динамического диапазона;

- Восстановление положения источников света и камеры относительно образца материала.

На первом этапе необходимо сфотографировать плоский объект. Обязательным условием последующего корректного восстановления материала является регистрация бликов материала на фотографии. Для этой цели камера и источник располагаются специальным образом относительно образца (Рис.1).

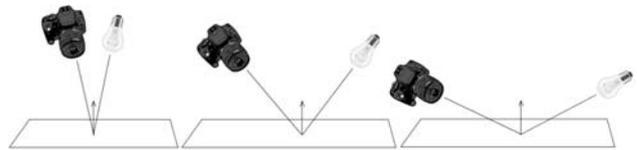


Рисунок 1: Схема расположения камер и источников относительно плоского объекта.

Для каждого положения камеры делается три снимка с разной выдержкой (Рис.2). Большинство реальных материалов устроено таким образом, что отношение яркости блика к яркости самых темных точек материала очень велико. Чтобы передать весь диапазон яркостей, необходимо использовать изображения широкого динамического диапазона. Мы получаем эти изображения из обычных изображений, сделанных с разной выдержкой, также как это сделано в [9].



Рисунок 2: Примеры фотографий, сделанных с разной выдержкой.

На последнем этапе происходит восстановление положения камеры и источника. Положение камеры вычисляется путем решения PnP проблемы [6]. Фактически рассматриваемые нами образцы являются прямоугольными, т.к. для удобства на любую поверхность, может быть положен лист бумаги с прямоугольным вырезом известного размера. Методами машинного зрения автоматически выделяются углы прямоугольника на фотоизображениях. В результате находятся соответствующие точки на разных фотоизображениях, и решается P4P задача. Затем методами машинного зрения на фотографии находится блик и производится расчет направления на источник света с использованием закона Снелла. Класс рассматриваемых нами материалов несколько сужается, поскольку априори считается, что материал отражает большую часть энергии в направлении зеркального отражения, определяемого согласно закону Снелла.

Данные о положении источников и камер, получаемые вышеописанными способами, обладают приемлемой точностью для последующего восстановления материалов.

### 4. Предлагаемая модель освещения

В качестве модели освещения используется ДФО в специальном формате. По построению нашего процесса геометрия объекта является плоскостью, что упрощает процесс вычисления ДФО.

Пусть  $\vec{l}$  - вектор на источник света,  $\vec{v}$  - вектор на камеру,  $\vec{n}$  - нормаль к площадке. Тогда ДФО определяется формулой:

$$ДФО = \frac{L_0}{L_i \cdot \cos \phi_{in} \cdot dw}, \quad (1)$$

где  $L_0$  - количество энергии, которое отражается от поверхности материала в направлении  $\vec{v}$ ,  $L_i$  - количество энергии, которое приходит от источника в направлении  $\vec{l}$ ,  $\cos \phi_{in} = -(\vec{l} \cdot \vec{n})$  - косинус угла между нормалью  $\vec{n}$  и вектором на источник,  $dw$  - дифференциальный телесный угол, порожденный направлением  $\vec{l}$ .

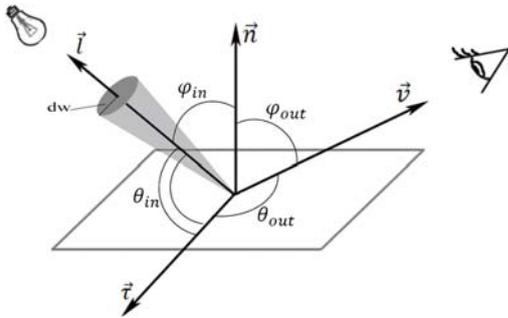


Рисунок 3: Определение ДФО

ДФО определяется двумя векторами  $\vec{l}$ ,  $\vec{v}$  и длиной волны падающего света. Зависимость от длины волны мы учитываем, рассматривая три значения ДФО для красной, зеленой и синей длин волн. Для получения значения ДФО для произвольной длины волны необходимо разложить цвет по трем составляющим  $R$ ,  $G$  и  $B$ . Тогда результирующая ДФО будет линейной комбинацией ДФО для  $R$ ,  $G$  и  $B$  с теми же коэффициентами.

Измерив ДФО для всевозможных пар направлений и длин волн, можно посчитать освещенность материала произвольной геометрии при произвольном освещении. Обобщенное освещение в данной точке объекта с учетом ДФО задается следующей формулой:

$$L_0(\vec{v}) = \int_{\Omega} ДФО(\vec{l}, \vec{v}) \cdot L_i(\vec{l}) \cdot \cos(\phi_{in}) dw, \quad (2)$$

где  $\Omega$  - полусфера всевозможных направлений вектора  $\vec{l}$ .

С вычислительной точки зрения сложность заключается в вычислении интеграла в формуле (2). Однако для точечных источников света интеграл можно заменить суммой и получим относительно простое выражение, которое можно быстро вычислить.

Перед тем, как описать предлагаемый формат хранения ДФО введем следующее определение среза ДФО. Срезом ДФО по направлению на источник называется ДФО с фиксированным направлением на источник света. Любой срез ДФО можно представить графически с помощью специальной поверхности. Поверхность строится так. Для произвольного

направления  $W_0$  длина вектора, соединяющего точку пересечения  $W_0$  с поверхностью и точку падения света, равна значению функции среза в направлении  $W_0$ .

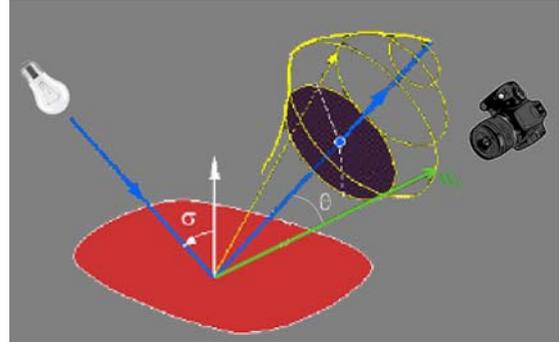


Рисунок 4. Поверхность ДФО

Основное предположение относительно восстанавливаемой функции - любой ее срез должен представлять фигуру вращения вокруг вектора зеркального отражения (Рис. 4).

Реконструкция модели состоит из следующих этапов:

- Получение облака точек ДФО из фотоизображений;
- Аппроксимация облака точек фигурой вращения при помощи алгоритма Левенберга-Марквардта.

Для восстановления фигуры вращения достаточно восстановить ее образующую кривую. В силу наших предположений о виде срезов ДФО, образующая является функцией одного угла  $\theta$  (Рис.4). Эта функция восстанавливается по облаку точек при помощи нелинейной аппроксимации следующей параметрической кривой:

$$f(A_1, A_2, h, x_0) = A_2 + \frac{A_1 - A_2}{1 + e^{\left(\frac{\theta - x_0}{h}\right)}}, \quad (3)$$

где  $A_1, A_2, h, x_0$  - параметры,  $\theta$  - угол между вектором на камеру и вектором зеркального отражения.

Пример восстановленной образующей представлен на Рис.5

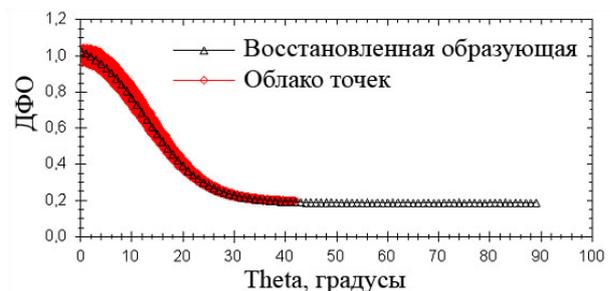


Рисунок 5. Пример восстановленной образующей

В результате строится набор образующих для нескольких фиксированных направлений на источник, данный набор и представляет формат для хранения ДФО.

## 5.Схема интерактивной визуализации

При визуализации материала с использованием графического акселератора набор восстановленных образующих передается на GPU в виде текстуры. Ее размер прямо пропорционален числу построенных срезов.

На практике число срезов совпадает с числом исходных фотографий. Обычно 5-6 срезов достаточно для корректного восстановления материала.

На графическом процессоре расчет освещения материала происходит следующим образом. Для каждой точки материала вычисляется направление на камеру и на источник света. По нормали к поверхности (поверхность может быть произвольной) и вектору на источник определяется угол падения света. По углу падения света находятся два ближайших среза ДФО, после чего происходит интерполяция между ними. Интерполяция производится при помощи сплайнов для согласования первых производных в местах стыков. Иначе, при обычной линейной интерполяции в местах стыков срезов наблюдались артефакты.

В результате, мы получаем срез для данного угла падения света. По определению среза, значение ДФО для данной пары векторов на камеру и на источник совпадут со значениями среза для данного угла падения. После вычисления ДФО производится стандартный расчет освещенности точки.

## 6. Анализ необходимых данных

Размер текстуры ДФО линейно зависит от количества использованных фотографий. Основная задача проведенного анализа - понять, сколько фотографий необходимо для полного восстановления модели материала.

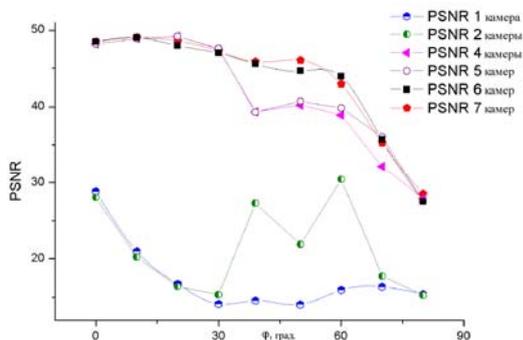


Рисунок 6. Анализ необходимых входных данных

Результаты анализа входных данных приведен на Рис.6: кривая «PSNR 1» соответствует ситуации восстановления модели материала всего по одной фотографии, «PSNR 2» по двум и т.д. Каждая точка графика соответствует одному сравнению фотографии реальной сцены с синтезированной фотографией восстановленного материала при помощи метрики PSNR. Угол  $\varphi$ , откладываемый по абсциссе, характеризует ориентацию образца относительно камеры и источника. Например, для случая восстановления по 5 камерам для угла  $\varphi = 0$  реальная, синтезированная фотографии и результат их сравнения при помощи PSNR будут выглядеть как на Рис.7. По результатам анализа было обнаружено, что пяти-шести фотографий вполне достаточно для приемлемого восстановления модели материала.

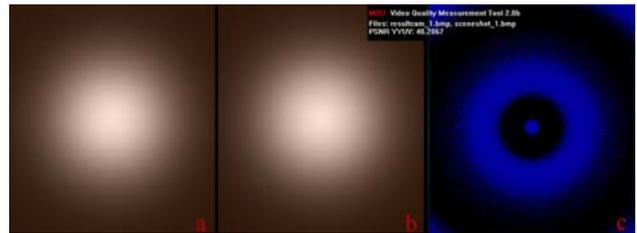


Рисунок 7. Пример реальной фотографии (a), синтезированной (b) и их сравнение при помощи PSNR (c).

## 7. Результаты

По результатам проведенных исследований был разработан формат представления ДФО, позволяющий восстанавливать модель материала по небольшому числу фотографий (5-6). Разработанные алгоритмы восстановления модели освещения позволяют реконструировать модель абсолютно автоматически. Проведенное сравнение при помощи метрики PSNR показало высокий уровень качества синтезируемых изображений (PSNR порядка 50). Также был разработан алгоритм интерактивной визуализации реконструированных моделей материалов. Проведенные тесты показали, результат приблизительно в 100 кадров в сек. на видеокарте Nvidia GeForce 6600, при визуализации объектов состоящих из 50K треугольников.

## 8. Литература

1. P.Sikachev, A.Ilyin, A.Ignatenko, *User-Assisted Acquisition, Processing and Rendering of Materials from Images*. Proc. of Graphicon'2007, pp. 131-134, Moscow, Russia, June 2007.
2. Chris Wynn. *An Introduction to BRDF-Based Lighting*, NVIDIA Corporation. <http://developer.nvidia.com/attach/6568>.
3. A. Ilyin, A. Lebedev, V. Sinyavsky, A. Ignatenko, *The System for the Acquisition, Processing and Material Rendering from Images* Proc. of Graphicon'2008, pp. 134-141, Moscow, Russia, June 2008.
4. Волобой А.Г., Галактионов В.А., Ершов С.В., Летунов А.А., Потемин И.С. Аппаратно-программный комплекс для измерения светорассеивающих свойств поверхностей "Информационные технологии и вычислительные системы", № 4, 2006.
5. H. Lensch, M. Gösele, Y. -Y. Chuang, T. Hawkins, S. Marschner, W. Matusik, *Realistic Materials in Computer Graphics*. SIGGRAPH 2005 Tutorials, 2005.
6. Кравцов А., Вежневцев В. *Решения PnP проблемы. Компьютерная графика и мультимедиа*. Выпуск №2(2)/2003 <http://www.cgm.computergraphics.ru/content/view/42>
7. Hertzmann A., Seitz S.M. *Example-Based Photometric Stereo: Shape Reconstruction with General, Varying BRDFs*. Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on Volume 27, Issue 8, pp.1254-1264, Aug. 2005.
8. G.J. Ward. *Measuring and modeling anisotropic reflection*. Computer Graphics, 26(2), pp. 265-272, July 1992.
9. Paul E. Debevec and Jitendra Malik. *Recovering High Dynamic Range Radiance Maps from Photographs*, Proceedings of SIGGRAPH 97, pp. 369-378.