

Физически обоснованная модель распространения света в ткани

А.Г. Волобой, В.А. Галактионов, Н.А. Лобалзо
Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша
Российской Академии Наук
Москва, Россия

Аннотация. В работе представлен новый подход к моделированию тканей на основании данных о том, что нити в тканях представляют собой рассеивающую среду. Предложен способ расчета функции внутреннего рассеяния (ФВР или BSSRDF) нитей путем моделирования рассеяния и поглощения света в их объеме с помощью метода Монте-Карло. Также предложен способ получения двунаправленной функции отражения (ДФО или BRDF) нитей из ФВР путем интегрирования ФВР по поверхности нити, представленной цилиндром. Разработанное решение дает хорошие визуальные результаты, а также демонстрирует качественное совпадение картин рассеяния света моделью и образцом реальной ткани. Данные о рассеянии света реальным образцом ткани получены путем измерений.

Ключевые слова: моделирование ткани, физически корректное моделирование, BRDF, поверхностное отражение, объемное рассеяние, измерение BRDF.

1. ВВЕДЕНИЕ

В литературе представлено большое количество разнообразных методов моделирования тканей, трикотажа, меха и других подобных изделий. Некоторые из них разрабатывались для моделирования физических деформаций этих материалов, другие ориентированы на достоверную передачу их характерных визуальных особенностей. Однако в основном данные методы не задаются целью создания физически обоснованных моделей оптических свойств текстильных материалов или их составляющих (например, нитей).

В данной статье описывается такой подход к моделированию взаимодействия ткани со светом, при котором картина рассеяния света моделью образца ткани соответствовала бы картине рассеяния света, полученной в результате измерений светорассеивающих свойств реального образца ткани на измерительной установке. Результаты разработки используются в системе моделирования распространения света и построения реалистичных изображений для задания свойств объектов в трехмерных сценах, определяющих, каким образом эти объекты взаимодействуют с падающим на них светом.

В соответствии с уравнениями Френеля для многих объектов реального мира, чей показатель преломления близок к показателю преломления воды, до 95% света (в случае нормального падения), попадающего на их поверхность, пройдет внутрь объекта (показатель преломления воды равен 1.33, усредненный показатель преломления для текстильных волокон равен 1.57). Часть преломленного света в результате множественного рассеяния внутри объема выйдет обратно на его поверхность. Пространственное распределение этого света в общем случае не будет изотропным.

Учитывая тот факт, что объемное рассеяние света может существенно влиять на отражательные свойства материалов, была разработана модель взаимодействия ткани со светом,

учитывающая рассеяние света внутри нитей. Поведение света внутри объема нити моделировалось с помощью метода Монте-Карло трассировки лучей.

2. БАЗОВЫЕ ИДЕИ

Ткань обладает набором оптических характеристик, которые и определяют ее взаимодействие с падающим светом. В основу модели легли следующие параметры:

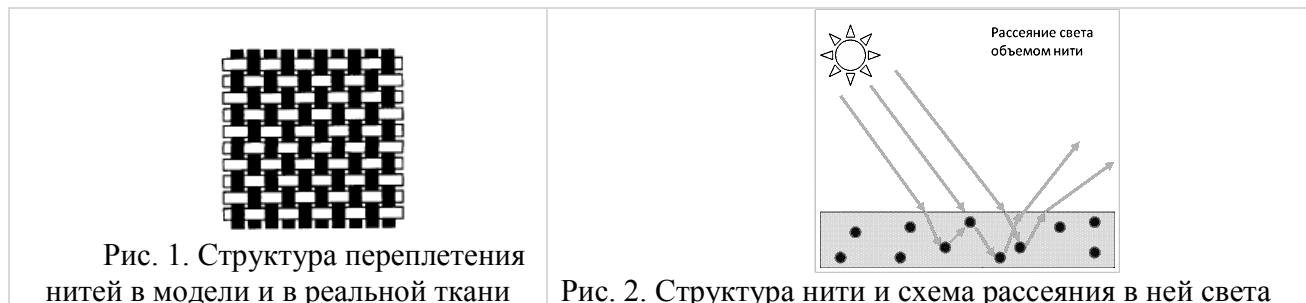
1. способ переплетения нитей в ткани;
2. структура нитей;
3. алгоритм расчета распространения света в нитях и механизм присвоения цвета точкам нитей при визуализации образца ткани.

В компьютерной графике при реализации физически обоснованных моделей объектов реального мира для моделирования распространения света в сцене часто используется метод Монте-Карло трассировки лучей. При генерации изображения сцены данные об освещенности используются для присвоения цвета точкам изображения. Такой же подход реализован и в представленной модели. С помощью метода Монте-Карло генерируется функция внутреннего рассеяния нити (ФВР или BSSRDF), из которой можно получить двунаправленную функцию отражения нити (ДФО или BRDF). Далее, рассчитанная ДФО используется для присвоения цвета точкам нити ткани при заданных в конкретной сцене условиях освещения.

3. ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

3.1 Модель ткани и нитей

Было реализовано переплетение нитей, аналогичное плетению реальной ткани, с которой проводилось сравнение. Это переплетение представлено на рис. 1.



Было сделано предположение, что объем нити является рассеивающей свет средой, что подтверждается исследованиями волокон, проведенными в ряде работ в области текстильного материаловедения. Это означает, что внутри нити показатель преломления среды не является постоянным. Была определена модель, в которой объем нити заполнен основной средой с показателем преломления равным усредненному показателю преломления хлопковых волокон ($n = 1.557$), и в основной среде распределены сферические частицы, обладающие показателем преломления, отличным от основного. Такая структура нити показана на рис. 2.

Для расчетов нить была представлена в виде цилиндра, основанием которого является круг. В модели образца ткани нити были представлены полигональными сетками.

3.2 Алгоритм расчета распространения света в нитях

При освещении участка нити параллельным светом часть этого света, в соответствии с уравнениями Френеля, попадает внутрь нити. Свет, попавший в нить, частично рассеивается, частично поглощается в ее объеме, и выходит на поверхность нити в разных направлениях.

Описанный процесс моделировался с помощью метода Монте-Карло трассировки лучей. Для небольшого участка нити испускались индивидуальные лучи в направлении ее объема с конечного набора входных направлений. Каждый луч обладал некоторой энергией, представленной в виде спектрограммы – распределения энергии по набору длин волн. В соответствии с параметрами рассеивающей среды, представляющей объем нити, каждый из лучей либо поглощался в среде, либо выходил на поверхность нити в результате рассеяния. Для каждого из вышедших лучей регистрировалась точка и направление его выхода. По окончании процесса моделирования была получена картина рассеяния света по объему нити для всех направлений падения света.

3.3 Расчет функции отражения света

В компьютерной графике при определении поверхности, которая обладает сложным поведением отраженного света, часто используют двунаправленную функцию отражения (ДФО). В соответствии с определением, для направления падения света dw_{in} и направления наблюдения dw_{out} ДФО для дифференциальной поверхности dA есть (рис. 3):

$$ДФО(dw_{in}, dw_{out}) = dL(dw_{out}) / dE(dw_{in})$$

Т.е. ДФО показывает отношение яркости этой поверхности в направлении dw_{out} к освещенности, приходящей на dA с направления dw_{in} .

Поскольку нить имеет также объемное рассеяние, то оно может быть определено с помощью функции внутреннего рассеяния (ФВР) следующим образом (рис. 3).

Пусть на дифференциальную поверхность dA падает свет с направления dw_{in} . Тогда:

$$ФВР(dw_{in}, dA, dw_{out}, dB) = dL_{out}(dw_{in}, dA, dw_{out}, dB) / dF_{in}(dw_{in}, dA)$$

Т.е. ФВР показывает отношение яркости поверхности dB в направлении dw_{out} к потоку, приходящему на dA с dw_{in} . Подразумевается, что яркость поверхности dB создана только потоком dF , приходящим на dA , и является результатом рассеяния света в нити.

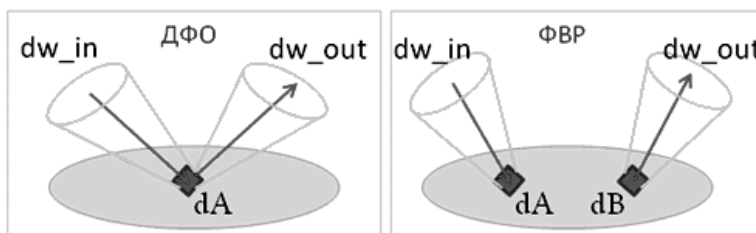


Рис. 3. Иллюстрации к определениям ДФО и ФВР

Если известна ФВР для дифференциальных поверхностей dA из некоторой окрестности dB , то можно вычислить ДФО для dB путем интегрирования ФВР по этой окрестности:

$$ДФО_{dB}(dw_{in}, dw_{out}) = \int ФВР(dw_{in}, dA, dw_{out}, dB) dA$$

Для вычисления ФВР распространение света внутри нити моделируется с помощью метода Монте-Карло трассировки лучей. Некоторое множество лучей испускается с поверхности dA в направлении объема нити. Далее моделируется распространение лучей света в среде с рассеиванием или возможным поглощением их на частицах. Когда лучи достигают поверхности нити, то точки и направления выхода лучей регистрируются на пространственной и угловой сетках.

После окончания моделирования распространения лучей в нити, можно вычислить ФВР для каждой ячейки dB и для всех телесных углов dw_{in}, dw_{out} следующим образом:

$$\Phi BP(dw_{in}, dA, dw_{out}, dB_i) = F_{out} / (dw_{out} * dB_i * \cos(\theta_{out}) * F_{in})$$

где F_{out} есть сумма энергий всех лучей, вышедших в направлении dw_{out} из i -ой ячейки dB_i , F_{in} – сумма всех энергий лучей, приходящих на dA с направления dw_{in} , θ_{out} – направление выхода лучей, определяемое dw_{out} .

Учитывая тот факт, что нить представляется цилиндром, который симметричен относительно своей оси, ФВР, рассчитанная для одной ячейки на пространственной сетке на поверхности нити, верна для всех ячеек сетки. Следовательно, верно следующее:

$$\Phi BP(dw_{in}, dA_1, dw_{out}, dB_1) = \Phi BP(dw_{in}, dA_2, dw_{out}, dB_2)$$

для dA_1, dA_2, dB_1 и dB_2 , получаемых либо поворотом нити, либо перемещением вдоль нити. Это соображение позволяет рассчитать ДФО нити следующим способом.

ДФО точки представляет собой интеграл ФВР по некоторой окрестности этой точки. Приближением интеграла ФВР по всей поверхности нити будет сумма по всем A_i :

$$ДФО(dw_{in}, dw_{out}) \cong \sum \Phi BP(dw_{in}, dA_i, dw_{out}, dB) * \cos(\theta_{in}) * f(\theta_{in})$$

где

θ_{in} – угол между направлением падения света и нормалью к dA_i

$\cos(\theta_{in})$ необходим для того, чтобы учесть изменение величины потока света, падающего на dA_i под углом θ_{in} с нормалью к ее поверхности.

$f(\theta_{in}) = 1$, в случае если $\cos(\theta_{in}) > 0$

$f(\theta_{in}) = 0$, в случае если $\cos(\theta_{in}) \leq 0$

$f(\theta_{in})$ контролирует, что расчет производится только для тех A_i , которые напрямую освещены светом от источника.

Полученная ДФО описывает ту часть света, которая отражается нитью после рассеяния света внутри объема нити.

Стоит отметить, что эта ДФО определена для всех возможных направлений падения света, а не только для тех, что принадлежат положительной полусфере (т.е. для тех направлений, которые составляют острый угол с нормалью к поверхности нити). Это объясняется тем, что при рассеянии света в нити, лучи могут выйти в любой точке на ее поверхности, в том числе и с обратной стороны. Таким образом, ФВР определена на всей поверхности нити, что позволяет вычислить ДФО для положительных и отрицательных направлений падения света относительно поверхности.

При визуализации ткани полученная ДФО используется для определения диффузной составляющей цвета точки нити, а зеркальная составляющая рассчитывалась по методу, предложенному Куком и Торрансом в соответствии с реализацией Блинна. В нашей модели зеркальная составляющая цвета точки определяется, исходя из расположения нормали образца ткани, а не нити.

4. МЕХАНИЗМ ВЕРИФИКАЦИИ МОДЕЛИ

Для целей верификации модели ткани были произведены измерения светорассеивающих свойств образца ткани из красного хлопка на измерительной установке, разработанной нашим коллективом.

Образец ткани освещался почти параллельным пучком монохроматического света. Измерения были проведены для длин волн падающего света в пределах 390 - 730 нм, с шагом в 10 нм. Энергия света, рассеиваемого образцом, регистрировалась для некоторого множества выходных направлений.

Далее для измеряемого образца рассчитывались показатели яркости, т.е. вычислялось отношение яркости образца по регистрируемому направлению отражения света к яркости идеально диффузного образца при тех же условиях освещения. Полученные данные из спектрального представления переводились в представление RGB и сохранялись в файле специального формата. Показатель яркости прямо пропорционален энергии света, отраженного образцом измеряемой ткани в заданном направлении, и обратно пропорционален косинусу угла отражения.

Для проведения сравнения картин рассеяния света моделью и реальной тканью необходимо было получить данные для модели, аналогичные измеренному показателю яркости реальной ткани. Для этого производились следующие вычисления:

1. Выбиралось некоторое сечение из множества измеренных данных (иными словами выбиралось определенное направление падения параллельного пучка света и множество направлений наблюдения).
2. В сцене с моделью ткани устанавливался источник параллельного белого света с направлением, равным выбранному на предыдущем шаге.
3. Для каждого из выбранных направлений наблюдений устанавливалась камера и производилась визуализация ткани.
4. Значения пикселей, принадлежащих ткани, суммировались.
5. Полученные суммы компонент RGB делились на косинус угла отражения. Полученные величины соответствовали яркости образца ткани в заданном направлении наблюдения. Физическая величина яркости прямо пропорциональна энергии, отраженной образцом в заданном направлении и обратно пропорциональна косинусу угла отражения. Таким образом, полученные величины можно было корректно сравнить с полученными для реальной ткани показателями яркости.

В итоге было возможно провести сравнение картин рассеяния света разработанной моделью и образцом реальной ткани.

5. ВЕРИФИКАЦИЯ МОДЕЛИ

Ниже представлены графики 1–3 рассеяния света моделью ткани (сплошная кривая) и реальным образцом (пунктирная кривая) в плоскости падения света при разных направлениях падения света (0° , 30° и 60° с нормалью). На всех графиках по оси абсцисс отложены направления отражения света. На графиках представлены значения для углов в пределах от -60

до 70 градусов. Отрицательные значения соответствуют направлениям, которые лежат по ту же сторону от нормали к поверхности, что и направления освещения; положительные – по ту же сторону, что и направления зеркального отражения. 0 на графиках соответствует направлению нормали. По оси ординат отложены показатели яркости. Можно видеть, что рассеяние света моделью и реальной тканью имеет качественное совпадение.

Для сравнения в графики 1–3 добавлена классическая модель расчета яркости точки (кривая, заданная точками), в которой диффузная составляющая устанавливается в соответствии с законом Ламберта, а зеркальная составляющая вычисляется по методу Кука и Торранса в соответствии с реализацией, предложенной Блинном. Зеркальная составляющая вычисляется относительно нормали к поверхности ткани.

Можно видеть, что реализованная модель улучшает соответствие картин рассеяния света по сравнению с классической моделью.

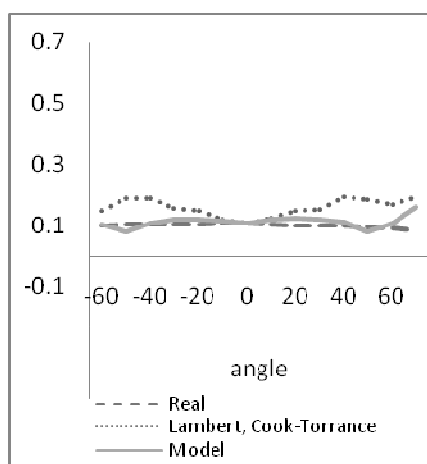


График 1. Угол падения 0°

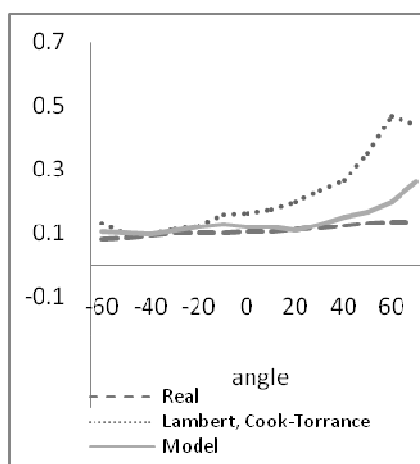


График 2. Угол падения 30°

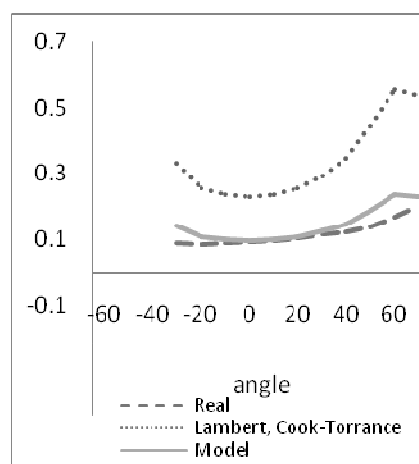


График 3. Угол падения 60°

Кроме качественного совпадения графиков рассеяния света удалось добиться определенного соответствия в части моделирования цвета ткани при разных условиях освещения. Цвет ткани меняется от более фиолетового при освещении дневным светом с внешней стороны к темно красному при освещении с внутренней. Аналогичные результаты были достигнуты и для нашей модели. Модель адекватно передает цветовой баланс реальной ткани.

5.1 Настройка модели

Основными параметрами настройки модели являются характеристики рассеивающей среды, представляющей собой нити. Эти характеристики включают в себя:

1. Показатель преломления основной среды, в которой распределены рассеивающие частицы
2. Показатель преломления рассеивающих частиц
3. Размер рассеивающих частиц
4. Концентрация частиц в объеме нити

Также важным является концентрация красителя в нитях. Она была указана исходя из данных, известных в текстильном материаловедении, а именно величина концентрации составляет порядка нескольких процентов от объема нити.

В зависимости от баланса выбранных значений параметров, модель демонстрирует разное поведение. Мы старались максимально опираться на данные о реальных рассеивающих средах,

которые представляют собой волокна. Например, показано, что волокна хлопка на 50% состоят из кристаллических образований размером порядка десятков нанометров. Также известно, что хлопковые нити состоят не только из целлюлозы, но содержат в себе до 12% воска, пектина и минеральных образований. Наконец, в волокнах и нитях могут присутствовать воздушные включения. Синтетические волокна могут специально наполняться частицами с высоким показателем преломления для удаления избыточного блеска.

Кривые, приведенные на графиках 1-3, были рассчитаны для среды со следующими характеристиками:

1. Показатель преломления основной среды – 1.557
2. Показатель преломления рассеивающих частиц – 1.61
3. Размер рассеивающих частиц – 150 нм
4. Концентрация частиц в объеме нити – 0.14

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании предположения о том, что нити в тканях представляют собой рассеивающую среду, был предложен новый подход к моделированию распространения света в тканях.

Был предложен и реализован способ получения ДФО (BRDF) нити из ФВР (BSSRDF) путем интегрирования ФВР по поверхности нити, представленной цилиндром. ФВР в свою очередь получена путем моделирования рассеяния и поглощения света в среде нити с помощью метода Монте-Карло трассировки лучей.

Разработанное решение дает адекватные визуальные результаты в части цвета ткани при различных условиях освещения, а также показывает качественное совпадение картин рассеяния света моделью и образцом реальной ткани.

Данная работа имеет не только интересный теоретический результат, но и применяется в задачах, для которых важен физически аккуратный расчет освещенности в сцене. Единоразово рассчитанная ФВР нити может быть использована для генерации ДФО тканей с разнообразными переплетениями. Полученные физически-обоснованные ДФО тканей используются для физически точных расчетов освещенности в трехмерных сценах, содержащих объекты, покрытые тканями. ДФО тканей могут быть использованы, например, для анализа освещенности интерьера салона самолета.

Модель была реализована на языке C++. Код интегрирован в программный комплекс, разработанный коллективом отдела компьютерной графики и вычислительной оптики Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН для моделирования сложных оптических явлений.

Список литературы

[1] Ying-Qing Xu, Yanyun Chen, Stephen Lin, Hua Zhong, Enhua Wu, Baining Guo, and Heung-Yeung Shum. Photorealistic Rendering of Knitwear Using the Lumislice., SIGGRAPH 2001, pp. 391-398.

[2] M. Sattler, R. Sarlette, R. Klein: Efficient and Realistic Visualization of Cloth. Proceedings of the Eurographics Symposium on Rendering, 2003.

[3] J.W. Illingworth. The optical properties of textile fibers. "Textile Recorder", August, 1942, pp. 29-32.

[4] А.Г. Волобой, Н.А. Лобалзо. Метод сравнения результатов оптического моделирования ткани с физически измеренными данными. Труды научно-технического семинара «Новые информационные технологии в автоматизированных системах», Москва, 2008, стр. 3-9.

[5] А.Г. Волобой, В.А. Галактионов, Н.А. Гнездилова, К.А. Дмитриев, С.В. Ершов. Об одном подходе к визуализации тканей. «Информационные технологии и вычислительные системы», № 3, 2007, стр. 71-78.