

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

А.Г. Волобой, В.А. Галактионов

**Машинная графика в задачах
автоматизированного проектирования**

Москва
2005

А.Г. Волобой, В.А. Галактионов

Машинная графика в задачах автоматизированного проектирования

Аннотация

В статье дается обзор работ, проводимых в ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, по применению методов компьютерной графики в различных областях проектирования и дизайна: архитектуре, дизайне интерьеров, создании оптических светопроводящих и осветительных систем и устройств, новых оптически сложных материалов, таких как многослойные автомобильные краски и ткани. В основе подхода лежит разработанная технология расчета, основанная на физически аккуратном моделировании распространения света.

A.G. Voloboy, V.A. Galaktionov

Computer Graphics Applications in CAD

Abstract

The paper presents review of R&D works conducted at KIAM on computer graphics applications for exterior and interior architecture design, simulation of complex optical light guiding systems like PLED and car headlights, simulation and visualization of multilayer coatings with complex internal microstructure, simulation and visualization of cloth. The approach is based on physically accurate simulation of light propagation.

Работа выполнялась при поддержке гранта Президента РФ «Ведущие научные школы» № РИ-112/001/278, гранта РФФИ № 04-01-00520, а также компании INTEGRA Inc. (Япония).

Статья представлена для публикации в журнале «Информационные технологии в автоматизированном проектировании и производстве»

Содержание

1. Введение.....	4
2. Синтез реалистичных изображений. Физически аккуратные расчеты освещенности.....	4
2.1. Источники света. Естественное освещение.....	6
2.2. Изображения с большим динамическим диапазоном.....	7
2.3. Интернет-сервис синтеза реалистичных изображений.....	9
3. Моделирование сложных оптических систем.....	11
3.1. Поверхности с микрорельефом и микроструктурами.....	13
3.2. Моделирование осветительных систем.....	15
4. Моделирование и визуализация оптически сложных материалов.....	15
4.1. Многослойные краски со сложной внутренней микроструктурой.....	15
4.2. Моделирование и визуализация тканей.....	18
5. Построение реалистичных изображений сцен, содержащих оптически сложные материалы, в реальном времени.....	20
6. Заключение.....	23
Список литературы.....	23

1. Введение

Наряду с научными исследованиями автоматизированное проектирование являлось одной из основных сфер применения работ по машинной (компьютерной) графике, которые ведутся в ИПМ уже более 30 лет. Графическая библиотека ГРАФОР [1], созданная в ИПМ в основном в первой половине 70-х годов прошлого века для визуализации результатов научных вычислений, нашла широкое применение в автоматизации проектных и конструкторских работ в машиностроении, авиационной промышленности, архитектуре и других областях.

Библиотека позволяла выводить на графопостроитель, а затем и на дисплей, графические примитивы (отрезок прямой, дуга окружности, алфавитно-цифровые символы) и на их базе строить графики функций. В дальнейшем библиотека пополнилась программами аффинных преобразований, штриховки, аппроксимации и сплайн-интерполяции, программами визуализации двумерных функций (проекции поверхностей, карты изолиний, скалярные и векторные поля), программами геометрических построений и рядом других функциональностей. Графор был реализован на большинстве существующих в то время в Советском Союзе ЭВМ и операционных систем с выводом практически на все имеющиеся графопостроители и графические дисплеи. В настоящее время интерес к ГРАФОРу поддерживается в связи с его переносом в среды Windows и Unix [2].

2. Синтез реалистичных изображений. Физически аккуратные расчеты освещенности

С начала 90-х годов главным направлением развития компьютерной графики в институте стал синтез реалистичных изображений на базе физически аккуратного (т.е. основанное на физических законах) моделирования распространения света в различных средах. Эта задача сводится к решению

задачи глобальной освещенности, когда учитывается не только прямая освещенность поверхностей сцены лучами, идущими непосредственно от источников света, но и вторичная освещенность, создаваемая лучами, отраженными или преломленными другими поверхностями.

Была построена технология на основе методов Монте-Карло и трассировки лучей, позволяющая с высокой точностью рассчитывать освещенность моделируемых сцен, строить реалистичные изображения фотографического качества.

Идея метода Монте-Карло прямой трассировки лучей [3, 4] состоит в статистическом воспроизведении механизма распространения света путем моделирования всевозможных траекторий лучей. Траектории световых частиц (фотонов) прослеживаются на всех этапах существования от момента их генерации источниками света до поглощения или выхода из сцены. При генерации световых частиц направление, в котором испускается фотон, длина волны и стартовая позиция на источнике света определяются стохастически согласно фотометрическому распределению энергии источника и его геометрической форме. Затем траектория фотона трассируется до пересечения с поверхностью объекта сцены. После чего дальнейшее поведение фотона определяется светорассеивающими свойствами поверхности.

Метод естественным образом поддерживает все типы поверхностей, включая сочетания диффузных и зеркальных свойств, а также поверхности со сложными оптическими свойствами, описываемыми двунаправленными функциями отражения (преломления) света.

Метод Монте-Карло прямой трассировки лучей не зависит от положения камеры и не предусматривает вывод изображения на экран, а лишь предоставляет информацию о глобальной освещенности, которая в дальнейшем может быть использована для визуализации и синтеза изображений.

Созданные на основе этой технологии программные комплексы нашли применение в сфере архитектурного проектирования, дизайна интерьеров помещений, салонов автомобилей и самолетов, проектирования систем

освещения зданий и других объектов городского строительства. При разработке архитектурных и светотехнических решений графическая система позволяет увидеть как будет выглядеть интерьер, здание или комплекс архитектурных (инженерных, скульптурных) сооружений в существующем ландшафте при различных условиях естественного или искусственного освещения до начала их реального воплощения. Она позволяет промоделировать, например, несколько вариантов искусственного освещения и/или подбора отделочных материалов для интерьера или здания и выбрать оптимальный (рис. 1).



Рис. 1. Примеры фотореалистичных изображений, построенных с использованием алгоритмов моделирования глобальной освещенности.

2.1. Источники света. Естественное освещение

Программными комплексами поддерживаются разнообразные типы источников света, включая протяженные источники и условия естественного небесного освещения. Угловое распределение излучаемой световой энергии точечных и протяженных источников часто описываются гониометрическими диаграммами, задаваемыми в международном, стандартном формате IESNA.

Для задания естественного освещения можно выбрать подходящий элемент из библиотеки дневного (небесного) и солнечного света. Библиотека содержит предопределенные параметры для различных географических регионов (городов) в разное время суток, например, можно выбрать режим освещения, соответствующий естественному дневному свету в Новосибирске в 3 часа дня. Можно также с помощью редактора параметров солнечного и дневного освещения задать его в терминах географических координат, даты (времени года) и времени суток, либо в терминах положения солнца (высота над горизонтом и азимут) и освещенности в горизонтальной плоскости. В редакторе также задается степень облачности. Моделирование небесного освещения для случаев 100% облачности и ее отсутствия соответствует стандарту Международной комиссии по освещению CIE. Небесное освещение с неполной облачностью моделируется с использованием интерполяции.

2.2. Изображения с большим динамическим диапазоном

Другим методом задания освещения в графических комплексах может служить способ, при котором источником света является изображение реальных сцен с большим динамическим диапазоном яркостей (БДДИ), или в англоязычной литературе, HDR I – High Dynamic Range Image [5]. При этом источником света могут быть сфотографированные особым образом небо или помещение выставочного зала, и мы можем смоделировать, как будет освещен тот или другой объект в этих условиях. Задание таких условий освещения другими способами (например, набором специальным образом размещенных обычных источников искусственного света) часто является весьма трудоемким и дорогостоящим процессом, требующим проведения пробных моделирований и корректировки источников света. В результате использования БДДИ появляется возможность интегрировать моделируемые объекты с реальным окружением. На рис. 2 показана компьютерная модель автомобиля,

«встроенная» в реальный природный ландшафт. Хорошо заметны отражения окружающих деревьев на лобовом стекле, капоте и фарах автомобиля.

БДДИ получаются путем специальной обработки последовательности цифровых фотографий с различной экспозицией или результатов панорамного сферического видеосканирования.

При этом, однако, возникают проблемы, связанные с отображением изображений с большим динамическим диапазоном яркостей в диапазон яркостей, который может быть воспроизведен на стандартных мониторах и принтерах. Динамический диапазон таких устройств (порядка 100:1) существенно уже (иногда на несколько порядков), чем диапазон яркостей реального мира. С этой целью был разработан специальный оператор (Tone Mapping Operator) [6], который позволяет эффективным образом выполнять такое отображение без потери детальности изображения, с сохранением локального контраста и в отсутствие артефактов. На рис. 3 приведен результат применения этого оператора к изображению с динамическим диапазоном, превышающим 100 000:1.

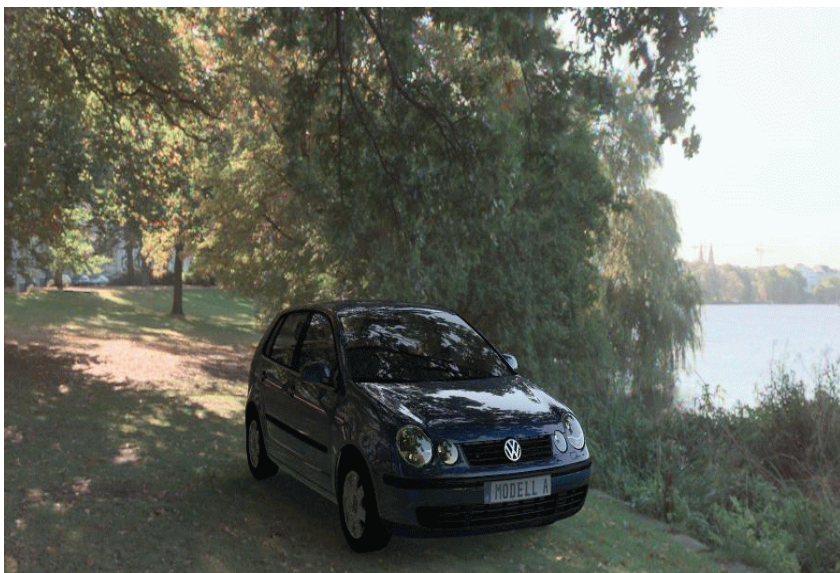


Рис. 2. Использование изображения с большим динамическим диапазоном яркостей в качестве источника освещения для компьютерной модели автомобиля.



Рис. 3. Пример изображения с большим динамическим диапазоном, полученного с использованием разработанного оператора.

2.3. Интернет-сервис синтеза реалистичных изображений

В настоящее время широкое распространение получила практика представления продуктов, изделий, технологий на сайтах Интернет. При этом нередко возникает необходимость изображать объекты при заданных пользователем условиях освещения, окружения или фоновой сцены, опциях внешней или внутренней отделки изделий и др. Как правило, в Web-страницах подобного рода используются подготовленные заранее высококачественные фотографии или изображения, полученные в результате моделирования. Очевидно, что презентации были бы более содержательными и информативными, если предоставить средства для динамического моделирования и синтеза изображений непосредственно в процессе Интернет-сеанса.

Для получения высококачественных изображений используются сцены с высокой степенью детализации геометрии, тщательно подобранными (или даже измеренными) свойствами поверхностей и источников света. Создание таких сцен может занимать недели работы высококвалифицированного персонала, и обычно они являются объектом собственности, не подлежащим свободному распространению. С этой точки зрения важно, чтобы детальное описание самих сцен не передавалось за пределы предоставляющего их Web-сайта.

Была разработана технология и создан программный комплекс, позволяющий создавать активные Интернет-презентации, где посетитель сайта сам может выбирать всевозможные опции визуализации, моделировать сцену, а соответствующие изображения синтезируются в процессе сеанса работы в Интернет [7]. Одно из естественных приложений программного комплекса - это средство предоставления Интернет-сервисов дизайна интерьеров или светотехнического проектирования (рис. 4).



Рис. 4. Пример физически аккуратной визуализации сцены, выполненной с помощью созданного Интернет-сервиса (с разрешения фирмы Thomas & Gilles GmbH).

Ключевым требованием к подобному программному комплексу является то, что фотореалистическое качество генерируемых изображений должно быть получено в результате физически аккуратного моделирования распространения света. Для получения качественных и достоверных изображений существенна также высокая степень точности и детализации описания геометрии, источников света, оптических свойств материалов в используемых сценах. Такой подход, естественно, требует больших вычислительных затрат при моделировании. В то же время, в условиях доступа к приложениям через Интернет критически важным является обеспечение разумного времени отклика, а это значит, что вычисления должны выполняться достаточно быстро. Достижение этих двух существенно противоречащих друг другу целей потребовало значительных усилий по выработке и реализации соответствующих архитектурных, алгоритмических и программных решений.

3. Моделирование сложных оптических систем

Созданная технология расчета распространения света оказалась столь эффективной и точной, что позволила сделать следующий шаг и перейти к моделированию и инженерному проектированию сложных оптических светопроводящих и осветительных систем, таких как жидкокристаллические панели, волоконнооптические устройства, автомобильные фары и приборы и др. На рис. 5-а и 5-б показаны схемы одного из таких устройств – системы подсветки жидкокристаллического монитора. Как правило, компоненты таких приборов имеют достаточно сложные оптические свойства и геометрию, включая поверхности с микроструктурами и микрорельефами. Принцип работы таких устройств основан на эффекте полного внутреннего отражения. Для их моделирования практически невозможно использовать обычные детерминистические методы лучевого расчета распространения света, применяемые для расчета линзовых оптических систем. Наиболее эффективным и физически точным подходом в этом случае является трассировка лучей, основанная на методе Монте-Карло.

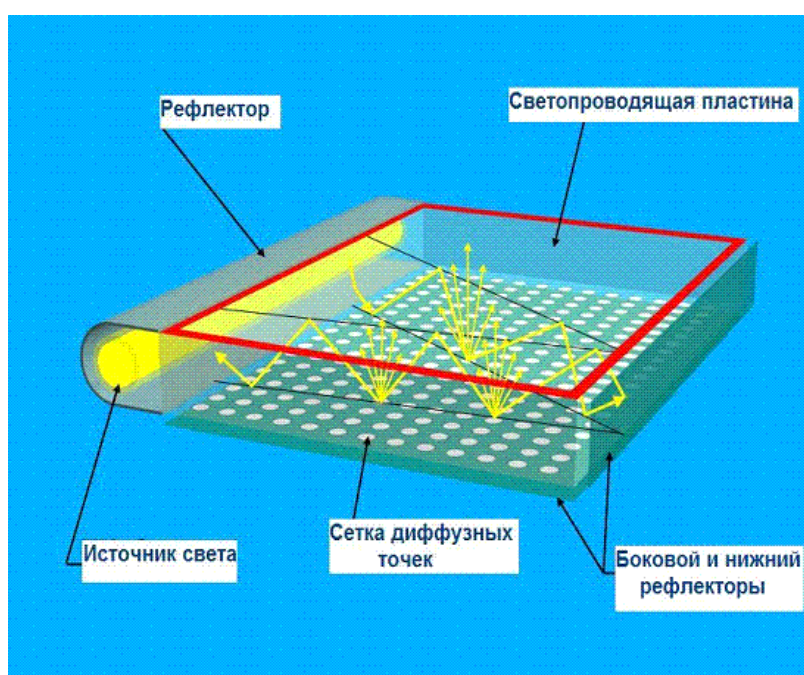


Рис. 5-а. Схема системы подсветки жидкокристаллического монитора, построенная на основе акриловой светопроводящей пластины с сеткой диффузных точек.

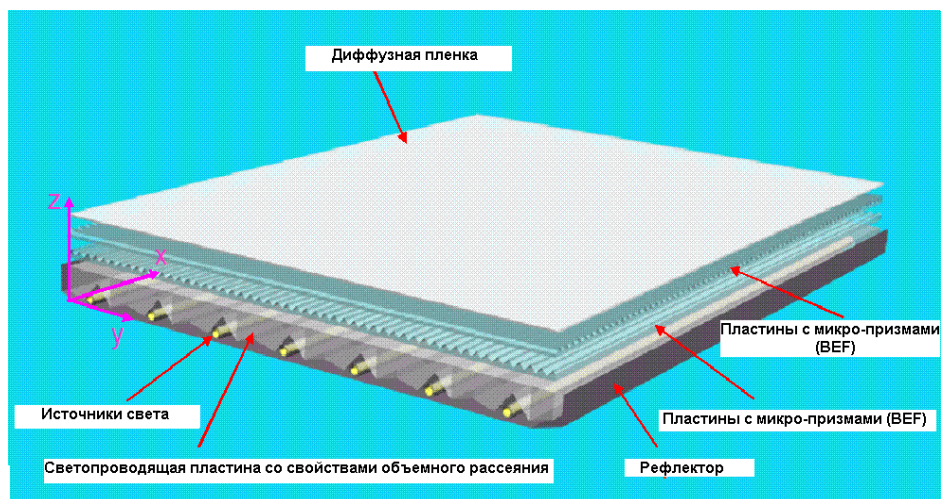


Рис. 5-б. Схема системы подсветки жидкокристаллического монитора, построенная на основе светопроводящей пластины с высоким уровнем объемного рассеяния.

Процесс проектирования подобных устройств как правило складывается из следующих составляющих:

- проектирование источников света (как правило, люминисцентные лампы или светодиоды) и рефлекторов для получения максимального светового потока на входе в светопроводящую пластину (СПП);
- проектирование структуры сетки диффузных точек или микроэлементов на нижней, рассеивающей части СПП для получения пространственно равномерного распределения света над ее выходной (верхней) гранью (рис. 5-а); или моделирование оптимальной формы СПП в случае использования материалов с высоким уровнем объемного рассеяния света (HSOT полимеров), как показано на рис. 5-б;
- проектирование одного или нескольких призматических слоев (BEF) для концентрации и усиления светового потока на выходе жидкокристаллического экрана;
- проектирование диффузного и/или поляризационного фильтра (пленки) для еще большего усиления яркости экрана.

Таким образом, конечной целью моделирования подобных систем является расчет пространственного и углового распределений яркости света

над выходной гранью устройства. Задача заключается в том, чтобы максимизировать яркость на выходе и сделать ее максимально равномерной.

3.1. Поверхности с микрорельефом и микроструктурами

Одной из больших проблем при проектировании и расчетах систем подсветки жидкокристаллических панелей является то, что при их проектировании используются элементы с чрезвычайно сложными оптическими свойствами, такие как поверхности с микрорельефами и микроструктурами. Они могут представлять собой как шероховатые («грубо обработанные») поверхности, так и поверхности с миллионами, миллиардами и триллионами регулярно или стохастически распределенных микроэлементов.

В разработанной системе [8] шероховатые поверхности могут задаваться двояким образом: либо явно - распределением высот микрорельефа в узлах регулярной сетки, которые могут быть непосредственно измерены 3D сканером, либо неявно – распределением плотности нормалей микрограней (рис. 6).

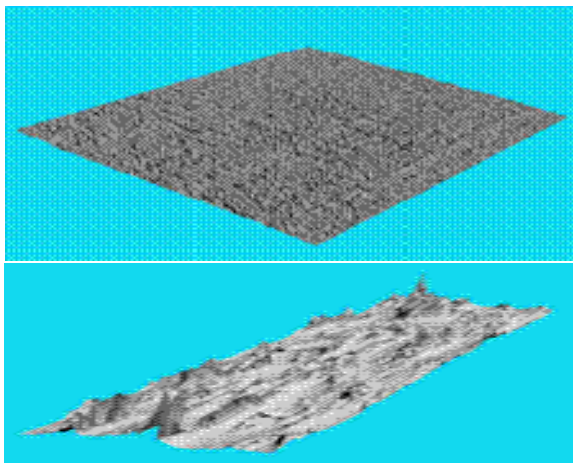


Рис. 6. Примеры «шероховатых» поверхностей, использованных при проектировании системы подсветки автомобильной магнитолы.

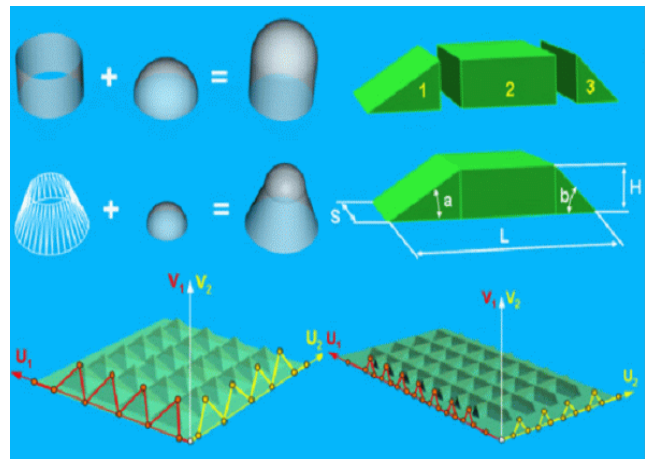


Рис. 7. Иллюстрация возможных способов построения элементов микрогеометрии.

Поверхности с элементами микрогеометрии (микро-призмы, микро-бороздки и др.), строятся с помощью операций конструктивной геометрии твердых тел над примитивными формами: цилиндром, сферическим сегментом, параллелепипедом, конусом, тором, треугольной сеткой и пр., или путем комбинирования других микро-призм и микро-бороздок (например, их пересечением). Примеры возможных способов построения микроэлементов показаны на рис. 7.

Как уже упоминалось, элементы микрогеометрии могут распределяться в пространстве:

- стохастически, когда их положение (и, возможно, размер и ориентация) определяются случайным образом и только плотность распределения контролируется пользователем; или
- детерминистически, когда положение, размеры, ориентация и другие параметры каждого такого элемента явно задаются пользователем (например, как периодическая структура дифракционной решетки).

В зависимости от сложности используемых микроэлементов и выбранного распределения допустимое количество элементов микрогеометрии может варьироваться от десятков миллионов до миллиардов и триллионов. Более того, допускается смешение микроэлементов различных типов с разной ориентацией в пространстве. Пример такой микроструктуры показан на рис. 8.

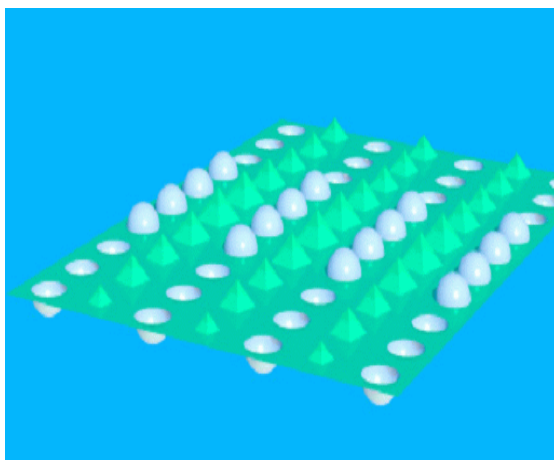


Рис. 8. Комбинация различных типов микроэлементов на одной поверхности с микроструктурой.

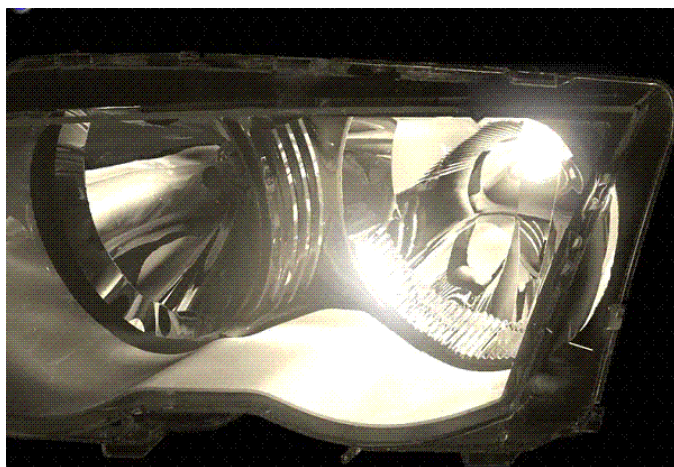


Рис. 9. Визуализация компьютерной модели автомобильной фары (с разрешения фирмы *Thomas & Gilles GmbH*)

3.2. Моделирование осветительных систем

Как отмечалось выше, разработанные программные комплексы позволяют проектировать не только светопроводящие, но и осветительные системы, такие как фары и фонари автомобилей, прожекторы и др. Основными целями моделирования и дизайна осветительных систем являются создание максимально эффективного светового потока в определенном направлении. Параметрами дизайна, в основном, бывают форма рефлектора, материал из которого он создан, вид и форма непосредственно источника света (лампы).

На рис. 9 показано изображение автомобильной фары, спроектированной с использованием созданной системы. В данном случае важным также являлась равномерность распределения интенсивности светового потока. Результаты компьютерного моделирования этой фары полностью совпали с измеренным световым потоком реального устройства.

4. Моделирование и визуализация оптически сложных материалов

4.1. Многослойные краски со сложной внутренней микроструктурой

Еще одним направлением, получившим развитие в последние годы, стало моделирование и визуализация новых оптически сложных материалов, таких как многослойные краски со сложной микроструктурой (типа перламутровых и «металлик»). Разработанные программные средства позволяют моделировать и визуализировать краски, состоящие из плоскопараллельных однородных слоев, каждый из которых составлен из прозрачного лака и взвешенных в нем пигментных частиц и интерференционных чешуек (рис. 10) [9].

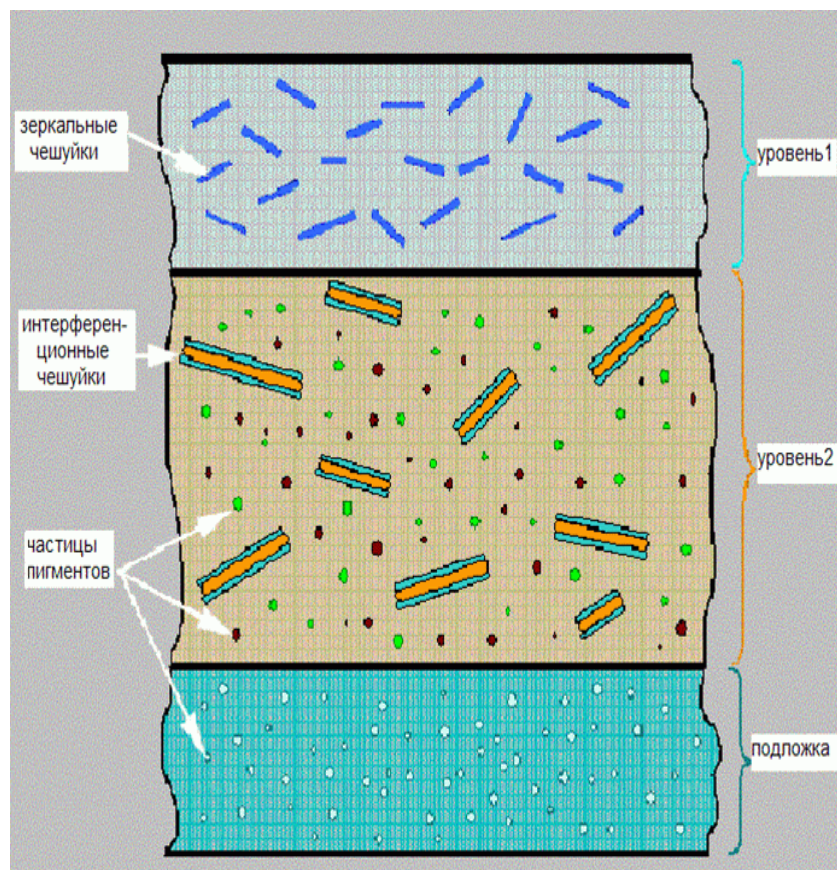


Рис.10. Схема используемой модели краски (поперечное сечение).

Цвет таких красок зависит от угла зрения и направления освещения. Он может резко меняться («переключаться») даже при плавном изменении этих углов. Светорассеивающие свойства таких красок не могут быть заданы скалярными коэффициентами, а требуют более сложного описания с помощью двунаправленных функций отражения (преломления) света (ДФО/ДФП).

На рис. 2 и 11 показаны изображения модели автомобиля, окрашенной краской с ДФО компонентой, при естественном освещении, заданном с помощью БДДИ (п. 2.2). Если нужной краски с ДФО нет в имеющейся библиотеке красок, новая краска может быть составлена путем вариаций компонент существующей краски, таких как глянец, металлический эффект, интенсивность.

Система позволяет на основе модели двухслойной краски решать задачу восстановления состава краски по ее визуальным (оптическим) характеристикам (цвет, структура, размер и качество глянца при заданном освещении, плотность и размер чешуек и др.), и наоборот, по физико-

химической композиции самой краски (тип применяемого металлического порошка, его плотность, ориентация чешуек, свойства наполнителя и пр.) рассчитать оптические параметры краски и ее визуальные характеристики.



Рис.11. Изображение компьютерной модели автомобиля, окрашенной краской с ДФО компонентой, при естественном освещении, задаваемом изображением с большим динамическим диапазоном.

В результате специалист-дизайнер получает возможность проектировать новые композиционно возможные краски в интерактивном режиме, манипулируя исключительно ее визуальными атрибутами и параметрами (которые естественно зависят также от формы поверхности и условий освещения). На выходе системы он получает композиционную информацию о краске, необходимую для ее опытного производства.

И обратно, внешний вид краски при том или ином освещении можно смоделировать, основываясь на известной информации о ее составе. Технолог получает возможность проектировать и визуально контролировать в интерактивном режиме влияние вносимых им изменений в композицию экспериментального образца краски до начала ее реального изготовления.

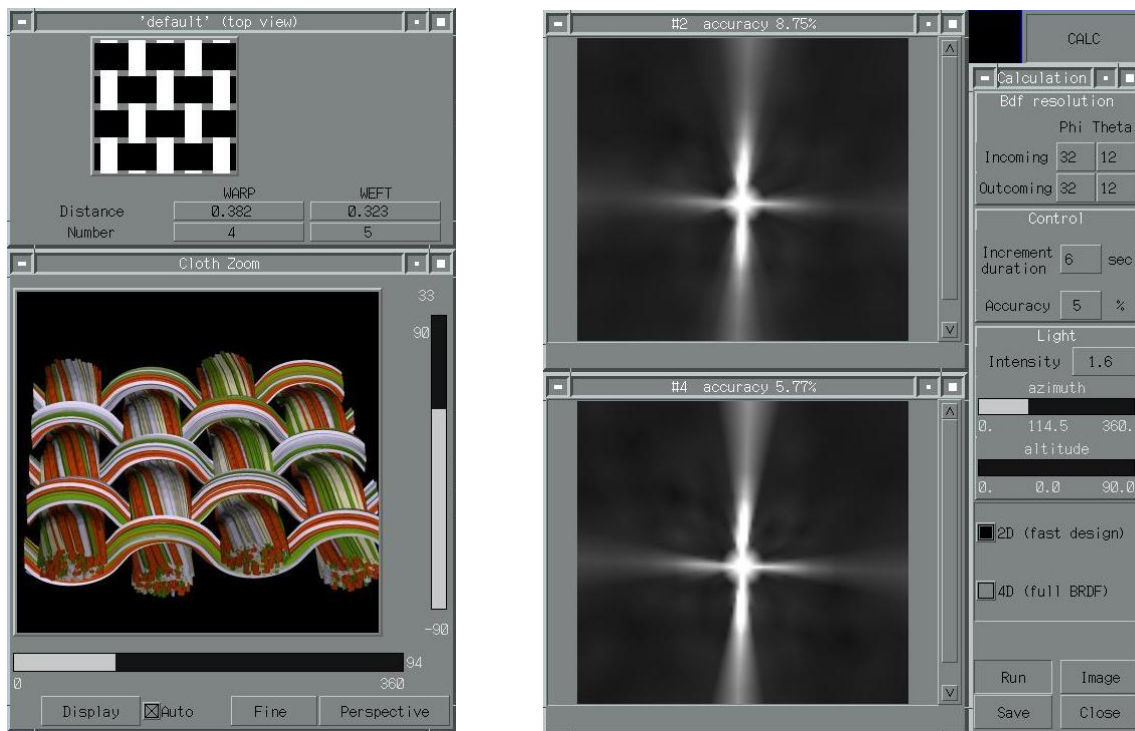
4.2. Моделирование и визуализация тканей

Другим сложным для визуализации и моделирования типом материала являются ткани. Имеющаяся технология расчета распространения света была дополнена методами (прямой) стохастической трассировки лучей. Были созданы средства визуального проектирования некоторых типов тканей, основывающиеся на их физических и структурных параметрах, которые подразделяются на *детерминистические* (тип сплетения ткани, цвет нитей, количество волокон в нити, форма поперечного сечения волокна, оптические свойства волокон и др.) и *стохастические* (распределение волокон вдоль нитей, уровень шероховатости поверхности волокна и пр.) [10]. Эта модель применима для искусственных типов тканей, таких как искусственный шелк и капрон.

В результате моделирования генерируется ДФО ткани, описывающая распределение отражаемого света в зависимости от направления падающего света. Полученная ДФО может быть непосредственно использована для визуализации объектов, покрытых моделируемой тканью. Это позволяет оценить, как будет выглядеть тот или иной материал (ткань) при различных условиях освещения и направлениях наблюдения до того, как он будет произведен. Рис. 12 иллюстрирует процесс моделирования внешнего вида ткани типа искусственного шелка.

Процесс проектирования вязаных тканей является более сложным. Ее уже невозможно представить одной ДФО, потому что вязаная ткань имеет более четко выраженную фактуру. Для правильного представления фактуры ткани необходимо для разных точек ткани задавать разные ДФО, то есть фактически смоделировать некую текстуру, элементами которой являются функции отражения. Ткань представляется в виде огромного числа элементарных ячеек. Ячейка – это прямоугольный элемент ткани, являющийся наименьшим периодом повторяемости ее плетения (рис. 13). Волокна ячеек,

сопоставленных друг с другом, в точности соединяются, то есть набор ячеек составляет визуально непрерывный кусок ткани.



а)

б)

Рис.12. Процесс проектирования внешнего вида ткани: а) моделирование микроструктуры ткани путем переплетения ацетатных волокон в нити и комбинации нитей в заданный тип сплетения; б) иллюстрация итерационного процесса моделирования ДФО ткани типа шелк

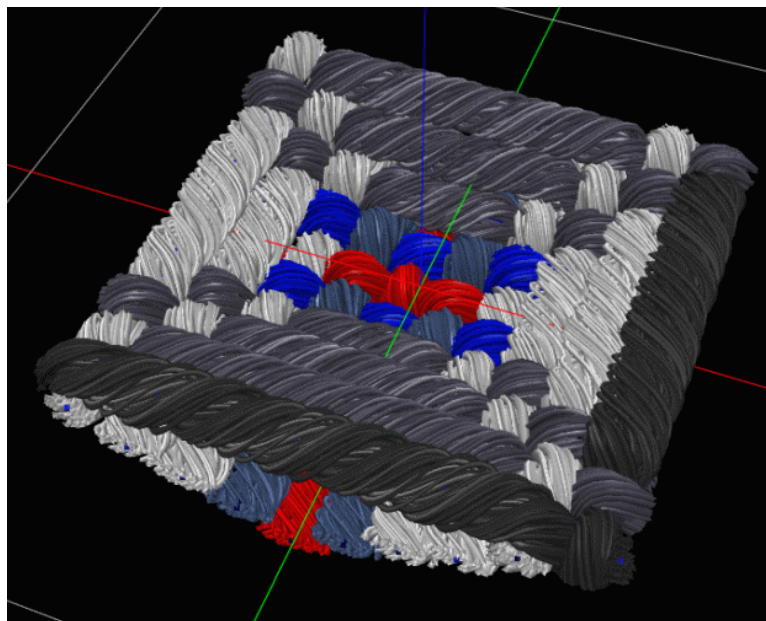


Рис.13. Ячейка вязаной ткани.

Внутри элемента ячейки производится моделирование распространения света. Метод учитывает геометрические искривления волокон внутри ячейки ткани и принимает во внимание как прямое освещение и затенение нитями друг друга, так и переотраженное освещение, приходящее от других волокон этой и соседних ячеек. По результатам моделирования формируется результирующая текстура, представляющая внешний вид ткани.

5. Построение реалистичных изображений сцен, содержащих оптически сложные материалы, в реальном времени

Реальные, практические приложения все чаще требуют от графических систем интерактивных скоростей. Например, в процессе исследования восприятия сложных автомобильных красок, описанных в предыдущем разделе, при естественном освещении пользователь может поворачивать корпус автомобиля, открывать и закрывать двери, капот. При этом, естественно, он хотел бы, чтобы измененное изображение сцены с автомобилем появлялось на экране его компьютера почти мгновенно. В то же время построение физически аккуратных изображений сцен, содержащих оптически сложные материалы, требует интенсивных вычислительных затрат, и при использовании персональных компьютеров это может занять десятки минут и даже часов.

Таким образом, мы имеем ситуацию, когда обычные персональные компьютеры не могут обеспечить интерактивной скорости расчета освещенности. В то же время распространенные графические карты, такие как ATI Radeon или Nvidia, не поддерживают физически аккуратного моделирования освещенности. При этом следует отметить, что другие существующие интерактивные графические системы (браузеры) также не позволяют получать в реальном времени реалистичные изображения сцен, содержащих оптически сложные материалы, а также сцен при естественном освещении.

Поэтому была поставлена и решена задача выделения наиболее важных элементов, определяющих реалистичность изображений, и их реализации в реальном времени с помощью современных графических средств. Ключевыми элементами для восприятия реалистичности изображения являются:

- наличие теней от источников света - наличие тени даже от одного, доминирующего в сцене источника сильно повышают реалистичность рисунка;
- наличие естественного (дневного) освещения;
- зеркальные отражения для зеркал, стекол, глянцевых покрытий и прочих отражающих поверхностей;
- эффекты вторичной освещенности, такие как освещение отраженным светом или каустики преломленного света (т.е. яркие пятна или полосы, образующиеся в результате многократного преломления и отражения света от криволинейных поверхностей прозрачных объектов);
- правильное изображение оптически сложных материалов; например, для корректного изображения автомобильных красок светорассеивающие свойства материала поверхности задаются с помощью (трехмерной) двунаправленной функции отражения.

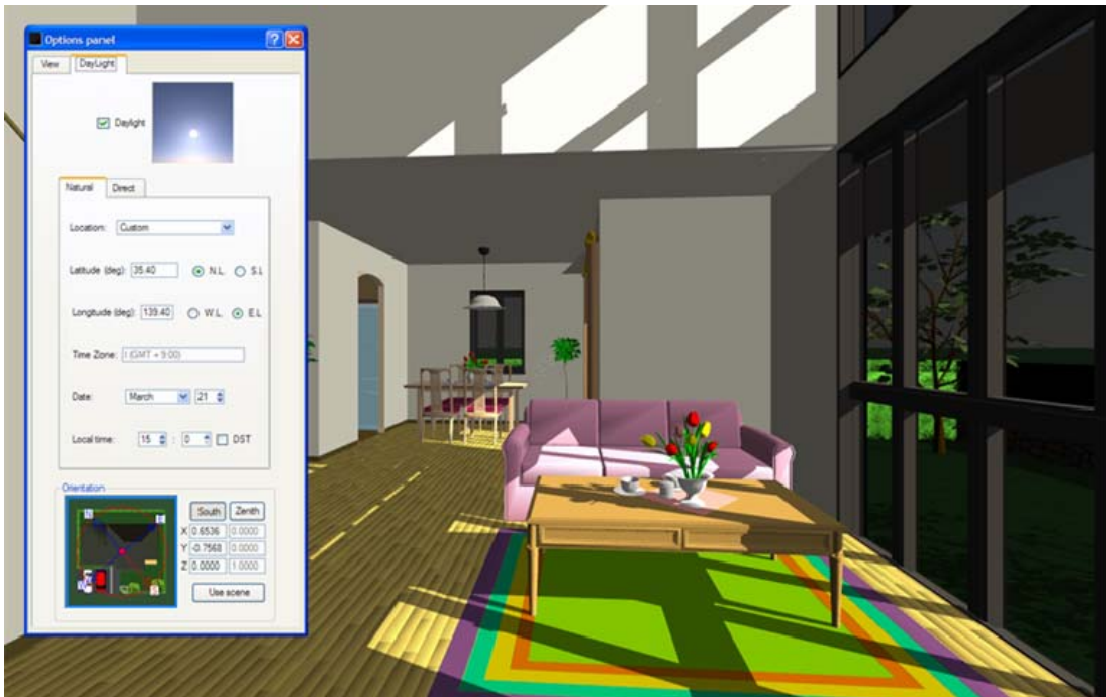
Примеры сцен, визуализируемых на персональном компьютере в интерактивном режиме с использованием разработанной системы [11], показаны на рис. 14.

Визуализации в системе базируется на OPEN GL. Аппаратная поддержка визуализации через OpenGL является экстремально быстрой даже для персональных компьютеров. Для расчета вторичной освещенности было решено использовать метод квази- Монте-Карло [5], применявшийся нами в приложениях, описанных в гл.2. Таким образом, созданная система является компромиссом между высоким качеством изображений, созданных методами физически аккуратного моделирования освещенности, и быстрой генерацией изображений аппаратными средствами графических акселераторов. Отличительной чертой системы является задание свойств материалов и

источников света в физических величинах. Только на последней стадии при выводе изображения они перекодируются в OpenGL координаты.



а)



б)

Рис. 14. Изображения сцен, содержащих оптически сложные материалы (рис. 14-а), а также естественное освещение и правильные тени (рис. 14-б).

6. Заключение

В работе дан краткий обзор ряда работ отдела компьютерной графики ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, связанных с задачами синтеза реалистичных изображений, моделирования сложных оптических устройств и оптически сложных материалов.

Список литературы

[1] Баяковский Ю.М., Галактионов В.А., Михайлова Т.Н. Графор. Графическое расширение фортрана. М.: Наука, 1985.

[2] Базаров С.Б., Баяковский Ю.М., Сейдалиева Ф.Ф., Скачков А.Ю. Адаптация комплекса графических программ ГРАФОР в операционных системах WINDOWS и LINUX. *Препринт ИПМ им.М.В.Келдыша РАН*, № 27, 2002 г.

[3] Khodulev A., Kopylov E. Physically accurate lighting simulation in computer graphics software. Proc. *GraphiCon '96 - The 6-th International conference on Computer Graphics and Visualization*, St.Petersburg, 1996, pp.111-119.

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

[5] Debevec P.E., Malik J. Recovering high dynamic range radiance maps from photographs. *SIGGRAPH 97 Conference Proceedings*, Addison Wesley, pp.369–378.

[6] Барладян Б.Х., Волобой А.Г., Галактионов В.А., Копылов Э.А. Эффективный оператор сжатия динамического диапазона яркостей. "*Программирование*", № 5, 2004, с.35-42.

[7] Барладян Б.Х., Волобой А.Г., Вьюкова Н.И., Галактионов В.А., Дерябин Н.Б. Моделирование освещенности и синтез фотореалистичных

изображений с использованием Интернет технологий. "Программирование", № 5, 2005.

[8] Ershov S., Zhdanov D. Efficient application of Optical Objects in light simulation software. Proc. *GraphiCon'2005 - 15-th International Conference on Computer Graphics and Applications*, Novosibirsk, 2005, pp.284-292.

[9] Ershov S., Khodulev A., Kolchin K. Simulation of sparkles in metallic paints. Proc. *GraphiCon'99 - The 9-th International Conference on Computer Graphics and Vision*, Moscow, 1999, pp.121-128.

[10] Volevich V., Kopylov E., Khodulev A., Karpenko O. An Approach to Cloth Synthesis and Visualization. Proc. *GraphiCon'97 - the 7-th International Conference and Exhibition on Computer Graphics and Visualization*, Moscow, 1997, pp.45-51.

[11] Ignatenko A., Barladian B., Dmitriev K., Ershov S., Galaktionov V., Valiev I., Voloboy A. A Real-Time 3D Rendering System with BRDF Materials and Natural Lighting. Proc. *GraphiCon-2004 -14-th International Conference on Computer Graphics and Vision*, Moscow, 2004, pp.159-162.