

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ имени М.В. Келдыша

Б.Х. Барладян, А.Г. Волобой, В.А. Галактионов, Н.А. Гнездилова,
К.А. Дмитриев, С.В. Ершов, Э.А. Копылов

**Моделирование освещенности в тканях
с четкой фактурой нити**

Москва
2005

Б.Х. Барладян, А.Г. Волобой, В.А. Галактионов, Н.А. Гнездилова,
К.А. Дмитриев, С.В. Ершов, Э.А. Копылов

Моделирование освещенности в тканях с четкой фактурой нити

Аннотация

В статье описывается разработанный эффективный алгоритм для моделирования освещенности в тканях с четко выраженной структурой. Так как алгоритм требует большого числа предварительных расчетов, то особое внимание уделяется вопросам параметризации нити и хранения рассчитанных данных. Алгоритм учитывает такие важные аспекты освещенности в тканях, как переотражение света между волокнами и различными нитями. Реализованный алгоритм позволяет смоделировать ткань за приемлемое время расчета (несколько минут) и имеет низкие требования к необходимому объему памяти.

B.H. Barladyan, A.G. Voloboy, V.A. Galaktionov, N.A. Gnezdilova,
K.A. Dmitriev, S.V. Ershov, E.A. Kopylov

Simulation of Illumination of Cloth with Distinct Yarn Structure

Abstract

This paper presents the new and effective algorithm for simulation of illumination of cloth with distinct yarn structure. The algorithm requires a large number of preprocessing efforts, therefore a lot of attention is paid to the questions of yarn parametrization and storage of the precomputed data. The algorithm takes into account such important aspects of cloth illumination as light interreflections in yarns and fibers. The proposed algorithm supports simulation of cloth within the accepted time frame (tens of minutes) and has low memory requirements.

Работа была частично поддержана РФФИ, грант 04-01-00520, а также компанией INTEGRA Inc. (Япония).

Версия статьи с цветными иллюстрациями размещена по адресу http://www.keldysh.ru/pages/cgraph/publications/cgd_publ.htm.

Содержание

1. Введение.....	4
1.1. Моделирование оптических свойств ткани	4
1.2. Моделирование деформации ткани	8
2. Подход к моделированию ткани с явной структурой	10
3. Задание нити	11
3.1. Триангуляция нити.	11
3.2. Параметризация нити	13
3.3. Локальная система координат	14
4. Вычисление функции светового рассеивания нити	15
4.1. Вычисление прямой компоненты освещения нити.....	16
4.2. Вычисление не прямой компоненты освещенности нити.....	18
5. Результаты	21
Список литературы.	23

1. Введение

Ткани – это объекты реального мира, оптическое моделирование и визуализация которых являются особенно сложными. Сложность задачи характеризуется огромным числом элементов ткани (нитей, ворсинок и др.), а также структурой ткани. Физические и структурные параметры ткани подразделяются на *детерминистические* (тип сплетения ткани, цвет нитей, количество волокон в нити, форма поперечного сечения волокна, оптические свойства волокон и др.) и *стохастические* (такие как распределение волокон вдоль нитей, уровень шероховатости поверхности волокна). Ранее нами предпринималась попытка разработать систему проектирования ткани с правдоподобным результирующим изображением ее на графическом мониторе [1]. Разработка оказалась успешной для определенного вида ткани.

Задача визуализации тканей является одной из традиционных задач в компьютерной графике. Она стала особенно актуальной в настоящее время, с развитием киноиндустрии, где компьютер все чаще используется для создания кино- и мультфильмов. Сцены, герои фильма и их одежда моделируются на компьютере, что в частности требует реалистичной визуализации тканей. Не менее важными областями применения данной задачи являются моделирование и визуализация синтетических и натуральных тканей при дизайне интерьеров, в индустрии моды, при создании компьютерных игр.

Задачу визуализации тканей можно условно разделить на две подзадачи:

- моделирование оптических свойств ткани,
- моделирование корректной деформации формы ткани.

1.1. Моделирование оптических свойств ткани

С точки зрения задачи моделирования внешнего вида ткани будем условно подразделять множество всех тканей на следующие категории:

1. *Ткани с неявной структурой.* Это могут быть натуральные и синтетические ткани, такие, например, как шелк и капрон. В этом случае структура ткани практически неразличима.
2. *Ткани с явно выраженной структурой (фактурой).* Это вязаные ткани и текстиль. Основной характеристикой этого типа ткани является четко различимая структура, где хорошо просматриваются непосредственно нити, образующие рисунок ткани.
3. *Мех и ткани с густым ворсом.* У этого типа основа ткани и ее плетение не видны. Для таких тканей внешний вид задается ворсинками, покрывающими основу.

Для реалистичной визуализации указанных типов тканей разработаны различные методы, моделирующие те или иные характерные для каждого из типов оптические свойства и явления.

Ткани с неявной структурой. Ткани с неявной структурой могут быть представлены с помощью двунаправленной функции отражения (ДФО или BRDF в английской мнемонике) [2]. ДФО, заданная в каждой точке поверхности, определяет какая часть энергии, принятая с направления w_{in} будет рассеяна поверхностью в направлении w_{out} . Таким образом, в общем случае, ДФО в каждой точке является функцией двух направлений (w_{in} , w_{out}). В силу однородности структуры ткани этого типа для ее визуализации достаточно задать единственную функцию ДФО, поставив ее в соответствие всем точкам ткани.

Данный подход был реализован в работе [1], где проводилась реалистичная визуализация искусственного шелка. Для нахождения ДФО использовалась явная модель ткани, которая подразумевает следующие особенности, проиллюстрированные на рис. 1:

- нити в ткани пересекаются под прямым углом,
- нить, состоит из волокон, которые могут быть закручены вокруг оси нити или же быть ей параллельными.

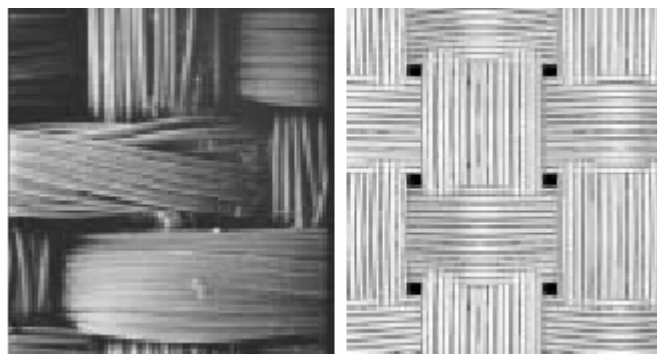


Рис. 1. Ткань с неявной структурой. Изображение слева получено с помощью электронного микроскопа, изображение справа представляет собой созданную модель для последующего моделирования.

Геометрически каждое волокно моделировалось с помощью бесконечного цилиндра, ограниченного двумя плоскостями. Далее проводилось вычисление ДФО трассировкой лучей методом Монте-Карло с накоплением результата на виртуальном спектрометре. После этого полученная ДФО использовалась для визуализации ткани. Результаты визуализации ткани с неявной структурой, полученные в работе [1], проиллюстрированы на рис. 2.



Рис. 2. Пример визуализации ткани с неявной структурой.

На Рис. можно видеть, что ткань обладает определенной нерегулярностью структуры. В работе [3], которая продолжает работу [1], были реализованы алгоритмы, учитывающие эту нерегулярность. Явная модель ткани расширяется за счет добавления стохастических характеристик ткани, таких как распределение направлений и положений волокон вдоль оси нити.

Ткани с четкой фактурой нити. В тканях с явной структурой нити хорошо различимы и организованы в определенном порядке, создавая рисунок ткани. По этой причине использование одной ДФО для визуализации всей ткани здесь неприемлемо.

Для визуализации ткани такого типа необходимо провести моделирование формы плетения ткани (что может быть сделано с помощью контрольных точек), а также моделирование микроструктуры нити. В зависимости от выбранного алгоритма может производиться предварительная обработка модели, во время которой происходит моделирование оптических эффектов и вычисление освещенности части нити или части ткани.

В большинстве работ предполагается, что ткань имеет периодическую структуру [4, 5]. Определяется минимальный повторяющийся элемент, для которого производится моделирование оптических эффектов. Визуализации целой ткани производится с помощью дублирования этого элемента.

Таким элементом может служить небольшой кусок ткани, содержащий в себе повторяющийся рисунок. Или же, возможно, что минимальным элементом будет часть нити (поперечное сечение), как это сделано в работе [5]. Тогда для того, чтобы получить полное изображение ткани, необходимо этот элемент повторить множество раз вдоль пути нити.

В зависимости от того, является ли элемент частью ткани или частью нити в процессе моделирования могут учитываться различные оптические эффекты. Для элемента – части нити, учитываются такие эффекты как:

- перекрытие волокон внутри нити,
- переотражение света внутри нити (между волокон нити),
- тени от волокон,
- пух вокруг нити.

Для элемента – части ткани, учитываются такие эффекты как:

- рассеивание света в нити,
- переотражение света между нитями,

- тени от соседних нитей,
- нерегулярность плетения нити.

Мех и ткани с густым ворсом. Ткани с густым ворсом составляют отдельный класс объектов визуализации за счет своей особенности – наличия большого числа мелких элементов (ворсинок).

Один из возможных подходов для визуализации тканей такого типа – это моделирование ворсинок с помощью полигональных сеток. Основным недостатком такого подхода являются значительные вычислительные затраты, а также затраты на сглаживание изображения.

Наиболее известным является подход, изложенный в статье [6]. Этот метод основан на технике, позволяющей визуализировать сцены, содержащие в себе системы частиц, такие, например, как огонь, облака, пыль. Для визуализации меха, авторы предлагают использовать так называемые тексели (texel – от texture element). На практике текстель представляет собой трехмерный массив параметров, аппроксимирующих визуальные свойства множества микроповерхностей (ворсинок в случае визуализации ткани), находящихся в определенном объеме. Тексели используются вместо геометрии сцены. В общем случае каждый текстель характеризуется тремя функциями, определяющими для каждой точки текстеля плотность микроповерхностей, ориентацию и ДФО микроповерхностей. Освещенность точки в текстеле вычисляется как сумма произведений освещенности точки каждым источником света в сцене на плотность в этой точке, плюс учитывается затухание света, которое определяется как сумма плотностей по всем точкам от данной точки в текстеле до наблюдателя.

1.2. Моделирование деформации ткани

Задача моделирования деформации тканей является важной для ее реалистичного изображения, так как ткань не может принимать произвольную

форму, поскольку все ее деформации подчинены законам физики. Могут быть выделены два класса задач моделирования деформации ткани:

- Деформация ткани без учета коллизий. Здесь форму и деформацию ткани определяют обычно внешние силы, присутствующие в сцене, такие, например, как гравитация или ветер, и не принимаются во внимание другие объекты сцены.
- Деформация ткани с учетом коллизий. Здесь вычисляются пересечения (без проникновения) ткани самой с собой, а также с другими объектами, присутствующими в сцене.

В общем случае все методы моделирования деформации ткани можно разделить на два типа: геометрические (методы, основывающиеся на геометрических свойствах ткани) и физические (методы, основывающиеся на физических свойствах ткани).

Геометрические методы не учитывают физические характеристики ткани, такие как масса, эластичность и пр. Они представляют ткань с помощью геометрических уравнений. Эти методы подходят для моделирования объектов, отдельных от всей остальной сцены и имеющих простую форму.

Физические методы наоборот принимают во внимание физические характеристики рассматриваемой ткани. От метода к методу могут учитываться масса, эластичность, упругость материала. Ткань моделируется с применением законов механики. Эти методы представляют объекты с помощью дифференциальных уравнений. Результаты моделирования с помощью этого класса методов обычно более реалистичны, чем результаты моделирования с помощью геометрических методов. Они также требуют большего времени вычисления.

Более полно методы моделирования деформации ткани описаны в работах [7-12].

2. Подход к моделированию ткани с явной структурой

В работе [5], посвященной визуализации вязаной ткани, ткань считается состоящей из огромного числа маленьких базисных элементов. В качестве базисного элемента авторы выбрали достаточно короткий сегмент нити. Показано, что, дублируя сегменты один за другим и при этом незначительно поворачивая каждую следующую копию относительно предыдущей, можно получать реалистично выглядящую закрученную нить. Авторы предлагают предварительно рассчитать, как будет выглядеть сегмент нити при различных положениях источника света и наблюдателя. Так как поворот сегмента при его копировании во время реконструкции нитей эквивалентен перемещению наблюдателя и источника света относительно неподвижного сегмента нити, то, комбинируя предварительно рассчитанные данные, можно достаточно быстро получать изображения целостных кусков материи заданной формы и размера.

Недостатком подхода, предложенного в [5], является то, что выбор слишком маленького базисного элемента позволяет принять во внимание переотражения света только внутри одной нити. В отличие от этого подхода в настоящей работе предлагается использовать более крупный базисный элемент – *ячейку ткани*. В этом случае становится возможным учесть также и переотражения света между различными нитями. Это особенно важно в случае, когда в плетении используются нити различного цвета и/или состоящие из различных материалов.

Хранение геометрии и освещенности ткани в нашем алгоритме осуществляется в ячейке ткани. Ячейка – это прямоугольный элемент ткани, являющийся наименьшим периодом, с которым повторяется ее плетение. Волокна двух ячеек, сопоставленных друг с другом по противоположным сторонам, в точности соединяются друг с другом и составляют визуально непрерывный кусок ткани. Таким образом, соединяя ячейки друг с другом, можно получить визуально непрерывный кусок ткани любого размера.

Использование более крупного базисного элемента позволяет нам учесть большее количество эффектов, чем в работе [5], и промоделировать распространение света в ткани с большей точностью. Так, наш метод учитывает геометрические искривления волокна внутри ячейки ткани и принимает во внимание рассеянное освещение, приходящее с других волокон не только этой, но и соседних ячеек. При выполнении экспериментов, мы предполагали, что на яркость любой точки ячейки ткани может оказывать влияние рассеяние света в радиусе до трех размеров ячейки. Влиянием света от более отдаленных ячеек мы пренебрегаем. Однако оно также может быть принято во внимание изменением параметров вычислений.

3. Задание нити

3.1. Триангуляция нити.

Предполагается, что каждая нить представляет собой искривленный цилиндр. Таким образом, для описания ее формы достаточно задать радиус нити и форму бесконечно тонкой кривой, являющейся ее центральной осью. Так как обычно ткань рассматривают со значительного расстояния, то для упрощения задачи можно описывать центральную ось нити как ломаную линию, заданную некоторым количеством опорных точек.

Для предварительного вычисления освещенности ячейки ткани мы используем стандартный алгоритм трассировки лучей по методу Монте-Карло [13] в полигональных сценах. Поэтому необходимо выполнить триангуляцию всех составляющих ячейку нитей. Для этого вокруг каждой опорной точки ломаной, представляющей центральную ось нити, строится равносторонний выпуклый многоугольник, количество вершин которого является одним из параметров алгоритма. Многоугольник строится таким образом, что оба входящих в него отрезка центральной оси нити составляют одинаковый угол с плоскостью многоугольника. Затем создается многогранник, соответствующий

сегменту нити. Для этого соединяются вершины соседних многоугольников, все получившиеся четырехугольники разбиваются по диагоналям на пары треугольников, как показано на рис. 3-а. Предлагаемый алгоритм триангуляции является простым и эффективным.

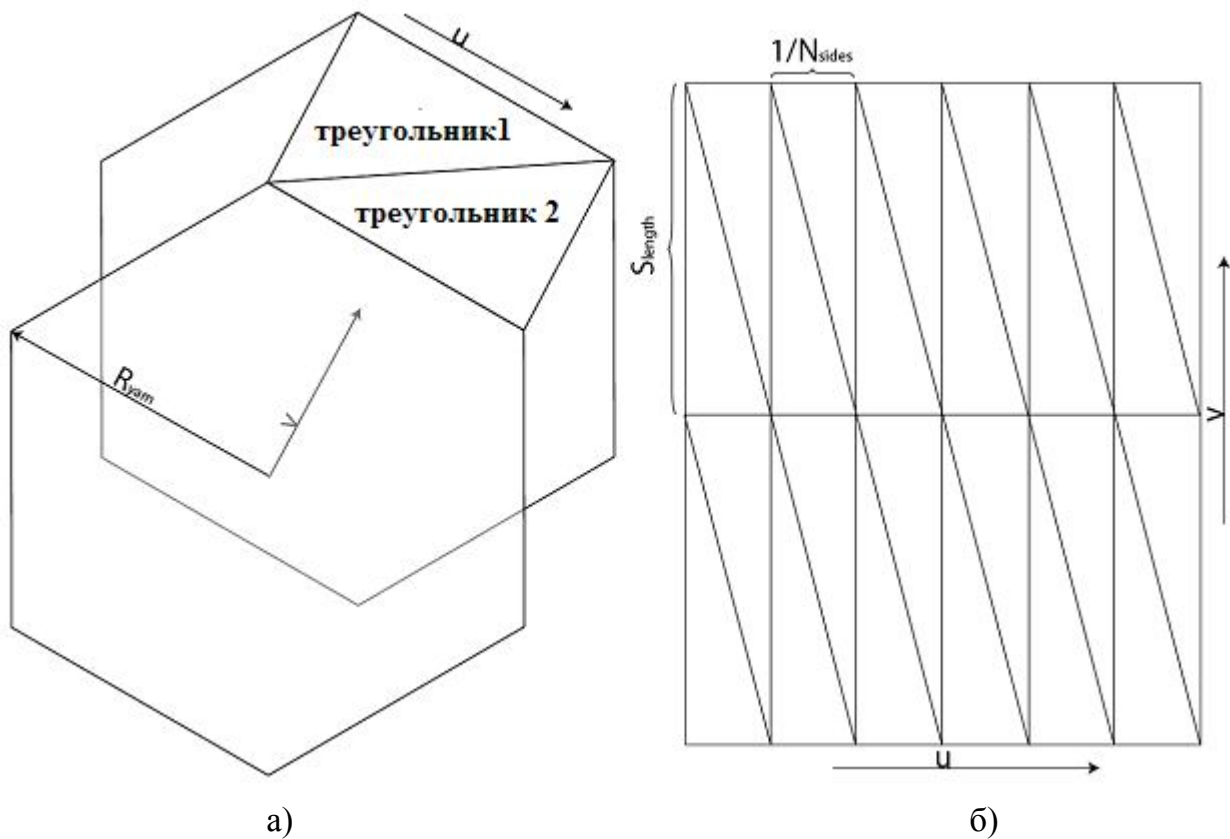


Рис. 3. Триангуляция (а) и параметризация (б) нити плетения. На рис. 3-а показаны многоугольники сечения нити с радиусом R_{yarn} и треугольники, формирующие поверхность нити. На рис. 3-б показана развертка поверхности сегмента нити с длиной S_{length} и количеством сторон многоугольника N_{sides} . (u, v) – координаты параметризации нити.

Нить, созданная таким образом, не будет выглядеть гладкой, так как она состоит из прямоугольников. Для придания нити гладкости, используем метод гладких нормалей, предложенный в [14]. Гладкие нормали задаются в вершинах полученной триангуляции. Гладкая нормаль в вершине параллельна направлению от центра многогранника к вершине. В любой точке внутри сегмента многогранника, состоящего из треугольников, гладкая нормаль вычисляется как сумма гладких нормалей в вершинах треугольника, взятых с весами, пропорциональными барицентрическим координатам этой точки.

Легко видеть, что при таком алгоритме триангуляции радиус нити не будет постоянным - в пределах каждого сегмента он будет определяться углом между этим сегментом и двумя соседними. Но это даже улучшает реалистичность моделирования, так как в реальной жизни идеально цилиндрические нити также практически не встречаются.

3.2. Параметризация нити

Основная идея предлагаемого алгоритма состоит в эффективном хранении данных о рассеянии света каждой нитью ткани в виде, который бы не зависел ни от точки наблюдения, ни от направления падающего света. Поэтому необходимо хранить эти данные на геометрии нитей.

Яркость нити является функцией точки на поверхности нити и направления наблюдения. Для хранения этой информации была реализована параметризация геометрии нитей, которая делает привязку к ней многомерных сеточных функций. Предлагаемая параметризация позволяет и эффективно сохранять данные на геометрии нитей в процессе предварительного вычисления, и эффективно получать доступ к этим данным в процессе визуализации.

Обозначим количество сторон многоугольника триангуляции (рис. 3-а) как N_{sides} , а длину одного сегмента нити – как S_{length} . В этом случае нить можно легко развернуть на плоскости, при этом получается параметризация, показанная на рис. 3-б. Эта параметризация эквивалентна введению на поверхности нити криволинейных координат (u, v) . Координата u изменяется в интервале $[0, 1]$ вокруг нити. Координата v изменяется в интервале $[0, Y_{length}]$ вдоль нити, где Y_{length} – длина ее центральной оси. Был разработан эффективный алгоритм, позволяющий вычислять по точке \bar{p} внутри треугольника ее координаты (u, v) , и наоборот, по координатам (u, v) – индекс треугольника и точку, которой они соответствуют.

Если задан индекс треугольника t и барицентрическая координата \bar{b} внутри этого треугольника, то для вычисления координат $(u(t, \bar{b}), v(t, \bar{b}))$ достаточно на стадии триангуляции приписать каждой вершине треугольника опорные координаты $(u(t, i), v(t, i))$, где i – индекс вершины от 0 до 2. Тогда в дальнейшем можно вычислять координаты $(u(t, \bar{b}), v(t, \bar{b}))$ как сумму опорных координат, взятых с барицентрическими весами:

$$\bar{p}(u(t, \bar{b}), v(t, \bar{b})) = \sum_{i=0}^2 b[i] \bar{p}(u(t, i), v(t, i))$$

Процедура обратного преобразования, т.е. получения индекса треугольника и барицентрической координаты в нем, не составляет сложностей и выполняется за фиксированное время с использованием плоской параметризации (рис. 3-б). Надо заметить, что в принципе возможно использование нитей с варьирующей длиной сегментов центральной оси. Но в этом случае процедуру обратного преобразования уже нельзя будет выполнить за фиксированное время, и потребуются применение двоичного поиска. В то же время использование постоянной длины сегмента не является серьезным ограничением области применимости метода.

3.3. Локальная система координат

Вообще говоря, нити не являются диффузными объектами. Поэтому яркость нити является функцией не только точки на поверхности нити, но и направления. Данные о рассеянии света должны храниться также в зависимости от направления. Так как нас интересует лишь то, как нить выглядит снаружи, то будем хранить информацию по направлениям, составляющим острый угол с поверхностью нити.

Для этого с каждой точкой поверхности нити свяжем локальную полярную систему координат (рис. 4). В качестве оси Z выберем гладкую нормаль к поверхности нити, ось Y будет параллельна центральной оси нити, а

ось X выберем так, чтобы полученная система координат была правой. Для избежания скачков в изменении направления оси Y (центральная ось нити является ломаной линией), будем интерполировать направление оси Y подобно гладким нормальям. При таком подходе возможно, что в местах искривления нити оси Y и Z будут не перпендикулярны друг другу. Однако в действительности это не приводит к появлению ошибок, видимых для глаза.

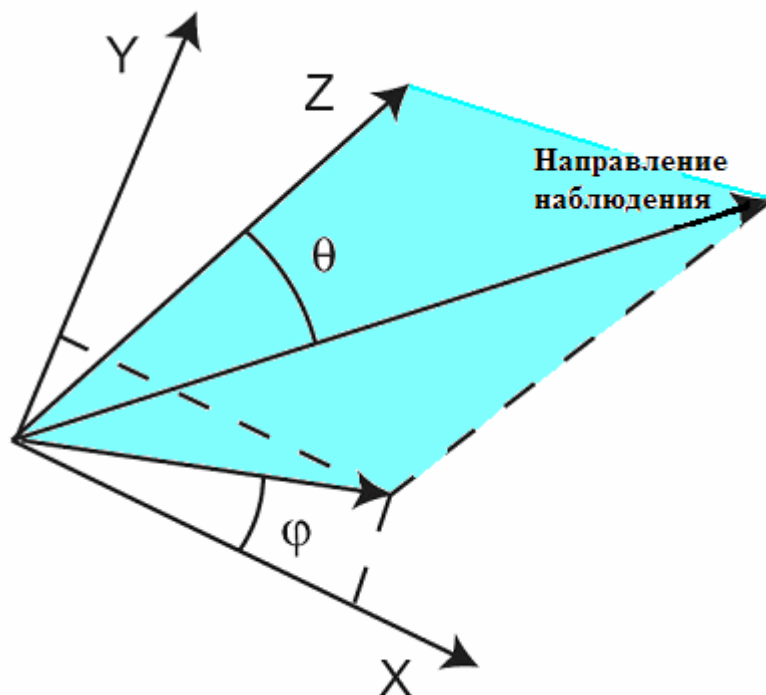


Рис. 4. Локальная полярная система координат, связанная с каждой точкой поверхности нити.

4. Вычисление функции светового рассеивания нити

В результате множественного рассеяния тонкий пучок света, входящий в нить, образует яркое пятно вокруг точки падения. Этот эффект носит название внутреннего рассеивания и описывается соответствующей функцией. Функция внутреннего рассеивания рассчитывается заранее и сохраняется в виде многомерной сеточной функции. Использование рассчитанной заранее функции позволяет значительно ускорить расчет переотражений света между

нитьями, так как исчезает необходимость трассировать лучи внутри нитей, и можно сразу преобразовывать входной луч в выходной.

При вычислении сделаем упрощающее предположение, что функция внутреннего рассеивания не зависит от изгиба нити. Тогда ее можно предварительно рассчитать один раз для каждого типа нити, считая нить бесконечно длинным цилиндром радиуса R_{yarn} . Из соображений симметрии можно рассчитать функцию только для одной точки падения. Для каждого из направлений падения взятых на фиксированной сетке (например, 9 градаций по углу θ и 36 градаций по углу φ) трассируется большое количество фотонов. Для каждого фотона регистрируется точка и направление его выхода из нити. Для представления на сетке точка и направление выхода также дискретизируются. По окончании предварительных вычислений в нашем распоряжении имеется Монте-Карло аппроксимация шестимерной функции внутреннего рассеяния нити:

$$\overline{F}(r_i(\varphi_i, \theta_i), p_o(u_o, v_o), r_o(\varphi_o, \theta_o)),$$

где φ_i и θ_i задают направление падающего луча, u_o и v_o – точку, а φ_o и θ_o – направление выхода луча из нити. Система координат для углов приведена на рис. 4.

4.1. Вычисление прямой компоненты освещения нити.

Одним из стандартных методов оптимизации вычислений при моделировании распространения света является разделение освещения на прямое (первичное) и не прямое (вторичное). Каждая из компонент освещения имеет определенные особенности, которые позволяют сделать оптимизирующие приближения при ее вычислении, недопустимые при вычислении другой компоненты. Рассмотрим тонкий пучок света, падающий

на одну из нитей ткани. Дальнейшее моделирование света этого пучка разделим на следующие три компоненты:

- часть энергии L_1 отражается от поверхности нити и непосредственно участвует в формировании изображения;
- часть энергии L_2 претерпевает множественное рассеивание внутри нити, но в итоге покидает ее пределы и непосредственно участвует в формировании изображения;
- часть световой энергии L_3 отражается от нити либо проходит через нить и, попадая на соседние нити, освещает их.

Первую компоненту будем вычислять с помощью известной в компьютерной графике формулы Фонга [15], которая является достаточно хорошим приближением к функции рассеяния большинства реальных поверхностей:

$$L_1(\bar{r}_l, \bar{r}_v) = G(\bar{r}_l) [K_d(\bar{r}_l, \bar{n}) + K_s \left[\frac{(-\bar{r}_l + \bar{r}_v, \bar{n})}{|\bar{r}_l + \bar{r}_v|} \right]^n],$$

где \bar{r}_l и \bar{r}_v – направления освещения и наблюдения соответственно, а $G(\bar{r}_l)$ – геометрический фактор, который показывает, во сколько раз свет ослабляется, пройдя от источника света до заданной точки на поверхности нити. Будем предполагать, что вектор \bar{r}_l направлен к точке на поверхности, \bar{r}_v направлен к наблюдателю, вектор \bar{n} нормали направлен от поверхности. K_d и K_s – коэффициенты, характеризующие соответственно диффузную и глянцевую компоненты рассеивания поверхности, а n – коэффициент, определяющий степень глянцевого.

Расчет компоненты освещенности L_1 не сложен, не требует больших вычислений, и может быть сделан для каждой точки во время генерации изображения. Незначительные накладные расходы вызывает только вычисление фактора ослабления света $G(\bar{r}_l)$. Для этого требуется

протрассировать луч из точки на поверхности нити к источнику света. Луч может пересекать другие нити плетения, которые являются рассеивающей средой. Обозначим L – суммарное расстояние, которое луч прошел внутри нитей плетения. Тогда согласно [16]:

$$G(\bar{r}_l) = \exp(-L \tau), \quad (1)$$

где τ – коэффициент, показывающий оптическую плотность материала нити.

4.2. Вычисление не прямой компоненты освещенности нити

Если первая компонента освещения зависит только от света, непосредственно попадающего в точку на поверхности, то другие две компоненты зависят от освещенности других точек поверхности этой же нити и соседних нитей соответственно. Вычисление этих компонент требует существенных затрат, поэтому делать это во время генерации изображения неэффективно. В нашей реализации эти компоненты были предварительно рассчитаны для всех возможных направлений источника света и наблюдения, и уже подготовленные значения использовались при генерации изображения.

Построим сначала *теньевую маску* ячейки ткани. Теньевая маска – это сеточная функция (обозначим ее как $\bar{S}(u, v)$), покрывающая поверхность каждой нити ячейки ткани. В каждом узле сетки хранится значение, показывающее какая часть энергии, покидающей источник света, достигает заданной точки. Теньевую маску удобно хранить в системе координат (u, v) нити, так как в этом пространстве поверхность нити представляет из себя просто прямоугольник. Разобьем этот прямоугольник на ячейки равного размера, и будем рассчитывать значения теневой маски в центре каждой ячейки. Для расчета одного значения достаточно протрассировать луч от центра ячейки к источнику света и в соответствии с (1) учесть ослабление этого луча внутри каждой нити, которую он пересекает.

После того, как теневая маска готова, на ее основе и с помощью функции внутреннего рассеяния нити можно рассчитать вторую компоненту освещенности:

$$L_2(\varphi_l, \theta_l, \varphi_v, \theta_v, u_v, v_v) = \sum_{k=0}^{N_u-1} \sum_{j=0}^{N_v-1} \overline{F}(\varphi_{loc}, \theta_{loc}, u_v, v_v, \varphi_v, \theta_v) \overline{S}(u_l(k), v_l(j)) , \quad (2)$$

где (φ_l, θ_l) – направление света в глобальной полярной системе координат, а $(\varphi_{loc}, \theta_{loc})$ – это же направление, но в локальной полярной системе координат, взятой в точке $(u_l(k), v_l(j))$. Суммирование в (2) ведется по всем ячейкам теневой маски.

Если L_2 содержит в себе вклад в освещение, приходящий от точек той же нити, то третья компонента освещения описывает переотражение света между соседними нитями. Она очень важна при визуализации тканей, содержащих нити различных цветов, так как отвечает за моделирование эффекта перетекания цвета от одной нити к другой. Так же как и в случае L_2 , прибегнем к предварительным вычислениям и сохраним L_3 в виде так называемой двунаправленной текстурной функции яркости поверхности. Эта функция является шестимерной и зависит от $(u_v, v_v, \varphi_l, \theta_l, \varphi_v, \theta_v)$. Она показывает отношение между яркостью точки (u_v, v_v) в направлении наблюдения (φ_v, θ_v) и потоком излучения параллельного света с направления (φ_l, θ_l) , обуславливающего эту яркость. Заметим, что как и ранее углы (φ_l, θ_l) измеряются в глобальной полярной системе координат, а углы (φ_v, θ_v) – в локальной системе, взятой в точке (u_v, v_v) .

Конечно, практически невозможно сохранить функцию такой высокой размерности на слишком подробной сетке из-за ограничений по памяти. Но так как непрямая компонента освещения обычно отличается гораздо большей гладкостью, чем прямая, то даже редкой сетки бывает достаточно для того, чтобы представить компоненту L_3 с достаточной точностью.

Для расчета двунаправленной текстурной функции яркости поверхности использовалась та же сетка, на которой рассчитывали функцию внутреннего рассеяния. В этом случае даже нет необходимости прибегать к использованию метода Монте-Карло, как предлагалось в [5]. Это значительно повышает скорость расчета алгоритма и позволяет даже при небольших временах избежать шумовых дефектов свойственных стохастическим алгоритмам. При расчете используются уже вычисленные значения функции внутреннего рассеяния F и компоненты освещенности L_1 и L_2 .

Ниже представлен псевдокод алгоритма вычисления двунаправленной текстурной функции яркости поверхности (BTDF – Bidirectional Textural Distribution Function):

```

for all точек и направлений наблюдения по сетке  $(\bar{p}_v, \bar{r}_v)$  do
    for all направлений освещения  $(\bar{r}_l)$  do
         $BTDF(\bar{p}_v, \bar{r}_v, \bar{r}_l) = 0$ 
    end for
    for all точек и направлений по сетке на поверхности нити  $(\bar{p}_i, \bar{r}_i)$  do
        протрассировать луч  $(\bar{p}_i, \bar{r}_i)$  до пересечения с другой нитью
        if пересечение найдено в точке  $\bar{p}_y$  then
            for all направлений освещения  $\bar{r}_l$  do
                 $BTDF(\bar{p}_v, \bar{r}_v, \bar{r}_l) += F(\bar{p}_v, \bar{r}_v, \bar{r}_l) * (L_1(\bar{p}_y) + L_2(\bar{p}_y))$ 
            end for
        end if
    end for
end for

```

5. Результаты

Предложенный алгоритм был реализован в виде расширяемой библиотеки классов на языке C++. Дизайн классов с использованием виртуальных функций и полиморфизма сделал возможным разработать библиотеку в наиболее общем виде. Это позволит в будущем без изменения интерфейса классов визуализировать практически любую ткань: с произвольным плетением, толщиной, формой и цветом нитей, с нитями из любого материала, в том числе с неоднородной плотностью и любой функцией рассеивания света. Допускается также использование ворсистых нитей (т.е. вокруг нитей может находиться полупрозрачное облако из тончайших волокон).

На начальном этапе разработки была использована простейшая модель ткани, состоящая просто из двух слоев нитей. Нити одного и того же слоя параллельны друг другу. Направления нитей из различных слоев перпендикулярны друг к другу. На данном этапе предполагалось, что нити одного цвета и состоят из материала с однородной плотностью со сферической функцией рассеяния. Задание реального плетения нитей уже было разработано нашим коллективом ранее [1]. Этот модуль планируется подключить позднее. Генерация изображений, представленных на рис. 5, производилась с помощью пакета визуализации, также разработанного коллективом. Изображение генерируется методом трассировки лучей. При попадании луча на объект, покрытый тканью, алгоритм генерации запрашивает вычисление ее цвета в созданной библиотеке классов по моделированию ткани.

На рис. 5 представлены примеры изображения одного и того же плоского куска ткани при различных условиях освещения. В данном случае освещение создается солнечным светом. На процессоре Intel Pentium III 1.1 GHz время предварительного расчета составило около 10 минут. После этого генерация изображений не требует дополнительных затрат по сравнению

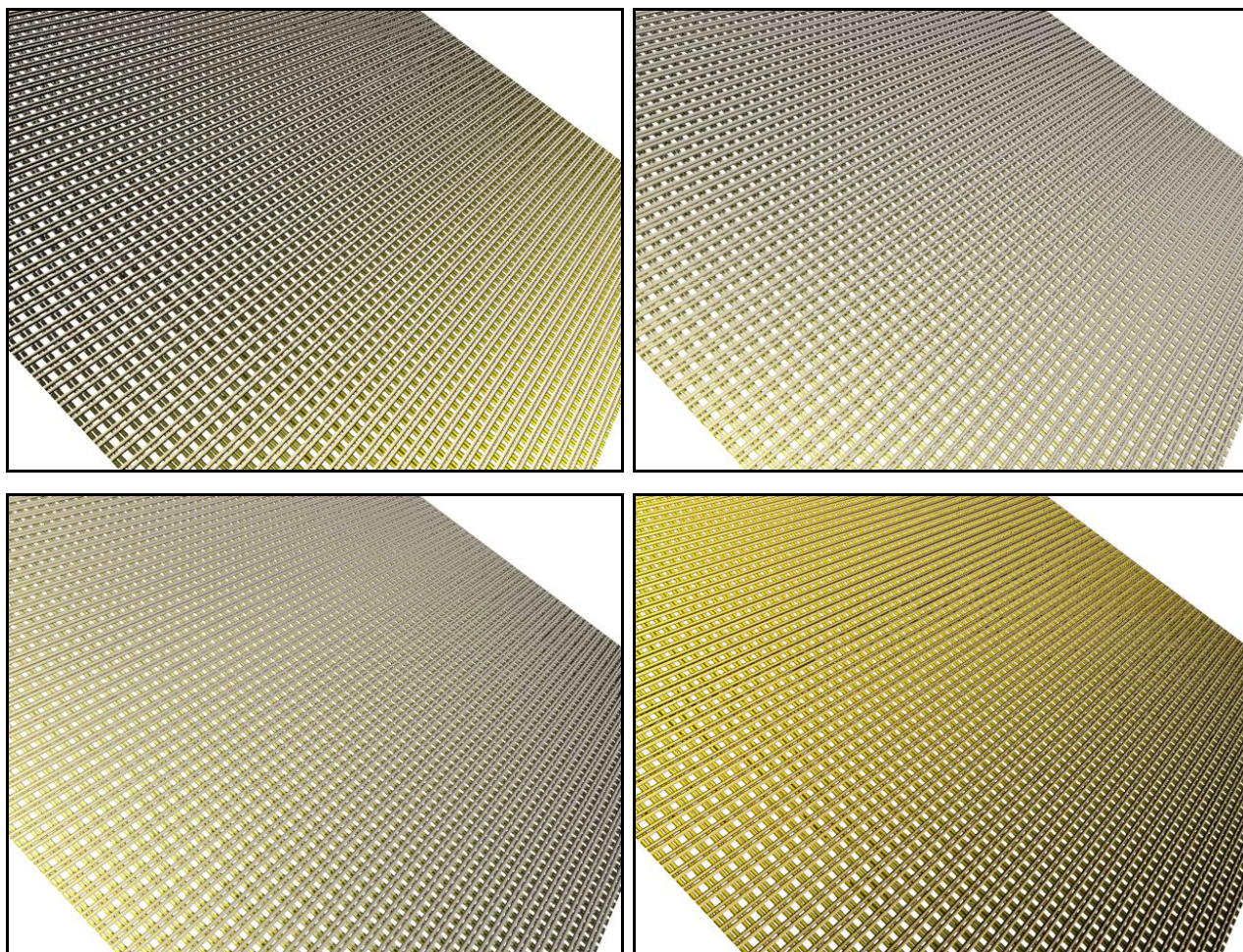


Рис. 5: Кусок смоделированной ткани при различных условиях естественного освещения (верхний левый рисунок соответствует дневному освещению в 7 часов утра, верхний правый - в 11 часов утра, нижний левый - в 14 часов дня, нижний правый - в 18 часов вечера).

со стандартной обратной трассировкой лучей. Генерация изображений занимает около 30 секунд. Затраты памяти для хранения предварительно рассчитанных данных для данного типа материала составляют около 100 мегабайт, что вполне допустимо, учитывая низкую стоимость оперативной памяти на современном рынке.

Список литературы.

[1] Vladimir Volevich, Andrei Khodulev, Edward Kopylov, Olga Karpenko. An Approach to Cloth Synthesis and Visualization. The 7-th International Conference on Computer Graphics and Visualization, Moscow, Russia, May 21-24, 1997, pp.45-49.

[2] B.K.P. Horn. "Robot Vision", MIT Press and McGraw-Hill, Cambridge, MA, 1986. (русский перевод: Хорн Б.К.П. Зрение роботов: Пер. с англ.- М.:Мир, 1989)

[3] Ilija Bogaevski, Edward Kopylov, Andrei Khodulev. An Implicit Approach to Cloth Synthesis. The 9-th International Conference on Computer Graphics and Vision, Moscow, Russia, August 26 - September 1, 1999, pp.117-120.

[4] H. Zhong, Y. Xu, B. Guo, and H. Shum. Realistic and Efficient Rendering of Free-Form Knitwear. Journal of Visualization and Computer Animation, Special Issue on Cloth Simulation, 2000.

[5] Y.-Q. Xu, Y. Chen, S. Lin, H.Zhong, E.Wu, B. Guo, H.-Y. Shum. Photorealistic rendering of knitwear using the lumislice. SIGGRAPH '01 Conference Proceedings, 2001, pp. 391-398.

[6] J. T. Kajiya, T. L. Kay. Rendering Fur with Three Dimensional Textures. Computer Graphics (Proceedings of SIGGRAPH 89), Vol. 23, № 3, July 1989, pp. 271-280.

[7] Hing N. Ng, Richard L. Grimsdale. Computer Graphics Techniques for Modeling Cloth. IEEE Computer Graphics and Applications, Vol. 16, № 5, 1996, pp. 28-41.

[8] N.M. Thalmann, Ying Yang. A Survey of Cloth Animation Techniques. In N.M. Thalmann, Daniel Thalmann, New Trends in Animation and Visualisation. Wiley, 1991. p. 243 - 249.

[9] Chen Yanyun, Stephen Lin, Hua Zhong, Ying-Qing Xu, Baining Guo, Heung-Yeung Shum. Realistic Rendering and Animation of Knitwear. Microsoft Research, 2003. <http://research.microsoft.com/research/pubs/view.aspx?pubid=1278>

[10] Andre Gagalowicz. Realistic 3D Simulation of Garments. The 15-th International Conference on Computer Graphics and Applications GraphiCon-2005, Novosibirsk, Russia, 2005.

[11] Cyril Ngo Ngos, Samuel Boivin. Nonlinear Cloth Simulation. INRIA Research Report № 5099.

<http://www.inria.fr/rrrt/rr-5099.html>

[12] P. Decaudin, B. Thomaszewski, M.-P. Cani. Virtual garments based on geometric features of fabric buckling. INRIA Research Report № 5549.

<http://www.inria.fr/rrrt/rr-5549.html>

[13] А.Г. Волобой, В.А. Галактионов, К.А. Дмитриев, Э.А. Копылов. Двухнаправленная трассировка лучей для интегрирования освещенности методом квази- Монте Карло. "*Программирование*", № 5, 2004, с.25-34.

[14] B.T. Phong. "Illumination for computer generated pictures". Communications of the ACM, Vol. 18, № 5, 1975, pp. 311-317.

[15] Д. Роджерс. Алгоритмические основы машинной графики. М.:Мир, 1989.

[16] R.V. Klassen. "Modeling the Effect of the Atmosphere on Light". ACM Transactions on Graphics, Vol. 6, № 3, 1987, pp.215-237.