

На правах рукописи

Лобалзо Надежда Александровна

**Исследование и разработка методов
моделирования и визуализации оптически
сложных материалов на примере ткани**

Специальность 05.13.11 – математическое и программное обеспечение
вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей.

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва
2008 год

Работа выполнена в Институте прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН.

Научный руководитель – доктор физико-математических наук
Галактионов Владимир Александрович

Официальные оппоненты:

– доктор физико-математических наук,

Богуславский Андрей Александрович

– кандидат физико-математических наук

Игнатенко Алексей Викторович

Ведущая организация: Институт вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения РАН.

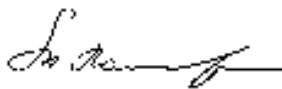
Защита состоится 2 декабря 2008 г. в 11:00 часов на заседании Диссертационного совета Д 002.024.01 в Институте прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН по адресу: 125047, Москва, Миусская пл., 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН.

Автореферат разослан 30 октября 2008 г.

Ученый секретарь
Диссертационного совета,

доктор физико-математических наук



Т.А. Полилова

Общая характеристика работы

Актуальность работы

Исследование и разработка методов физически аккуратного моделирования и визуализации оптически сложных материалов является одной из традиционных и активно развивающихся областей компьютерной графики. При физически аккуратном моделировании и визуализации учитываются физические законы, описывающие взаимодействие объектов со светом. Используемые при расчетах методы и подходы постоянно усложняются, круг физических явлений, которые принимаются во внимание, расширяется.

Центральной задачей физически аккуратной визуализации оптически сложных материалов является расчет оптических свойств этих материалов на основе законов физики и оптики. Оптические свойства материала определяют, каким образом материал взаимодействует с падающим на него светом. Использование оптических свойств, рассчитанных физически корректным образом, имеет важное значение для повышения реалистичности получаемых при визуализации изображений виртуальных сцен, а также для увеличения точности производимых компьютерных расчетов. Примерами этого могут служить:

1) Повышение реалистичности получаемых изображений виртуальных сцен при помощи расчета глобальной освещенности

Методы расчета глобальной освещенности позволяют повысить реалистичность изображений, получаемых при визуализации виртуальных сцен, за счет физически аккуратной оценки яркости света, падающего на поверхности объектов в виртуальной сцене. Методы расчета глобальной освещенности учитывают свет, не только приходящий напрямую от источников света, но также переотраженный от других объектов, присутствующих в сцене. То, каким образом свет отражается от поверхностей объектов, определяется их оптическими свойствами. Поэтому для увеличения точности при расчете глобальной освещенности важно, чтобы задание оптических свойств объектов, определяющих их взаимодействие со светом, было физически корректным.

2) Оценка освещенности проектируемых помещений, таких как классные комнаты, салоны автомобилей, самолетов

Компьютерное моделирование, выполняемое при разработке интерьеров, позволяет не только получать изображения проектируемых помещений, но также производить разнообразные расчеты, например, расчеты освещенности создаваемых интерьеров. Для многих помещений (например, для классных комнат) существуют стандарты и нормы, которым должна соответствовать их освещенность. Компьютерное моделирование может помочь удостовериться, что освещенность в

проектируемом помещении соответствует существующим требованиям. Поэтому, также как и для реалистичной визуализации, для проведения расчетов освещенности важно, чтобы спецификация оптических свойств объектов, определяющих их взаимодействие со светом, была физически корректной.

3) Разработка новых материалов с заданными свойствами

Прежде чем разработать физический прототип нового оптически сложного материала, например, автомобильной краски, эффективнее сначала создать его компьютерную модель. Оценив по тем или иным критериям компьютерный прототип нового материала, можно принимать решение о его производстве. Для увеличения реалистичности компьютерного прототипа его основные аспекты, в частности, оптические свойства, должны быть определены физически корректным образом.

Виртуальная сцена с точки зрения программного приложения компьютерной графики, как правило, состоит из следующих четырех главных компонент: 1) описания геометрии объектов, присутствующих в сцене; 2) описания источников света; 3) описания оптических свойств объектов и сред 4) описания параметров виртуальной камеры.

Оптические свойства объектов определяют, каким образом объект взаимодействует с попадающим на него светом. Например, объект может вести себя как идеальный диффузный отражатель, т.е. отражать весь попадающий на него свет в соответствии с законом Ламберта. Или объект может быть идеально зеркальным и отражать весь попадающий на него свет в соответствии с законом отражения и уравнениями Френеля. Однако, как правило, объекты реального мира обладают более сложными оптическими свойствами, чем приведенные выше примеры. Функции, описывающие угловое и спектральное распределение отраженного, преломленного и поглощенного света могут обладать достаточно сложной формой. Расчет оптических свойств объектов представляет собой самостоятельную задачу, для решения которой предложено значительное количество методов.

Ткани и другие текстильные материалы широко используются в повседневной жизни, и, соответственно, в программных приложениях компьютерной графики часто бывает необходимо задавать их оптические свойства. На Рис. 1 приведены несколько примеров использования тканей в виртуальных трехмерных сценах.

Текстильные материалы традиционно являются оптически сложными объектами. Их моделирование и расчет оптических свойств представляет собой трудную задачу. В данной работе предложены и реализованы методы и алгоритмы для расчета оптических свойств тканей на основе физически корректного моделирования структуры тканей и распространения света в тканях. Предложенные методы позволяют производить физически аккуратное моделирование и визуализацию тканей в трехмерных сценах.



Рис. 1 Ткани в виртуальных сценах

Существуют разные типы текстильных материалов, такие например, как ткань, трикотаж, ворсовая ткань. Идеино методы, предлагаемые в данной работе, могут быть применены к любому из приведенных типов текстильных изделий. Однако непосредственно работа производится на примере тканей – текстильных изделий, образованных на ткацком станке переплетением продольных и поперечных нитей.

Цель работы

Целью работы является исследование и разработка методов, алгоритмов и программных средств для расчета оптических свойств тканей на основе физически аккуратного моделирования распространения света, что позволит применить разработанные методы и программные средства для эффективного и физически аккуратного моделирования и визуализации тканей в трехмерных сценах.

Научная новизна работы

Предложен новый алгоритм расчета оптических свойств нитей с учетом их структурных и оптических особенностей, при котором принимается во внимание взаимодействие света не только с поверхностью нитей, но также с их объемом. Предложен новый алгоритм расчета оптических свойств тканей на основании оптических свойств нитей, их образующих. Предложена оригинальная методика валидации разработанного решения путем сравнения рассчитанных и измеренных оптических свойств ткани.

Практическая значимость работы

Физически аккуратный расчет оптических свойств тканей в соответствии с разработанным решением позволяет производить эффективное и физически аккуратное моделирование и визуализацию тканей в трехмерных сценах. Использование оптических свойств тканей, заданных физически корректным образом, позволяет не только увеличить реалистичность визуализируемых виртуальных сцен, содержащих ткани, но также может повысить точность расчетов, производимых при компьютерном моделировании, например, расчетов освещенности. Результаты работы были внедрены в индустриальный программный комплекс Inspirer2 компании Integra, который находит широкое применение в научных, учебных и промышленных предприятиях России и других стран. Кроме этого, работа может послужить основой комплекса приложений, направленных на создание компьютерных прототипов еще не существующих тканей с целью оценки тех или иных их особенностей для принятия решения об их дальнейшем производстве.

Апробация работы

Основные результаты диссертации были доложены на двух международных научных конференциях Графикон [1, 4], на научно-практическом семинаре МГИЭМ [3], а также на научном семинаре ИПМ им. М.В.Келдыша РАН под руководством М.Р.Шура-Бура и Д.А.Корягина.

Публикации

По результатам работы имеются четыре публикации, включая одну статью в рецензируемом научном журнале из списка ВАК [2] и три публикации в материалах научных конференций и семинаров [1, 3, 4].

Структура и содержание диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Диссертация изложена на 110 страницах текста, содержит 61 иллюстрацию и одну таблицу. Список литературы содержит 92 наименования.

Во введении обосновывается актуальность, практическая значимость и научная новизна диссертационной работы. Показано, как задача расчета оптических свойств сложных объектов, в частности тканей, поставленная в работе, соотносится с другими задачами компьютерной графики, какое место среди них занимает. Приведено уравнение рендеринга, которое должно быть решено для визуализации виртуальной сцены с помощью программного приложения компьютерной графики. Показано, что для решения уравнения рендеринга необходимо задать оптические свойства

объектов, присутствующих в сцене. Подчеркивается, что ткани являются сложными объектами с точки зрения расчета их оптических свойств.

Обсуждается важность задания физически аккуратных оптических свойств объектов. Показано, что для реалистичной визуализации сцен и проведения расчетов при компьютерном моделировании необходимо иметь возможность задавать оптические свойства объектов физически корректным способом.

В первой главе диссертации представлен обзор и классификация существующих в рассматриваемой области компьютерной графики решений и методов. Проведен анализ предлагаемых в литературе подходов на предмет их применимости к поставленной задаче в целом и/или возможности использования отдельных разработанных идей в собственном решении. Выделены ключевые особенности наиболее релевантных методов, их положительные и отрицательные стороны по отношению к решаемой задаче.

В процессе работы были изучены данные из области текстильного материаловедения, имеющие отношение к решаемой задаче, а именно данные о структурных и оптических особенностях текстильных волокон и нитей. Из литературы по текстильному материаловедению известно, что поверхность натуральных волокон и нитей шероховатая. Поверхность синтетических нитей, таких как нейлон и акрил, более гладкая, хотя также обладает определенной шероховатостью. Для многих текстильных волокон производились измерения и известны их усредненные показатели преломления. Показатели преломления текстильных волокон в среднем равны 1.5. В соответствии с уравнениями Френеля для усредненного показателя преломления текстильных волокон были рассчитаны коэффициенты отражения и пропускания. Было определено, что большая часть падающего на поверхность текстильной нити света преломляется и проникает внутрь ее объема. Меньшая часть – отражается от ее поверхности. Из этих рассуждений следует, что при расчете оптических свойств тканей для достижения более реалистичных результатов необходимо учитывать не только отражение света от поверхностей нитей, но также взаимодействие света с их объемом.

Известно, что среда текстильных волокон является оптически неоднородной. Например, показано, что хлопковые волокна состоят не только из целлюлозы, но содержат в себе до 12% воска, пектина и минеральных образований. Также в волокнах и нитях могут присутствовать воздушные включения. Синтетические нити могут специально наполняться частицами с высоким показателем преломления для удаления избыточного блеска. В объеме нити могут присутствовать частички пыли и загрязнения разного рода. Наличие оптических неоднородностей в среде нитей приводит к рассеянию в ней света.

Рассеяние света в оптически неоднородной среде определяется оптическими и структурными характеристиками среды, такими как показатель преломления объемлющей среды, показатель преломления, форма, размер и концентрация оптических неоднородностей. На основании этих данных с помощью теории Ми можно рассчитать фазовую функцию рассеивающих частиц, их сечения рассеяния и поглощения, которые предлагается использовать при Монте-Карло трассировке лучей в среде нити.

Итак, в первой главе на основании изученных материалов из области компьютерной графики и текстильного материаловедения было определено направление для собственного решения. Собственное решение для расчета оптических свойств тканей должно учитывать отражение света от поверхности нитей и рассеяние света в их объеме. Взаимодействие света с нитями должно моделироваться с помощью Монте-Карло трассировки лучей.

Во второй главе диссертации предложены способы расчета оптических свойств нитей с учетом их поверхностных и объемных характеристик. Предложен метод расчета функции объемного рассеяния, характеризующей рассеяние и поглощение света в конкретной нити. Предложен алгоритм расчета двунаправленной функции отражения нити на основании рассчитанной ранее функции объемного рассеяния.

В компьютерной графике для задания сложных оптических свойств объектов часто используют двунаправленную функцию отражения (ДФО или BRDF – Bi-directional Reflectance Distribution Function). ДФО – это в общем случае функция двух переменных, представляющая собой отношение яркости описываемого объекта в заданном направлении наблюдения w_{out} к его освещенности с направления w_{in} . ДФО может учитывать различные аспекты взаимодействия света и объекта. Например, ДФО может описывать только идеально зеркальное отражение света от поверхности объекта, пренебрегая всеми остальными типами взаимодействия, такими, например, как рассеяние света на микрорельефе поверхности или внутри объема объекта. Расширяя ДФО за счет компонент, учитывающих разные аспекты взаимодействия объекта и света, можно повышать реалистичность визуализируемых трехмерных сцен и увеличивать точность производимых при компьютерном моделировании расчетов.

В первой главе работы было показано, что вклад в оптические свойства ткани (т.е. в ДФО ткани) будет давать как отражение света от поверхностей нитей, так и рассеяние света их объемом. В связи с этим во второй главе работе предлагается разделить ДФО нити на две компоненты: поверхностную и объемную:

$$ДФО(w_{in}, w_{out}) = ДФО_{nos}(w_{in}, w_{out}) + ДФО_{os}(w_{in}, w_{out})$$

Поверхностную компоненту ДФО нити предлагается вычислять в соответствии с классическим методом расчета поверхностных оптических свойств объектов, предложенным Куком и Торрансом. Данный подход был выбран в силу следующих соображений:

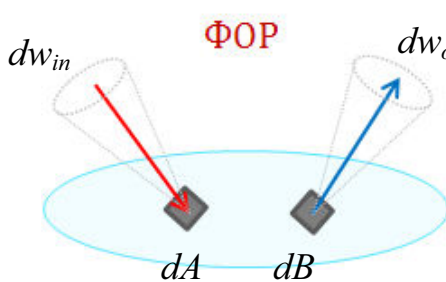
- 1) Подход реализует физически аккуратную модель взаимодействия света и шероховатой поверхности объекта
- 2) В подходе учитываются оптические характеристики моделируемого объекта, а именно его показатель преломления
- 3) Подход обладает небольшой вычислительной сложностью

Для определения объемной компоненты ДФО предлагается собственный метод. Для расчета объемной компоненты ДФО нити определяется 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 рассеивающие частицы, обладающие показателем преломления, отличным от основного. Геометрически нить представлялась в виде гладкого цилиндра (шероховатость поверхности не моделировалась явно, а учитывалась при расчете поверхностной компоненты ДФО, как было описано выше), основанием которого служил круг.

Для расчета объемной компоненты ДФО нити сначала предлагается рассчитать функцию объемного рассеяния (ФОР) нити. Далее предлагается вычислять объемную компоненту ДФО путем интегрирования ФОР по поверхности нити, представленной цилиндром. ФОР предлагается рассчитывать с помощью Монте-Карло трассировки лучей в объеме нити.

Дадим определение ФОР. Пусть на поверхность dA падает свет с направления dw_{in} . Тогда:

$$\Phi OP(dw_{in}, dA, dw_{out}, dB) = dL_{out}(dw_{in}, dA, dw_{out}, dB) / dF_{in}(dw_{in}, dA)$$



ФОР показывает отношение яркости света dL_{out} рассеянного поверхностью dB в телесный угол dw_{out} к потоку dF_{in} , приходящему на поверхность dA из dw_{in} . Подразумевается, что яркость поверхности dB создана только потоком dF_{in} за счет объемного рассеяния света в среде объекта. Определение ФОР проиллюстрировано на Рис. 2.

Рис. 2 Определение ФОР

Если для некоторой окрестности элемента поверхности dB задана ФОР, то тогда для dB можно вычислить ДФО путем интегрирования ФОР по этой окрестности:

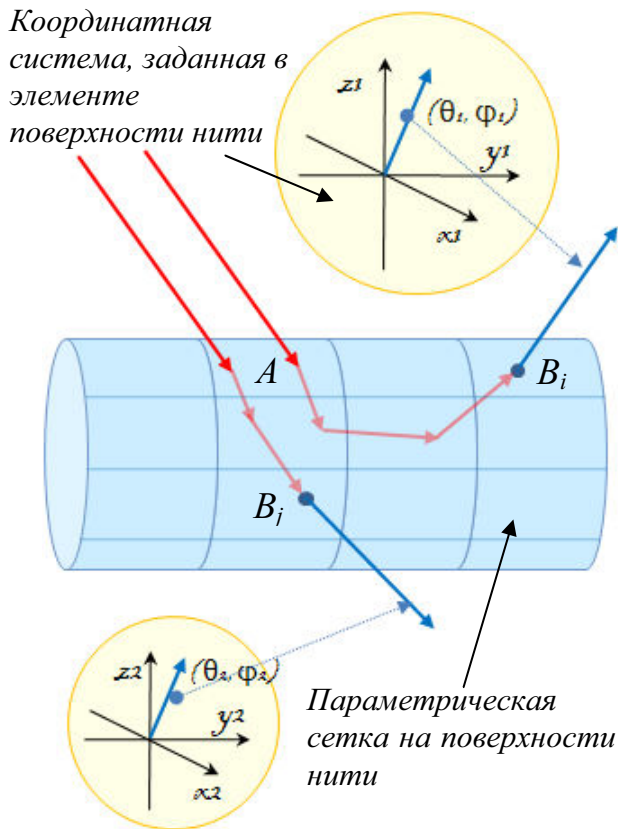


Рис. 3 Рассеяние света в нити

испускается множество фотонов. В соответствии с параметрами рассеивающей среды, представляющей объем нити, каждый из фотонов либо поглощается, либо выходит на поверхность нити в результате множественного рассеяния. Для каждого из вышедших фотонов точка и направления его выхода регистрируются. Процесс проиллюстрирован на Рис. 3. На поверхности нити задана пространственная параметрическая сетка (u, v) для удобства регистрации положений фотонов, выходящих из нити. Для каждого элемента пространственной сетки, определяемого координатами (u_i, v_i) , заданы координатные системы и связанные с ними угловые сетки, которые используются для регистрации направлений выхода фотонов. На иллюстрации ниже элементам (u_i, v_i) поставлены в соответствие дополнительные обозначения A и $B_{i,j}$.

На Рис. 4 приведена последовательность основных шагов алгоритма трассировки лучей в объеме нити. Блок-схема алгоритма была создана с помощью языка моделирования Unified Modeling Language (UML 2.0).

Трассировка состоит из следующих основных этапов:

1) Расчет длины свободного пробега

- а. Расчет длины свободного пробега производится в соответствии со следующим выражением:

$$Pr(l) = e^{-l\sigma_{ext}N}$$

где $Pr(l)$ – вероятность того, что фотон не будет поглощен или рассеян в среде при прохождении расстояния l .

$$DFO_{dB}(dw_{in}, dw_{out}) = \int \Phi OP(dw_{in}, dA, dw_{out}, dB)dA$$

Покажем, каким образом на основе приведенных теоретических выкладок предлагается рассчитывать ФОР и ДФО нитей.

Для расчета ФОР предлагается проводить Монте-Карло трассировку лучей в объеме нити следующим образом. На блок-схеме алгоритма и в описании алгоритма вместо термина «луч» используется синонимичный ему с точки зрения компьютерной графики термин «фотон».

Для небольшого участка поверхности нити в направлении объема нити с полусферы входных направлений падения света

2) Поиск пересечения с границей нити, определение расстояния до границы

а. В работе предлагается использовать неявное представление поверхности нити. Для того чтобы найти пересечение поверхности нити с траекторией фотона, было предложено и реализовано аналитическое решение соответствующей геометрической задачи.

3) Выбор события поглощения/рассеяния

а. Событие поглощения или рассеяния выбирается случайным образом в соответствии со следующими вероятностями:

$$Pr_{sc} = \sigma_{sc} / \sigma_{ext}, Pr_{abs} = 1 - Pr_{sc}$$

где Pr_{sc} и Pr_{abs} – вероятности событий рассеяния и поглощения соответственно. Если было выбрано событие поглощения, фотон прекращает свое распространение в объеме нити. Обработка события рассеяния описана в пункте 4.

4) Рассеяние

а. При выборе события рассеяния определяется и задается новое направление распространения фотона в соответствии с фазовой функцией рассеивающих частиц.

5) Регистрация положения и направления выхода фотона из нити

а. Положение и направление выхода фотона, а также его энергия регистрируются на пространственной сетке (u, v) и угловой сетке $(\theta_{out}, \varphi_{out})$, ассоциированной с элементом (u_i, v_i) .



Рис. 4 Алгоритм Монте-Карло трассировки лучей в объеме нити

По окончании моделирования распространения света в объеме нити предлагается вычислять ФОР нити следующим образом:

$$\Phi OP(w_{in}, A, w_{out}, B_i) = F_{out} / w_{out} * B_i * \cos(\theta_{out}) * F_{in}$$

где F_{out} – это сумма энергий всех лучей, вышедших в направлении w_{out} из элемента B_i , F_{in} – сумма энергий всех лучей, приходящих на A с направления w_{in} , θ_{out} – направление, определяемое w_{out} . Необходимо отметить важное свойство вычисленной ФОР нити, которое позволяет рассчитать ДФО предложенным в работе способом. Поскольку нить является круговым цилиндром, ФОР не меняется при трансляциях вдоль оси цилиндра и при вращениях вокруг этой оси. Т.е. для A_1, A_2, B_1 и B_2 определенных аналогично продемонстрированному на Рис. 5 верно:

$$\Phi OP(w_{in}, A_1, w_{out}, B_1) = \Phi OP(w_{in}, A_2, w_{out}, B_2)$$

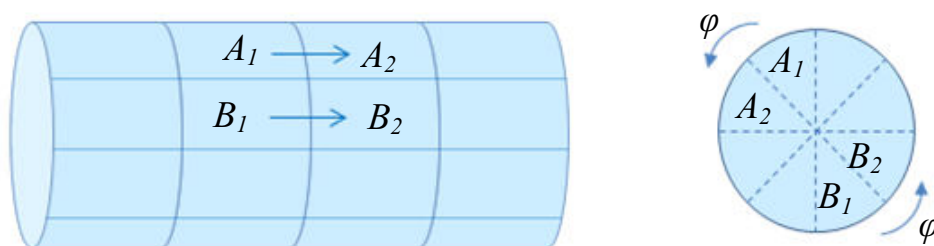


Рис. 5 Если освещаемый элемент «сдвигается» вдоль нити и/или «поворачивается» вокруг ее центра, то вся ФОР также «сдвигается» и/или «поворачивается»

Для приближения интеграла ФОР по поверхности нити в разработанном решении предлагается использовать следующую сумму:

$$ДФО_{об}(w_{in}, w_{out}) \cong \sum_{A_i} \Phi OP(w_{in}, A_i, w_{out}, B) * A_i * \cos(\theta_{ini}) * f(\theta_{ini})$$

где:

- θ_{ini} – угол между направлением падения света и нормалью к A_i
- $\cos(\theta_{ini})$ необходим для того, чтобы учесть изменение величины потока света, падающего на A_i под углом θ_{ini}
- $f(\theta_{ini}) = 1$, в случае если $\cos(\theta_{ini}) > 0$
 $f(\theta_{ini}) = 0$, в случае если $\cos(\theta_{ini}) \leq 0$
 $f(\theta_{ini})$ контролирует, что расчет производится только для тех A_i , которые напрямую освещены светом от источника.

На Рис. 6 приведена блок-схема предлагаемого алгоритма для вычисления ДФО.

Основные временные затраты в разработанном решении связаны с моделированием распространения света внутри объема нити с помощью Монте-Карло трассировки лучей. В зависимости от характеристик рассеивающей среды трассировка может занимать от нескольких десятков минут до нескольких часов.

Кроме этого во второй главе диссертации описан разработанный способ создания трехмерного геометрического представления образца ткани. Выделены требования компактности и удобства использования разработанного представления. Показано, каким образом предложенное представление соответствует указанным требованиям. Приведено описание некоторых аспектов программной реализации решения.

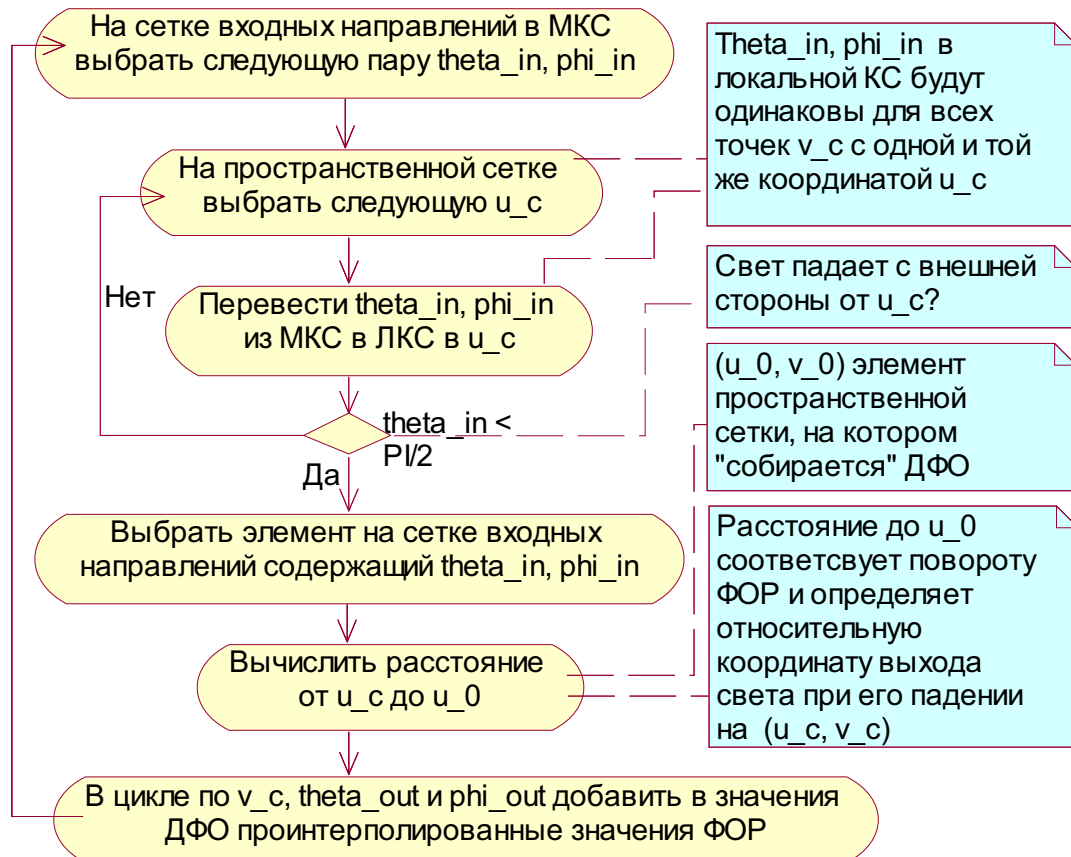


Рис. 6 Алгоритм вычисления ДФО по ФОР

Переплетение нитей в ткани задается через матричное представление, где в узлах матрицы находятся контрольные точки, определяющие траекторию нитей. Компактность представления поддерживается за счет использования небольшого количества контрольных точек для задания основного переплетения нитей. Для того чтобы получить необходимую гладкость нитей при триангуляции модели образца ткани, производится интерполяция контрольных точек переплетения с помощью кубического сплайна. При помощи соответствующего параметра контролируется количество промежуточных точек, в которых вычисляется значение функции-интерполянта, и которые становятся дополнительными опорными точками траектории нити. Для построения полигонального представления образца ткани в работе предложен и реализован алгоритм триангуляции нитей. Алгоритм создает геометрическое представление

нитей в виде сетки треугольников (массивов вершин, индексов вершин и нормалей к вершинам).

В третьей главе диссертации предложена методика сравнения рассчитанных оптических свойств ткани с измеренными с помощью специальной измерительной установки оптическими свойствами реальной ткани. Приведено описание процесса измерений и детальное описание методики сравнения.

Для валидации решения были измерены оптические свойства красной 100% хлопковой ткани. Измерения производились по следующей схеме. Образец ткани освещался почти параллельным пучком монохроматического света. Измерения были проведены для длин волн падающего света в пределах 390 - 710 нм с шагом в 10 нм. Энергия света, отраженного образцом, регистрировалась для некоторого множества выходных направлений. Далее для всего регистрируемого множества выходных направлений рассчитывались коэффициенты яркости измеряемого образца. Полученные данные из спектрального представления переводились в представление RGB и сохранялись в файле специального формата.

Для проведения сравнения картин рассеяния света моделью и реальной тканью необходимо было получить данные для модели, аналогичные измеренному коэффициенту яркости реальной ткани. Для этого, прежде всего, было необходимо создать трехмерную модель образца ткани, с помощью предложенных алгоритмов и методов задания переплетения ткани и триангуляции нитей. Далее, для нитей в модели необходимо было задать оптические свойства, рассчитанные с помощью методов, предложенных в Главе 2. Для созданной трехмерной модели образца ткани рассчитывались значения, соответствующие коэффициенту яркости, при разных условиях освещения и наблюдения. В итоге было возможно провести сравнение картин рассеяния света моделью и образцом реальной ткани.

В работе приведены результаты сравнения рассчитанных и измеренных оптических свойств ткани в соответствии с предложенной методикой. Показано, что оптические свойства, рассчитанные с помощью предложенного решения, соответствуют измеренным оптическим свойствам реального образца ткани. Также продемонстрировано цветовое соответствие рассчитанных и измеренных данных.

На Рис. 7 представлены графики рассеяния света моделью (сплошная красная кривая) и реальной тканью (пунктирная синяя кривая). 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 соответствует направлению нормали. По оси ординат отложены значения коэффициентов яркости разделенные на π .

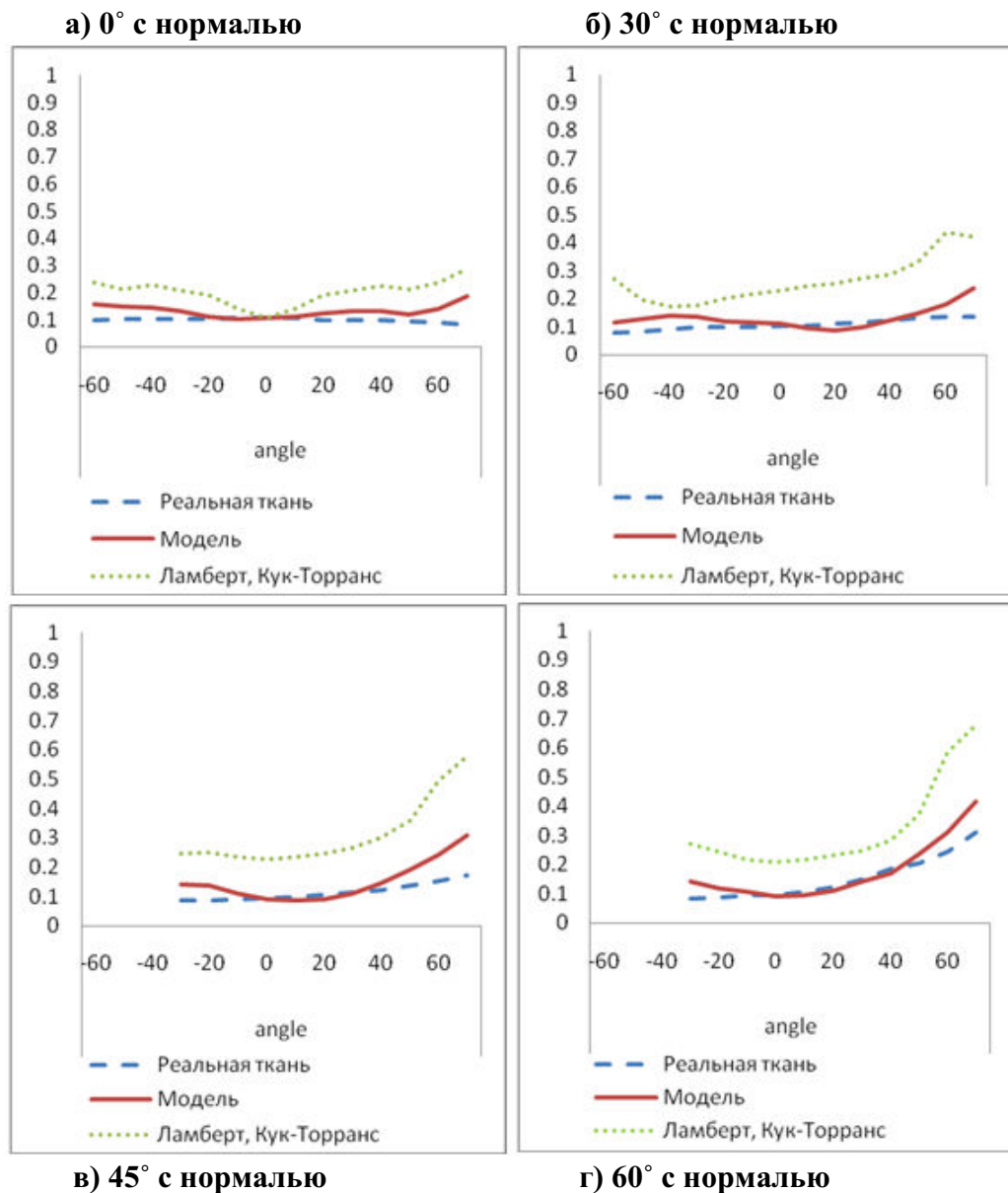


Рис. 7 Рассеяние света классической моделью, разработанной моделью и реальной тканью при разных направлениях падения света

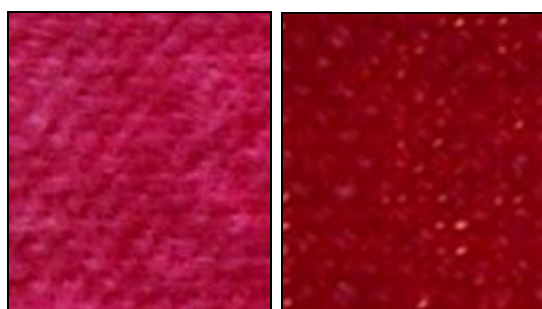
Для сравнения на этих же графиках приведены аналогичные кривые, полученные при задании оптических свойств нитей следующим классическим образом (пунктирная зеленая кривая):

- Объемная компонента устанавливается в соответствии с законом Ламберта
- Поверхностная компонента вычисляется тем же способом, что и в предлагаемом решении (т.е. в соответствии с методом Кука и Торранса)

На графиках продемонстрировано, что рассеяние света моделью и реальной тканью имеет качественное соответствие. Кроме этого,

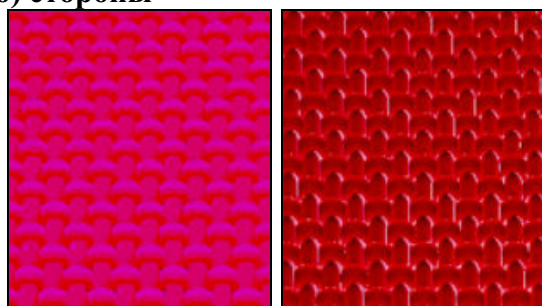
предложенное решение улучшает соответствие картин рассеяния по сравнению с классической моделью.

Кроме качественного совпадения графиков рассеяния света удалось добиться определенного соответствия в части моделирования цвета ткани при разных условиях освещения. В работе приведены фотографии красной хлопковой ткани, освещенной дневным светом с внешней и внутренней сторон (Рис. 8). Можно видеть, что цвет ткани меняется от более фиолетового к темно-красному. Аналогичные результаты были достигнуты и для модели ткани. На Рис. 9 приведено изображение модели ткани, освещенной с внешней и внутренней сторон.



а) б)

Рис. 8 Фотография реальной ткани, освещенной с внешней (а) и внутренней (б) стороны



а) б)

Рис. 9 Изображение модели ткани, освещенной с внешней (а) и внутренней (б) стороны

Можно видеть, что цвет модели ткани, также как и цвет реальной ткани, меняется от более фиолетового к темно-красному в зависимости от освещения.

В дополнение к визуальному сравнению цвета ткани, освещенной с разных сторон, было проведено численное сравнение красных, синих и зеленых компонент в цвете реальной ткани и модели. Были вычислены отношения BLUE/RED и GREEN/RED для реального образца и модели при нормальном освещении. Эти данные приведены в Таблице 1. Таблица 1 демонстрирует, что модель адекватно передает цветовой баланс реальной ткани.

	BLUE/RED	GREEN/RED
Реальная ткань	0.08	0.011
Модель ¹	Порядка 0.05 - 0.25	Порядка 0.001 - 0.017

Таблица 1 Соотношение красной, зеленой и синей компонент для реальной ткани и модели

¹ В зависимости от параметров среды рассеяния нити

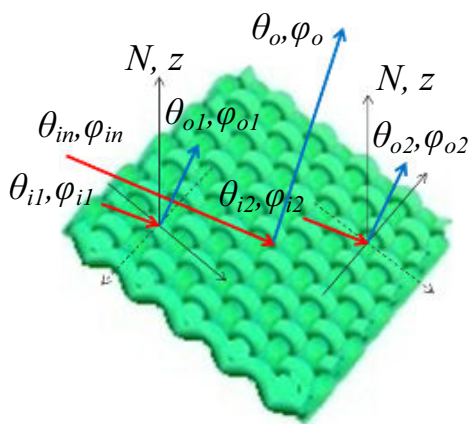
В четвертой главе приведены предложенные в работе алгоритмы расчета двунаправленной функции отражения (ДФО) ткани на основании рассчитанных ранее двунаправленных функций отражения нитей. Продемонстрированы результаты применения рассчитанной ДФО к объекту «ткань» в трехмерной виртуальной сцене.

В работе предлагается два алгоритма для расчета ДФО ткани. Первый из них – это суммирование ДФО нитей, второй – использование метода Монте-Карло трассировки лучей.

Основная идея алгоритма суммирования ДФО нитей заключается в том, что ДФО ткани представляет собой усредненное значение ДФО образующих ее нитей. Например, для ткани, состоящей из одного типа нитей, ДФО можно аппроксимировать следующим образом:

$$ДФО_{ткани}(w_{in}, w_{out}) = 1/2 \sum_i ДФО_{нитиi}(w_{in}, w_{out})$$

где параметр i меняется от 0 до 1 для того, чтобы учесть, что одна и та же нить в ткани может быть расположена параллельно и перпендикулярно некоторому заданному направлению. Это означает, что направления



падения и рассеяния света, заданные в координатной системе связанной с поверхностью ткани, будут иметь другие координаты в координатных системах, связанных с поверхностями нитей. См. Рис. 10. (θ_i, φ_i) и (θ_o, φ_o) заданы в координатной системе, связанной с поверхностью ткани, $(\theta_{i-2}, \varphi_{i-2})$ и $(\theta_{o1-2}, \varphi_{o1-2})$ - в КС, связанных с поверхностями нитей в ткани).

Рис. 10 Координатные системы

В работе реализован описанный способ вычисления ДФО тканей на основании ДФО нитей. На Рис. 11 приведен пример применения

ДФО к обивке автомобильного кресла. На рисунке слева (рис. 11-1) к обивке автомобильного кресла применена измеренная ДФО, на рисунке справа (рис. 11-2) – рассчитанная. Рисунки 11-1А и 11-2А – это увеличенные фрагменты рисунков 11-1 и 11-2. На рисунках продемонстрировано, что разработанное решение позволяет передать как тени на ткани, так и цвет ткани.

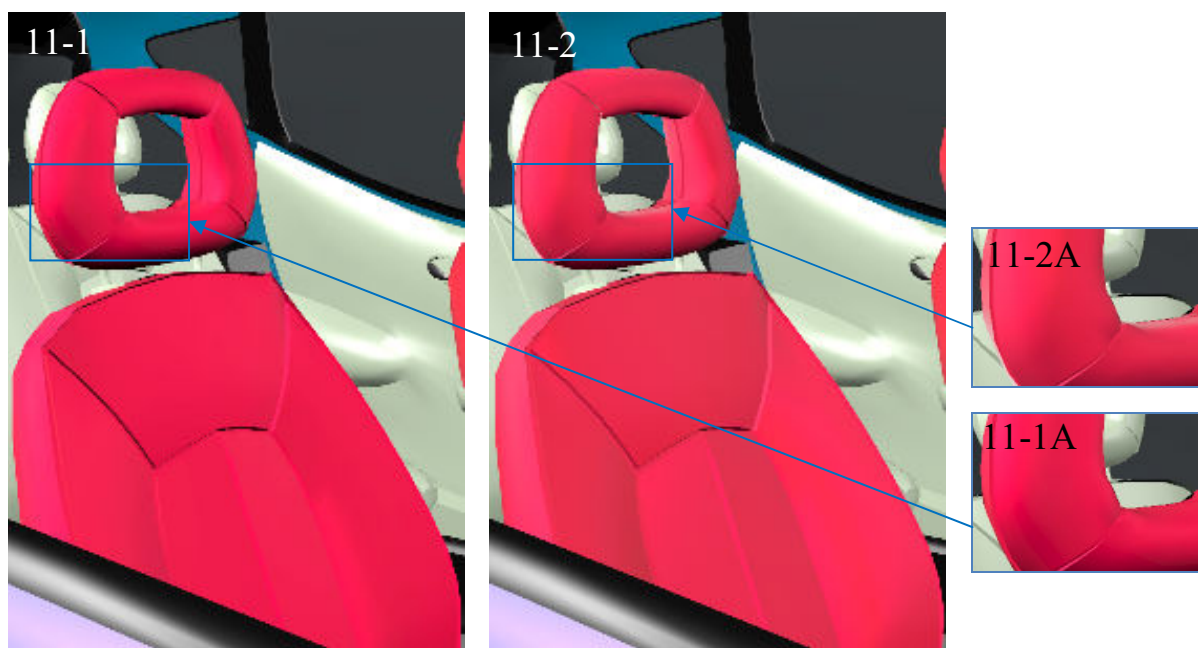


Рис. 11 На рисунке слева (рис. 11-1) к обивке автомобильного кресла применена измеренная ДФО, на рисунке справа (рис. 11-2) – рассчитанная. Рисунки 11-1А и 11-2А – увеличенные фрагменты рисунков 11-1 и 11-2. Разработанное решение позволяет передать как тени на ткани, так и цвет ткани

В заключении представлены основные результаты работы. Основные результаты работы состоят в следующем:

- 1) Разработан и программно реализован метод расчета оптических свойств тканей с учетом их оптических и структурных характеристик, включающий:
 - а. алгоритм расчета оптических свойств нити путем моделирования отражения света от поверхности нити и распространения света внутри ее объема;
 - б. метод расчета оптических свойств ткани на основании рассчитанных ранее оптических свойств нитей.
- 2) Предложена методика валидации разработанного решения путем сравнения рассчитанных оптических свойств моделируемой ткани с физически измеренными оптическими свойствами реальной ткани. Показано, что оптические свойства, рассчитанные с помощью предложенного решения, соответствуют измеренным оптическим свойствам реального образца ткани. Продемонстрировано цветовое соответствие рассчитанных и измеренных данных.
- 3) На основе разработанного метода реализована программная компонента, используемая в индустриальном программном комплексе реалистичной визуализации и оптического моделирования Inspirer2.

Публикации по теме диссертации

1. Б.Х. Барладян, В.А. Галактионов, Н.А. Гнездилова, К.А. Дмитриев, С.В. Ершов. Моделирование освещенности в тканях с четкой фактурой нити. // Труды 16-ой международной конференции по компьютерной графике и ее приложениям Графикон 2006, Новосибирск, 2006, с. 104-111.
2. 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.
3. А.Г. Волобой, Н.А. Лобалзо. Метод сравнения результатов оптического моделирования ткани с физически измеренными данными. // Материалы 11-го научно-практического семинара "Новые информационные технологии в автоматизированных системах", М.:МГИЭМ, 2008, с. 3-9.
4. Nadezhda Lobalzo, Alexey Voloboy. Physically Based Lighting Model for Cloth and its Validation // Труды 18-ой международной конференции по компьютерной графике и ее приложениям Графикон 2008, Москва, 2008.

Подписано в печать 14.10.2008. Формат 60x84/16. Усл. печ. л. 1,0. Тираж 100 экз.
Заказ № 344.
Компания "МК-Сервис", 111024, Москва, ш.Энтузиастов, д.5