

На правах рукописи

Волобой Алексей Геннадьевич

**Программные технологии автоматизации
построения реалистичных изображений**

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

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Москва – 2012

Работа выполнена в Институте прикладной математики
им. М.В. Келдыша РАН (г. Москва)

Научный консультант: доктор физико-математических наук, профессор
Галактионов Владимир Александрович

Официальные оппоненты:

Якобовский Михаил Владимирович
доктор физико-математических наук, профессор,
ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, зав. сектором

Михайлюк Михаил Васильевич
доктор физико-математических наук, профессор
НИИСИ РАН, зав. отделом

Палташев Тимур Турсунович
доктор технических наук, профессор
НИУ ИТМО, зав. кафедрой

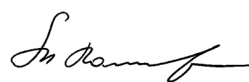
Ведущая организация: Нижегородский государственный университет им.
Н.И. Лобачевского

Защита состоится 09 октября 2012 г. в 11:00 час. на заседании
диссертационного совета Д 002.024.01 на базе Института 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 "21" июня 2012 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор физико-математических наук



Т.А. Полилова

Общая характеристика работы

Компьютерная (машинная) графика изначально зародилась как эффективное и мощное средство связи между человеком и вычислительной машиной. Использование графической формы представления информации, организация диалога между человеком и компьютером с использованием визуальных образов позволили существенно увеличить скорость обработки информации человеком, что привело к повышению эффективности исследований и разработок в самых различных областях науки и техники.

С появлением методов синтеза реалистичных изображений, основанных на физически корректном моделировании распространения света, область применения компьютерной графики существенно расширилась. Созданные алгоритмы и программные средства стали представлять интерес для использования в архитектуре, градостроительстве, проектировании систем освещения, в автомобильной и авиационной промышленности и других областях.

Предварительные расчеты освещения и построение реалистичного изображения виртуальной модели существенно повышают эффективность проектирования зданий, разработки автомобилей, самолетов. С их помощью можно заранее определить и добиться наилучшего воплощения целого ряда факторов, таких как, например, оценка эстетичности разрабатываемых архитектором интерьеров помещений и внешнего вида, насколько проектируемое сооружение «вписывается» в существующий ландшафт. В последние годы важным аспектом строительства любого здания является экономичность (энергосбережение) его системы освещения. Основываясь на точных расчетах освещения помещений дневным светом, архитектор достигает максимального его использования, варьируя положение и ориентацию здания относительно сторон горизонта и окружающих строений, расположение и размеры оконных проемов. При проектировании офисных помещений освещенности рабочих мест должны соответствовать стандартам, в которых указаны не только минимально допустимые величины освещенности, но и такие параметры, как доля прямого света от источника в поле видимости человека («комфортность» освещения).

В автомобильной промышленности задача расчета освещения салона автомобиля является схожей с задачей расчета освещения интерьеров помещений. Дополнительно важным аспектом безопасности является отсутствие бликов и отражений салона в стеклах проектируемого автомобиля. Эта проблема легко решается в процессе проектирования с помощью алгоритмов компьютерной графики. Новым развивающимся направлением стало моделирование и визуализация оптически сложных материалов, таких как многослойные автомобильные краски со сложной микроструктурой (типа перламутровых и «металлик»), ткани (обивка сидений) и др.

Основной особенностью моделирования освещения салона самолета является практически полное отсутствие прямого света. Правильно рассчитать освещение здесь возможно только с использованием алгоритмов глобального освещения. При проектировании кабины пилотов важным критерием является хорошая читаемость приборов и устройств управления при различном освещении.

Следует подчеркнуть, что все вышеперечисленные задачи можно решать, только если моделирование основано на физических законах распространения света и позволяет достичь приемлемой точности. Или, другими словами, если реалистичное изображение, сгенерированное компьютером по виртуальному описанию, будет соответствовать восприятию реальности человеком. На современном этапе, когда разработанные алгоритмы моделирования распространения света являются достаточно устоявшимися и многократно проверенными на их физическую корректность, можно сформулировать следующие основные проблемы построения реалистичных изображений:

1) *Задание правильных исходных данных.* Результат моделирования существенно и непосредственно зависит от корректности задания исходных данных (спецификации виртуальной сцены). В большинстве случаев процесс описания сцены весьма трудоемок, данные получить сложно, а порой и технически невозможно.

2) *Скорость генерации изображения.* Необходимой составляющей повышения производительности труда пользователей является минимизация времени визуализации без существенной потери качества изображения. В идеале изображения должны генерироваться в режиме реального времени.

Цель работы заключается в создании комплекса программных технологий и методов, позволяющих:

- а) автоматизировать процесс задания виртуальной сцены и исходных данных для физически корректного моделирования распространения света и построения реалистичных изображений;
- б) генерировать физически корректные реалистичные изображения в режиме интерактивной навигации.

Их реализация существенно снижает трудоемкость визуализации сложных моделей и проектов и тем самым повышает производительность труда инженеров, проектировщиков, дизайнеров и конструкторов.

Научная новизна работы заключается в следующем.

Разработан эффективный комплексный подход к автоматизации задания виртуальной сцены для генерации реалистичных изображений. Разработаны и реализованы технологии интеграции программного комплекса построения реалистичных изображений с системами автоматизации проектирования.

Предложена концепция определения оптических характеристик материала посредством моделирования распространения света внутри него,

включая моделирование пространственного рассеяния света, моделирование распространения света в волновом приближении для высоких концентраций частиц. Показано, что именно двунаправленная функция отражения света в общем, табличном, представлении является наиболее приемлемой формой для использования результатов моделирования при построении реалистичного изображения. Концепция успешно апробирована на таких материалах, как ткани, многослойные краски, принтерные чернила.

Разработан уникальный программно-аппаратный комплекс, позволяющий непосредственно измерять оптические свойства образцов материалов с высокой точностью для их дальнейшего использования при моделировании освещенности и синтезе реалистичных изображений.

Предложена классификация средств визуализации в зависимости от скорости генерации реалистичных изображений с точки зрения человеко-машинного интерфейса. Представлены решения, позволяющие достичь интерактивной скорости визуализации, а также решения, позволяющие повысить производительность труда проектировщиков в случае длительных вычислений.

Реализованы технологии, позволяющие использовать фотоснимки реального ландшафта в качестве исходных данных для реалистичной визуализации. Фотоснимки в виде карт освещения с большим динамическим диапазоном яркостей используются для комплексного задания как источников света, так и фона, что позволяет автоматически встраивать в изображение ландшафта виртуальные объекты. Разработаны новые алгоритмы модификации карт освещения, компенсирующие некорректное представление солнца.

Практическая значимость работы. На основе концепций, методов и алгоритмов, предложенных в диссертационной работе, был реализован ряд программных продуктов, которые широко используются в нашей стране и за рубежом. Среди них:

- программный комплекс для физически корректного расчета освещенности и построения фотореалистичных изображений сцен, содержащих оптически сложные материалы, при различных условиях искусственного и естественного освещения, а также при освещении, задаваемом изображением с большим диапазоном яркости;

- программно-аппаратный комплекс измерения оптических свойств плоских образцов материалов;

- программные комплексы и системы моделирования оптических свойств сложных автомобильных красок, красящих покрытий с высокой концентрацией пигмента, тканей;

- программный комплекс физически корректной интерактивной визуализации в режиме навигации сцен, содержащих оптически сложные материалы, с учетом предварительно рассчитанных эффектов вторичного освещения; интерактивная визуализация имеет два режима: аппаратный с

использования библиотеки OpenGL и программный с когерентной трассировкой лучей, реализованной с помощью SSE команд;

- эффективное вычислительное ядро для Интернет-сервиса физически корректного моделирования освещенности и построения реалистичных изображений.

Каждый из созданных программных комплексов находится на уровне или превосходит по ряду ключевых показателей имеющиеся в мире аналоги. Благодаря разработанному в диссертации комплексному подходу к автоматизации создания реалистичных изображений процесс задания входных данных существенно упрощается, и программными продуктами могут пользоваться не только высококвалифицированные инженеры и дизайнеры, но также студенты и аспиранты технических ВУЗов.

Проведенные экспериментальные сравнения результатов физически корректных расчетов оптических характеристик, полученных путем моделирования материалов, с результатами измерений аналогичных характеристик на реальных объектах продемонстрировали высокую точность моделирования.

Апробация работы. Основные результаты диссертации были представлены на ряде профильных международных научных конференций [5, 6, 8, 10-13, 20-24, 29-33], а также в рамках Всероссийской научной школы для молодежи «Компьютерное зрение, 3D моделирование и компьютерная графика» (часть ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России»). Результаты диссертации также докладывались на научно-практическом семинаре «Новые информационные технологии в автоматизированных системах» [19], на объединенном научном семинаре направления «Программирование» им. М.Р. Шура-Бура ИПМ им. М.В.Келдыша РАН и семинаре по робототехническим системам ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, МГУ им. М.В. Ломоносова, МГТУ им. Н.Э. Баумана и ИНОТиИ РГГУ.

Публикации. По результатам работы имеется 35 публикаций, включая 17 статей в рецензируемых научных журналах из списка ВАК [1-4, 7, 9, 14-18, 25-28, 34, 35], 18 статей в сборниках докладов на международных научных конференциях и семинарах [5, 6, 8, 10-13, 19-24, 29-33].

Личный вклад. Все основные результаты, изложенные в диссертации, включая постановки задач и их алгоритмические решения, получены автором лично или выполнены под его научным руководством и при непосредственном участии.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и списка используемых аббревиатур. Содержание работы изложено на 248 страницах. Список

литературы включает 177 наименований. В работе содержится 101 рисунок и 7 таблиц.

Содержание работы

Во введении обосновывается актуальность и практическая значимость темы диссертации. Коротко излагаются основы синтеза реалистичных изображений и моделирования освещенности. Показано, что существующие алгоритмы моделирования освещенности и генерации реалистичных изображений являются на сегодняшний день достаточно устоявшимися и проверенными на их физическую корректность. Формулируются основные проблемы построения реалистичных изображений.

В первой главе рассмотрены методы автоматизации задания объектов сцены. Под объектами сцены понимаются геометрические объекты, источники освещения, фоновое изображение.

Важным аспектом реалистичности является задание детальной цифровой модели изображаемых объектов. Задание такой модели, состоящей иногда из нескольких миллионов объектов, требует использования современных программ автоматизированного проектирования. Такие системы моделирования, как Autodesk 3DS Max, CATIA и др., позволяют создать «с нуля» сложные цифровые модели, полностью описывающие, например, здание со всеми помещениями и интерьерами или автомобиль в мельчайших деталях.

Импорт и конвертация геометрии виртуальной сцены из наиболее популярных форматов были поддержаны и в созданном программном комплексе. Был разработан набор конвертеров из форматов DXF, IGES, VRML, STEP и др. Форматы IGES или STEP могут содержать части геометрии в виде сплайнов, что требует применения алгоритмов триангуляции в процессе конвертирования. От качества триангуляции существенно зависит результат моделирования. Наличие в результирующей геометрии Т-вершин, длинных узких треугольников, совпадающих треугольников (наложенных один на другой в одной плоскости) приводит к плохому результату моделирования освещенности. Конкретные реализации форматов представления данных постоянно модифицируются. Вследствие этого необходимо постоянно адаптировать конвертеры к «современным условиям». Такой подход представляется довольно затратный, кроме того невозможно решить проблему «до конца»: новые модификации формата потребуют новых усилий по их поддержке.

Был выбран путь полной интеграции модулей расчета освещенности в САПР системы. В этом случае обе проблемы (триангуляция и поддержка модификаций форматов) решаются за счет средств базовой САПР системы. Однако интегрирование систем физически корректного моделирования распространения света, используемых для построения реалистичных изображений, с современными САПР является трудной задачей.

Основной проблемой, с которой сталкиваются разработчики программ физически корректного моделирования распространения света при интегрировании своих модулей с САПР, является отсутствие в этих системах физически корректных моделей, описывающих взаимодействие света со средой распространения и поверхностью объектов. Также модели источников света в таких системах, как правило, не могут быть непосредственно использованы в системах моделирования распространения света, поскольку не содержат необходимых физических характеристик.

В работе рассматриваются примеры такой интеграции с системами Autodesk 3DS Max и CATIA (Dassault Systems). Интеграция с 3DS Max рассчитана, в основном, на получение изображений фотореалистичного качества. Интеграция с CATIA предполагает получение точных результатов моделирования освещенности.

Источниками света являются объекты сцены, излучающие световую энергию. Параметры светимости и интенсивности источников света задаются в фотометрических единицах. С точки зрения задания исходных данных существенным является разделение источников света на естественные (к ним относятся небесное и солнечное освещение) и искусственные, созданные человеком.

Существуют три основных способа задания естественного освещения. При первом способе задаются географические координаты расположения виртуальной сцены, ее ориентация и время (месяц, число, часы и минуты). Географическое положение многих городов может быть сохранено в библиотеку, что существенно упрощает процесс спецификации. Положение солнца, его яркость, цвет солнца и неба определяются согласно существующим моделям неба, разработанным Международной комиссией по освещению (МКО). Второй способ задания неба требует непосредственного указания направления на солнце, его яркости и цвета, а также ориентации виртуальной сцены. Третий способ задает небесное освещение при помощи гониометрической диаграммы, которая определяет распределение освещенности, поступающей от небесной полусферы по различным направлениям. Она может быть получена в результате измерений.

Для задания искусственных источников света необходимо определить их геометрическое местоположение, яркость или силу света (если источник – точечный), угловое распределение световой энергии. Угловое распределение световой энергии называется гониометрической диаграммой или *гониограммой*. В оптике оно также имеет название индикатриса рассеяния. Наиболее общим является задание гониограммы в табличном виде, когда специфицируются пространственные направления и для них указывается сила света в данном направлении.

Непосредственный подход к спецификации искусственного источника света – спектрофотометрические измерения реальной лампы и построение ее модели в сцене. В работе приведены примеры моделей, построенных на реальных измерениях. Построенные модели ламп организуются в библиотеки готовых источников света. Библиотеки являются расширяемыми.

Существенным шагом к автоматизации задания источников света является импорт существующих распространенных форматов, описывающих гониограммы или даже полностью весь источник. Практически все производители ламп и светодиодов предоставляют гониограммы своей продукции в Интернете. В работе описан импорт из двух форматов, реализованный в системе реалистичной визуализации. Первый формат IES LM-63-1986 (LM-63-1995) содержит гониограммы источника света. Он введен международной организацией IES. Импортированные гониограммы могут быть сохранены в библиотеке.

Другим все более популярным форматом источников освещения становится RaySet. Формат RaySet содержит описание источника света в виде набора лучей, им генерируемых. При достаточно большом количестве лучей такое представление включает всю информацию о геометрической форме, силе света и гониограмме источника, т.е. является универсальным. Дополнительное преимущество состоит в том, что большинство систем оптического моделирования основывается на алгоритме трассировки лучей, т.е. они получают входные данные в готовом виде. Эти два фактора и обусловили большую популярность данного формата.

Однако для технологии Монте-Карло трассировки лучей, используемой в нашей системе оптического моделирования и реалистичной визуализации, этот подход имеет существенный недостаток. Для получения качественного результата нам необходимо большое число лучей в RaySet спецификации. Поскольку Монте-Карло трассировка может продолжаться бесконечно, то мы никогда не можем сказать заранее, какого количества лучей будет достаточно. В то же время представление источника света в формате RaySet требует большого объема памяти. Поэтому был разработан и реализован алгоритм генерации лучей на базе набора из RaySet файла. Каждый луч из RaySet представления преобразовался в пучок неограниченного числа лучей. Луч из набора RaySet выбирается случайным образом, потом стохастически строится его «флуктуация», которая используется в процессе моделирования распространения света в виртуальной сцене. В итоге получается источник света, полностью соответствующий набору RaySet, но неограниченный по числу генерируемых лучей. Количество необходимых лучей в наборе RaySet существенно сокращается, и становится возможным получить качественные изображения, имея десятки и даже единицы тысяч RaySet лучей.

Наиболее перспективной с точки зрения автоматизации спецификации освещения является на данный момент технология задания освещения через изображение, заранее вычисленное или сфотографированное. Обычное изображение с динамическим диапазоном в несколько сотен здесь не может быть применено. Современные исследования и разработки в области компьютерной графики все чаще обращаются к изображению с большим диапазоном яркости (HDRI – High Dynamic Range Image). Это изображение содержит для каждого пиксела реальное физическое значение яркости в формате числа с плавающей точкой, которое позволяет записывать реальные значения яркости света, пришедшего с этого направления в объектив камеры.

В наше время HDRI изображения могут быть получены путем обработки набора фотографий реального мира, сделанных с различными выдержками, или как результат панорамного сканирования окружающей реальной сцены. Возможность запечатлеть реальный мир с помощью панорамных карт окружения, содержащих реальные физические величины яркостей, дала толчок бурному развитию этого направления компьютерной графики. Она позволяет существенно упростить процесс задания окружающей среды и фона для генерации реалистичных изображений. С ее помощью моделируемый объект может быть легко помещен в существующую реальную сцену, запечатленную сканирующим устройством. Такая карта окружения передает реальные значения яркостей источников света, существующих в сцене. Это привело к развитию технологии компьютерной графики, называемой «освещение, задаваемое изображением» (IBL – Image Based Lighting). Панорамные карты окружения, содержащие реальный большой диапазон яркостей, можно назвать картами освещения. При использовании IBL технологии источником света является само изображение с большим динамическим диапазоном. Становится возможным назначать в качестве источников света фотографии неба или выставочного зала и моделировать освещение объекта в этих условиях.

Для того чтобы IBL технологию можно было автоматически использовать в наших программных комплексах, пришлось разработать ряд алгоритмов. В частности, возможность автоматически использовать карты освещения предоставляют алгоритм распознавания и выделения ярких источников света, а также последующая корректировка результата в соответствии со стандартными моделями неба МКО.

Для вычисления освещенности от изображения с большим диапазоном яркости используется метод Монте-Карло обратной трассировки лучей. Однако он эффективно применим, если это изображение задает достаточно равномерное освещение сцены, например, для освещения от облачного неба. В случае же если карта освещения содержит яркий источник света (например, прямо видимое солнце), то вычислительные затраты будут значительными. Эта проблема может быть решена, если выделить яркие источники света из карты освещения. Так как карта освещения задает источник света, расположенный на бесконечно удаленной сфере, то и выделенные яркие источники разумно заменить общепринятыми параллельными источниками света.

Для выделения источников света были введены три коэффициента, регулирующие процесс распознавания областей с большой яркостью и расчета мощности источника. Первый коэффициент используется для определения направления на источник света и задает порог яркости точки карты освещения, определяющий, является ли она источником света. Второй и третий коэффициенты используются для определения всей области с большой яркостью и в конечном итоге для вычисления яркости источника света. Второй коэффициент задает максимальный радиус яркой области. Точки, яркость которых превышают заданный порог, но найденные за

пределами этого радиуса, будут рассматриваться как другие источники света. Третий коэффициент задает минимальную яркость точки, которая будет рассматриваться как составляющая источника света. Таким образом, при выделении источника света используются все точки, лежащие не далее, чем на расстоянии указанного радиуса от наиболее яркой точки, с яркостью выше минимальной яркости. Значения яркостей всех точек карты освещения, использованных при выделении источника света и задании его мощности, обрезаются. В результате для дальнейших расчетов освещенности мы имеем достаточно гладкую функцию освещения, задаваемую обрезанной картой освещения, и набор ярких параллельных источников света. Значения всех трех коэффициентов рассчитываются по эмпирической формуле и зависят от средней яркости сегмента изображения.

Применение алгоритмов расчета освещенности от карт освещения не всегда гарантирует получение реалистичных изображений фотографического качества. Оказалось, что входные данные, т.е. сами карты освещения, не всегда являются физически корректными. Поэтому были проанализированы используемые карты освещения. Наиболее важными характеристиками являются динамический диапазон и правильность представления солнца. Для анализа карт освещения за основу были взяты стандартные модели неба Международной комиссии по освещению. Анализ показал, что наиболее существенным недостатком карт освещения является недооценка яркости солнца. Стало понятно, что на этапе ввода исходных данных в виде карт освещения они должны быть модифицированы таким образом, чтобы скомпенсировать эти недостатки.

Для компенсации недооценки солнца был разработан алгоритм, позволяющий рассчитать яркость параллельного источника, представляющего солнце, исходя из стандартной модели неба МКО. При задании параметров стандартной модели неба пользователь должен задать географическое местоположение, где была снята карта освещения, и дату, когда это было сделано. Время съемки и азимутальное направление вычисляется автоматически. Значения яркости солнца корректируются в соответствии со стандартной моделью неба МКО.



Рис. 1 – Изображение, полученное с применением реконструкции солнца (справа) и без него (слева)

На рис. 1 представлен результат работы алгоритма реконструкции яркости солнца (левое изображение – до реконструкции, правое – после). На

изображении с применением реконструкции солнца освещение автомобиля и тени выглядят правдоподобно.

Фоновое изображение является важным элементом для получения ощущения реалистичности изображения. Задать все окружение вокруг моделируемой сцены со всеми необходимыми деталями в виде объектов сцены практически невозможно. Однако именно детальное, правдоподобное окружение в большинстве случаев создает ощущение реальности. Кроме того, использование в качестве фонового изображения фотографий реального мира позволяет нам говорить о «дополненной» или «расширенной» реальности (augmented reality), когда в изображение реального мира добавляются синтезированные объекты (рис. 2). Это направление компьютерной графики является сейчас популярным.



Рис. 2 – Расширенная реальность: добавлена виртуальная модель автомобиля

Для получения реалистичного изображения недостаточно просто «поставить» фоновое изображение позади сцены. Фон должен отражаться в зеркальных поверхностях, согласовываться с основанием, на котором стоят объекты сцены, и на которое они отбрасывают тень, он должен правильно (с учетом преломления света) быть виден в прозрачных объектах сцены. Поэтому были разработаны как технологии, обеспечивающие простоту задания фона во всех направлениях, так и алгоритмы предварительной обработки фотографий, создающие впечатление «погружения» виртуальной сцены в окружение, запечатленное на ней.

Технология фотомонтажа характеризуется тем, что мы имеем в качестве входных данных одну обыкновенную фотографию. Базируясь на этой информации, мы хотим построить реалистичное изображение нашей сцены, погруженной в сфотографированную реальность (так был создан рис. 2). Полностью автоматически сделать это оказалось невозможно. Однако процесс задания таких сцен был существенно автоматизирован и упрощен. Вычисление положения и ориентации камеры, задание дополнительной плоскости, на которой будут расположены объекты сцены, делается в автоматическом режиме. Для получения теней от объектов сцены была предоставлена возможность оператору указать направление освещения по

теньям на фотографии. Только направление на солнце, как наиболее мощный источник света, дающий резкие тени, можно было восстановить таким образом. Даже этот простой механизм позволил генерировать вполне правдоподобные изображения. Время работы оператора при подготовке сцены сводилось к минимуму и занимало несколько минут.

Использование карт освещения в качестве фонового изображения является автоматизированным методом создания расширенной реальности. Для него был разработан алгоритм частичной коррекции отражений, который позволяет получить приближенные отражения близких объектов панорамы в объектах сцены. Для построения теней от объектов сцены, помещенных в окружение, задаваемое картой освещения, используется воображаемая плоскость. Тени от объектов сцены на воображаемой плоскости вычисляются с помощью метода Монте-Карло обратной трассировки лучей. Важным фактором реалистичности сгенерированного изображения является согласованность изображений фона, полученного в результате фотографирования, и смоделированных объектов сцены. Это требует высокого разрешения фонового изображения. Проблема разрешения изображения с большим динамическим диапазоном, недостаточного для качественного фона, может быть решена с помощью использования дополнительного изображения. Эта технология требует простого пользовательского интерфейса для совмещения изображений карты освещения и фотографии. Вместе с автоматизацией задания освещения сцены, описанной ранее, этот метод значительно упрощает создание изображений расширенной реальности. Фактически пользователь указывает, в какую карту освещения надо поместить виртуальную сцену, и после вычислений получает итоговое изображение.

Вторая глава посвящена проблеме задания оптических свойств объектов и материалов сцены. Оптические свойства геометрии сцены необходимы для расчета взаимодействия света с объектами при моделировании освещенности. Особенностью этого класса входных данных являются высокие требования к точности задаваемых значений. Поскольку при моделировании реальных сцен часто происходит многократное отражение света, то даже небольшая ошибка в задании оптических свойств материалов может привести к существенной ошибке результата, так как ошибка накапливается.

Наиболее общий способ описания отражающих (светорассеивающих) свойств поверхности – задание *двунаправленных функций отражения/пропускания* (ДФО/ДФП). ДФО – это функция, представляющая собой отношение яркости описываемого объекта в заданном направлении наблюдения w_{out} к его освещенности с направления w_{in} . По определению ДФО есть функция четырех переменных: двух координат, определяющих направление падения света $(\theta_{in}, \varphi_{in})$, и двух координат, определяющих направление рассеяния света $(\theta_{out}, \varphi_{out})$. В нашем программном комплексе используются ДФО, основанные на физических данных. Они могут быть измерены или смоделированы. Поэтому используется табличное

представление ДФО. Сетка входных и выходных направлений ДФО может иметь различную размерность в зависимости от требований к быстродействию и точности представления.

Получить корректную двунаправленную функцию отражения и пропускания поверхности можно непосредственным измерением образца материала. В самом общем виде схема измерений проста: на образец поверхности под разными углами направляют луч света и проводят измерение отраженного света для различных углов наблюдения. Этот процесс повторяют для разных длин волн. Проблема здесь заключается в том, что в силу многомерного характера ДФО количество измерений, которые необходимо провести, измеряется десятками и сотнями тысяч. Поэтому при разработке реальных измерительных установок стремятся тем или иным образом оптимизировать этот процесс, в частности, распараллелить его, чтобы получать за одно измерение значения ДФО одновременно для некоторого множества значений входных параметров.

При разработке измерительного комплекса важно было учесть специфику ДФО/ДФП, используемых в компьютерной графике. Часто для поверхностей характерны высокий градиент функции в направлении зеркального отражения (для ДФО) и пропускания (для ДФП). Поэтому конструкция прибора и методика измерений должны обеспечивать высокое угловое разрешение координатной сетки в указанных областях. Сокращение времени измерений было достигнуто с помощью формирования одного изображения, содержащего все отраженные направления, и его последующей цифровой обработки. Изображения фиксируются с помощью цифровой фотокамеры. Таким образом, предлагаемое решение находится на стыке трех научных направлений – оптических измерений, компьютерной графики и обработки изображений.

ДФО определяется как отношение энергии света, отраженного в некотором направлении, к энергии падающего света, поэтому необходимо измерять обе эти величины. Для измерения энергии падающего света некоторая фиксированная ее часть (около 8%) ответвляется при помощи стеклянной пластины в опорный канал и измеряется каждый раз напрямую. Свет от лампы, пройдя через монохроматор, отражается от одного из зеркал и падает на образец через входное отверстие, расположенное на «экваторе» полусферы. В центре полусферы помещается образец. Входные концы световодов вмонтированы в отверстия, высверленные в полусфере (рис. 3). Линза собирает свет, рассеиваемый образцом в направлении зеркального отражения, и фокусирует его на круглой пластине из матированного стекла, которая находится в центре прямоугольного экрана. На том же экране смонтированы выходные торцы световодов, идущих от полусферы, а также выходной торец световода опорного канала. ПЗС камера формирует изображение этого экрана.

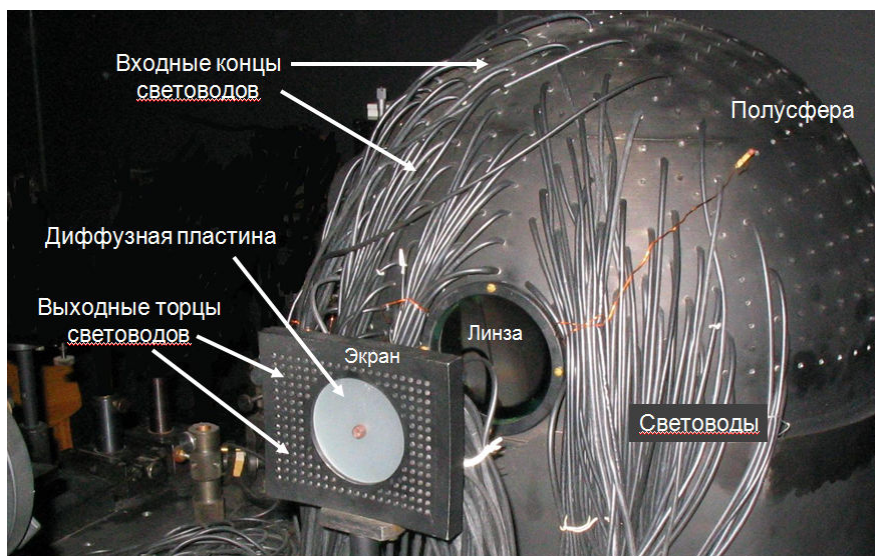


Рис. 3 – Экран с выходами световодов и диффузной пластиной

Комплекс регистрирует одновременно все предусмотренные конструкцией компоненты ДФО или ДФП для заданной длины волны и при установленном значении угла падения света. Для фиксированного угла падения производится сканирование всей спектральной области измерений при помощи управляемого компьютером монохроматора. Указанные действия составляют основу измерительного цикла для заданного угла падения и проводятся автоматически. Действия, обеспечивающие изменение угла падения (изменение положений зеркал, поворот образца), производятся вручную. При измерении ДФО для типичного образца с автомобильной краской время, затрачиваемое на ручные действия, составляет примерно 70 минут. В то же время измерение данных только для одного угла падения (а всего их 5) для всех длин волн с подбором выдержки может занимать больше часа. И эта часть измерений делается в автоматическом режиме.

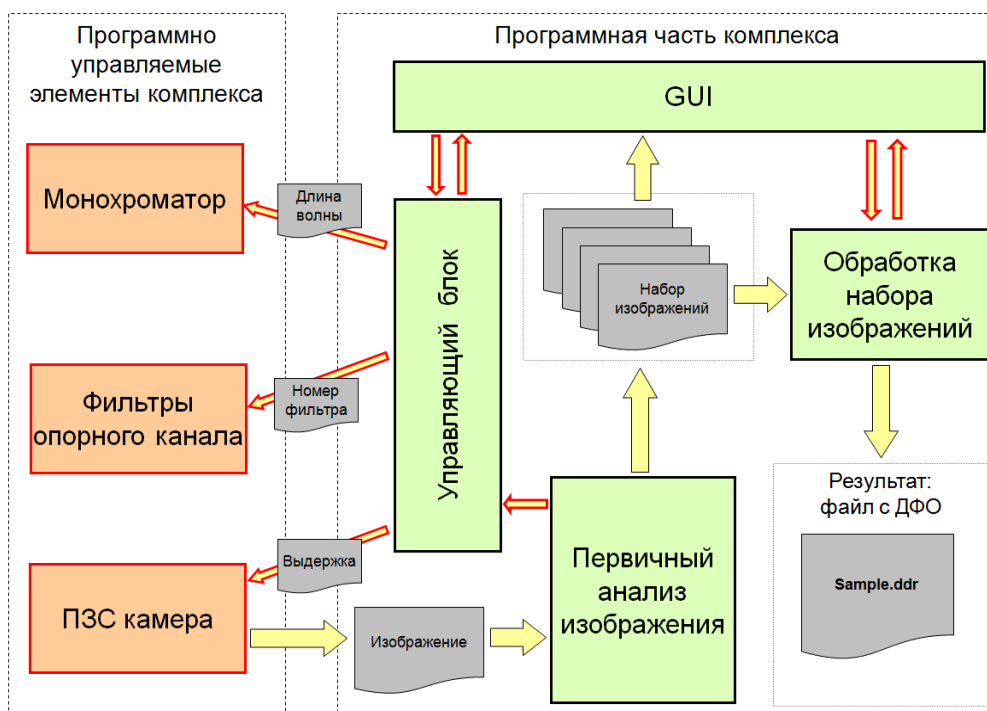


Рис. 4 – Схема программной части измерительного комплекса

Три блока измерительного комплекса являются программно управляемыми: монохроматор, ПЗС камера и фильтры опорного канала. На рис. 4 приведена схема программной части измерительного комплекса, также показаны программно управляемые блоки и передаваемые им данные. Сформированное при помощи ПЗС камеры изображение поступает в управляющий компьютер, который после первичного анализа принимает решение либо принять изображение для обработки, либо повторить его съемку с измененной выдержкой. Для того чтобы на изображении с новой выдержкой опорный канал не выглядел засвеченным или слишком темным, устанавливается фильтр опорного канала, соответствующий новой выдержке. В результате обработки всех изображений для разных длин волн получается ДФО (или ДФП) в спектральном представлении.

Разработанный измерительный комплекс сравнивался с существующими измерительными приборами как академическими, так и коммерческими. Сравнения проводились для результатов измерений одного и того же набора образцов. Были сделаны сравнения с установками Краковского тех. университета, Murakami GCMS-4 и установками компаний X-Rite и Radiant Imaging. В результате сравнений можно сказать, что разработанный комплекс является практически уникальным. По точности результатов измерения ДФО его можно сравнить только с установкой Murakami. Остальные измерительные комплексы либо проигрывают существенно в точности, либо не измеряют ДФО целиком.

Одним из примеров практического использования, подтверждающего высокую точность проводимых измерений, может служить проект концерна Airbus по моделированию салона самолета A320. В построенном реальном макете были замерены физические значения освещенности и сделаны фотографии. Образцы всех используемых материалов были измерены на описанном измерительном комплексе. Визуальное сравнение фотографии реального макета и реалистичного изображения, сгенерированного с помощью нашей системы, представлено на рис. 5. Несмотря на некоторое расхождение, в целом картина распределения освещенности была рассчитана верно, в большинстве измеренных точек значения практически совпали.

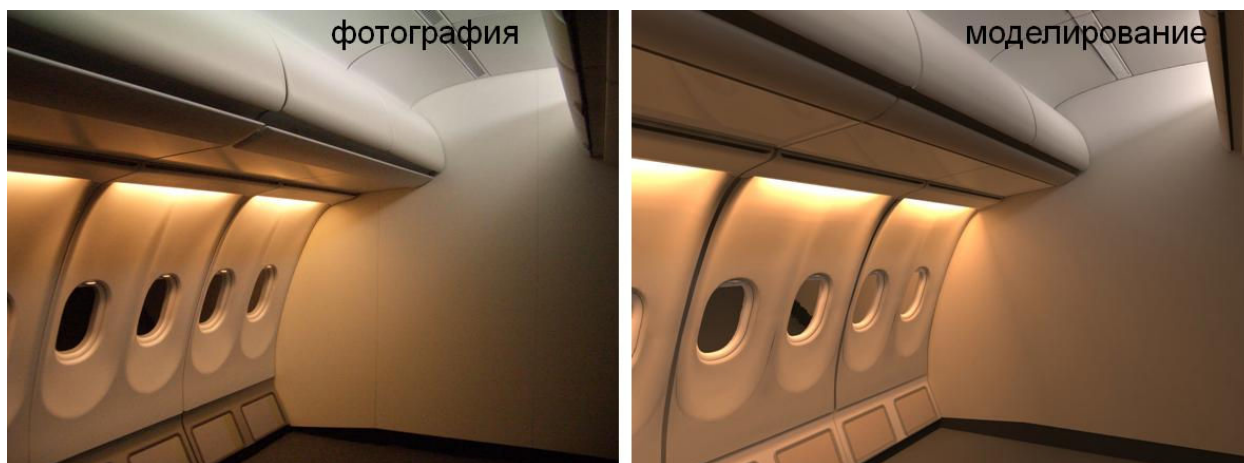


Рис. 5 – Визуальное сравнение реального макета (слева) и сгенерированного реалистичного изображения (справа)

В программном комплексе реалистичной визуализации Inspire2 измеренные данные организуются в библиотеку оптических свойств поверхностей. Создана большая и по-своему уникальная библиотека измеренных данных.

Однако не всегда возможно измерить образцы материалов. В одних случаях образцы недоступны, в других же необходимые материалы находятся в процессе разработки, т.е. просто еще не существуют. По этой причине были разработаны алгоритмы для моделирования оптических свойств материалов, в частности, моделирование оптических свойств ткани. Ткани и другие текстильные материалы широко используются в повседневной жизни и, соответственно, в программных приложениях компьютерной графики часто бывает необходимо задавать их оптические свойства. Одним из ярких примеров может служить расчет освещения салона самолета: в салоне тканевыми материалами покрыто большое количество поверхностей, и без данных об их отражающих свойствах точный расчет освещенности практически невозможен. Для использования смоделированных сложных оптических свойств ткани в программах реалистичной визуализации будем использовать их задание в виде двунаправленной функции отражения (ДФО).

Из литературы по текстильному материаловедению известно, что поверхность натуральных и синтетических нитей шероховатая. Для многих текстильных волокон производились измерения и известны их усредненные показатели преломления (в среднем – 1.5). Известно, что среда текстильных волокон является оптически неоднородной. Например, хлопковые волокна, состоящие из целлюлозы, содержат в себе до 12% воска и минеральных образований. Также в волокнах и нитях могут присутствовать воздушные включения, частички пыли и загрязнения разного рода. Наличие оптических неоднородностей в среде нитей приводит к рассеянию в ней света.

В соответствии с уравнениями Френеля до 95% света (в случае нормального падения на поверхность) пройдет внутрь объекта. Часть преломленного света в результате множественного рассеяния на оптических неоднородностях выйдет обратно на его поверхность. Поэтому была разработана модель взаимодействия ткани со светом, учитывающая рассеяние света внутри нитей. Поведение света внутри объема нити моделировалось с помощью метода Монте-Карло трассировки лучей. Сначала рассчитывалась ДФО нитей, а потом на их основе ДФО ткани.

Вклад в оптические свойства ткани дает отражение света от поверхностей нитей и рассеяние света их объемом. Поэтому предлагается разделить ДФО нити на две компоненты – поверхностную и объемную:

$$ДФО(w_{in}, w_{out}) = ДФО_{нов}(w_{in}, w_{out}) + ДФО_{об}(w_{in}, w_{out}),$$

Поверхностную компоненту ДФО нити предлагается вычислять в соответствии с классическим методом расчета поверхностных оптических свойств объектов, предложенным Куком и Торрансом. Данный подход был выбран потому, что (1) реализует физически корректную модель

взаимодействия света и шероховатой поверхности; (2) учитывает показатель преломления объекта; (3) обладает небольшой вычислительной сложностью.

Для определения объемной компоненты ДФО предлагается собственный метод. Будем считать, что объем нити заполнен основной средой с показателем преломления равным усредненному показателю преломления хлопковых волокон ($n = 1.557$) и в ней распределены сферические рассеивающие частицы, обладающие показателем преломления, отличным от основного. С помощью теории Ми можно рассчитать параметры, определяющие рассеяние света в оптически неоднородной среде, а именно фазовую функцию рассеивающих частиц, их сечения рассеяния, поглощения и экстинкции. Эти значения далее можно использовать при Монте-Карло трассировке лучей в среде объема нити. Геометрически нить в работе представлялась в виде цилиндра.

Для расчета объемной компоненты ДФО предлагается рассчитать функцию объемного рассеяния (ФОР), потом вычислить объемную компоненту ДФО путем интегрирования ФОР по поверхности нити, представленной цилиндром. Пусть на поверхность dA падает свет с направления dw_{in} . Тогда ФОР определена как:

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

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 нити. Для расчета ФОР предлагается проводить Монте-Карло трассировку лучей в объеме нити следующим образом. Для небольшого участка поверхности нити в направлении объема нити с полусферы входных направлений падения света 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. По окончании моделирования распространения света в объеме нити ФОР нити вычисляется следующим образом:

$$\Phi OP(dw_{in}, dA, dw_{out}, dB) = \frac{F_{out}}{dw_{out} \cdot dB \cdot \cos(\theta_{out}) \cdot F_{in}},$$

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

Вычисленная ФОР нити является свойством нити. Необходимо отметить ее важное свойство, которое позволяет рассчитать ДФО предложенным в работе способом. Поскольку нить является круговым цилиндром, то если освещаемый элемент сетки на поверхности нити «сдвигается» вдоль нити и/или «поворачивается» вокруг ее центра, то вся ФОР также «сдвигается» и/или «поворачивается».

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

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

После получения ДФО нити ДФО ткани в целом можно рассчитать двумя способами. Первый – ДФО ткани представляет собой усредненное значение ДФО образующих ее нитей, второй – расчет ДФО ткани методом Монте-Карло трассировки лучей.

Для целей проверки корректности разработанного подхода были произведены измерения ДФО реального образца ткани из красного хлопка на установке, описанной выше. Далее необходимо было получить на основе рассчитанных данных параметры, аналогичные измеренному коэффициенту яркости реальной ткани. Для этого производились следующие вычисления:

- 1) В сцене с моделью ткани устанавливался источник параллельного белого света с выбранным направлением освещения.
- 2) Для каждого из выбранных направлений наблюдений устанавливалась камера и производилась визуализация ткани.
- 3) Значения пикселей, принадлежащих ткани, суммировались.
- 4) Каждая величина R, G, B нормировалась следующим образом. Ее значение для модели ткани при нормальном падении и отражении света приравнивалось к соответствующему измеренному значению коэффициента яркости. Рассчитывался коэффициент соответствия, на который были умножены все остальные значения R, G, B.

В итоге стало возможным провести сравнение рассчитанных и измеренных данных. На рис. 6 приведены графики рассеяния света моделью ткани (красная сплошная кривая) и реальным образцом (синяя пунктирная кривая) в плоскости падения света. На всех графиках по оси абсцисс отложены направления отражения света в пределах от -60 до 70 градусов.

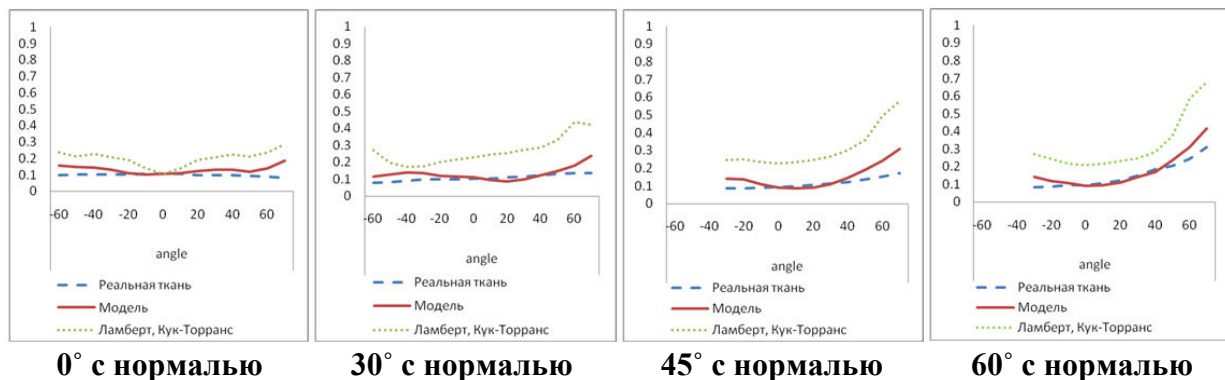


Рис. 6 – Рассеяние света классической моделью, разработанной моделью и реальной тканью при различных направлениях падения света

Из графиков видно, что рассеяние света моделью и реальной тканью имеет качественное соответствие, а также что реализованный подход улучшает соответствие картин рассеяния света моделью и реальной тканью по сравнению с классическим подходом (зеленая кривая из точек).

Кроме качественного совпадения графиков рассеяния света удалось добиться определенного соответствия в части моделирования цвета ткани при

разных условиях освещения. Было проведено сравнение компонент цвета в системе HSV для рассчитанных и измеренных данных (таблица 1).

Таблица 1. Компоненты цвета в системе HSV для измеренных и рассчитанных данных

	H (оттенок) от 0 до 1	S (насыщенность) от 0 до 1	V (яркость) от 0 до 1
Реальная ткань	0.98	0.99	0.8
Рассчитанные данные	0.97-0.99	0.99	0.8

Разработанное решение дает приемлемые результаты при визуализации цвета ткани при различных условиях освещения.

В третьей главе рассматриваются методы получения оптических характеристик поверхностей, покрытых многослойными автомобильными красками или принтерными чернилами. В случае когда присутствует покрытие материала краской или слоем лака с взвешенными частицами, необходимо моделировать взаимодействие света с покрывающим слоем.

Достаточно распространенными покрытиями являются современные краски с металлическими и перламутровыми эффектами, чей внешний вид изменяется в зависимости от условий освещения и наблюдения. Они применяются, в частности, для окраски автомобилей. Именно внешний вид изделия часто определяет его коммерческий успех. Используя средства компьютерной графики, можно понять, как будет выглядеть изделие уже на начальных стадиях создания его модели. Чтобы разработка таких красок была эффективной, моделирование внешнего вида должно выполняться с интерактивной скоростью.

Для моделирования цвета требуется вычислить распределение отраженного света (ДФО), аккуратно учитывающее многократное рассеяние света в объеме краски. В предлагаемом методе модель краски состоит из плоскопараллельных однородных слоев, каждый из которых составлен из прозрачного лака и взвешенных в нем пигментных красящих частиц и интерференционных чешуек. Каждый слой краски расщепляется на множество тонких субслоев таким образом, чтобы внутри каждого субслоя можно было бы пренебречь многократным рассеянием. Это позволяет описывать рассеяние в тонких субслоях в аналитическом виде. Рассеяние света каждым слоем краски вычисляется с помощью распределения рассеяния тонкими субслоями методом удвоения.

Для расчета светоотражающей характеристики краски необходимо промоделировать движение света сквозь заданные слои ее структуры до отражения от подложки и обратно. Рассеяние света всей краской вычисляется с помощью рассеяния на каждом слое методом сложения. Такой подход делает возможным аккуратный учет многократного рассеяния в сложных средах. Он позволяет сформулировать в аналитическом виде весьма точное приближение для ДФО красок с перламутровым эффектом. Методы сложения и удвоения применяются к уравнению переноса излучения, преобразованного к форме, удобной для таких задач. В предложенном же подходе для решения интегрального уравнения переноса применяется прямой сеточный метод.

Данная аналитическая модель была специально разработана для описания рассеяния света на ансамблях гладких металлических или перламутровых пластинок. Она весьма точна, когда пластинки расположены внутри почти прозрачного вещества с низкой концентрацией пигментов. Последнее условие выполняется в случае реальных красок.

Была реализована также «полная» модель вычисления ДФО. Она основана на Монте-Карло трассировке лучей в прозрачной среде лака. При пересечении луча с пигментом или с чешуйкой дальнейшее направление выбирается в соответствии с фазовой функцией данной частицы. Это дает возможность рассчитать ДФО краски более точным методом.

Модель краски является важной составляющей разработанного интерактивного программного комплекса моделирования внешнего вида красок, исходя из их состава. Структура комплекса представлена на рис. 7.

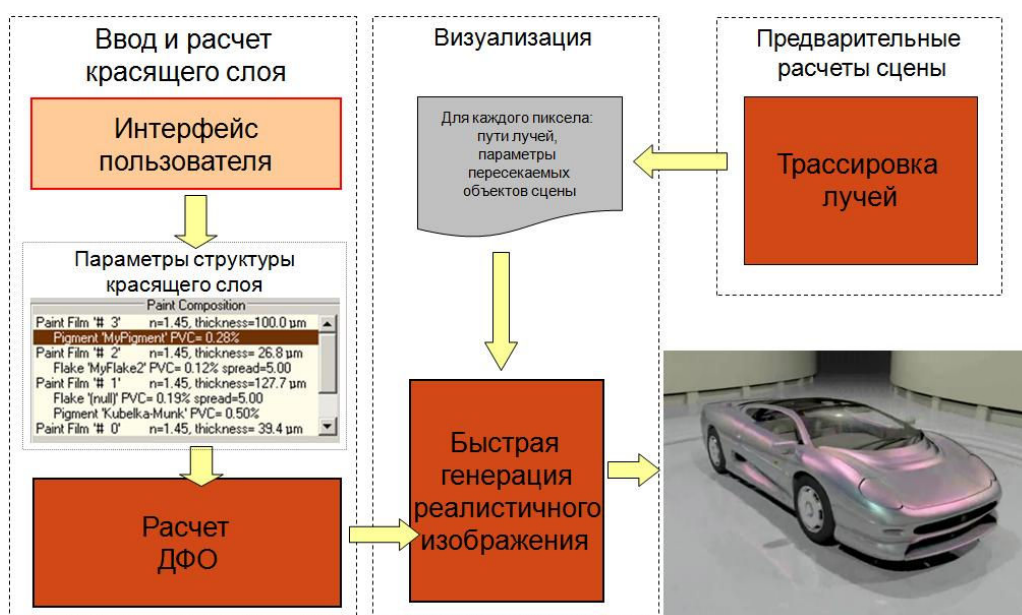


Рис. 7 – Схема программного комплекса интерактивного моделирования многослойной краски

Интерфейсная часть программного комплекса позволяет полностью задать структуру моделируемой краски. Параметры могут быть изменены в интерактивном режиме в технологически допустимых пределах. Используя эти параметры и структуру краски, вычисляется ДФО для описанной многослойной модели. Полученная ДФО поступает в модуль быстрой визуализации виртуальных сцен, содержащих объекты, окрашенные разрабатываемой краской. Так как трассировка лучей требует значительного времени, то основная идея интерактивной визуализации состоит в использовании заранее протрассированных лучей вместе с необходимыми вспомогательными данными. Количество трассируемых лучей в рассматриваемых задачах может достигать миллионов или даже миллиардов в зависимости от сложности сцены, размерности изображения. Поэтому карты трассируемых лучей сохраняются на диске в процессе предварительного расчета. На этапе интерактивной визуализации карты

трассируемых лучей загружаются по мере необходимости, оптические свойства поверхностей, окрашенных краской, заменяются на рассчитанную ДФО, и формируется итоговое реалистичное изображение. Время визуализации не зависит от сложности геометрии сцены. Например, время, необходимое для вычисления ДФО двухслойной краски с перламутровым эффектом и визуализации изображения с разрешением 640 x 480 пикселей, – всего около 0.14 секунды. В итоге предлагаемый программный комплекс также является пригодным для интерактивной разработки новых красок.

Задача автоматического подбора состава краски по внешнему виду существующей краски является одной из востребованных в автомобильной промышленности. Современные краски имеют достаточно сложный внутренний состав; ингредиенты краски, процесс ее создания часто являются закрытой информацией. Для проверки возможностей программного комплекса моделирования красок решать задачу подбора компанией Merck были предоставлены 4 образца реальных красок. ДФО этих образцов были измерены на измерительном комплексе, описанном выше. После этого была предпринята попытка воссоздать состав этих красок в предположении, что реальная краска состоит из одного слоя. Удалось получить достаточно близкий цвет восстановленной краски (рис. 8), однако во всех случаях полное совпадение достигнуто не было. Данный эксперимент можно рассматривать как первый шаг к решению задачи автоматического подбора состава краски. На рисунке 8 левая сторона каждой сферы окрашена измеренной ДФО реального образца, а правая сторона – ДФО, рассчитанной с помощью программного комплекса моделирования краски.

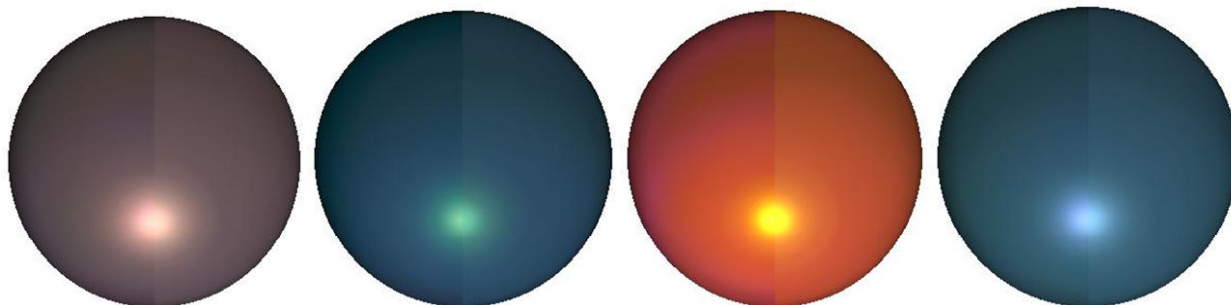


Рис. 8 – Визуализация измеренной (левая половина сферы) и рассчитанной (правая половина) ДФО перламутровых красок

Полученные в результате моделирования ДФО красок могут быть использованы для физически корректных расчетов освещенности в трехмерных сценах, содержащих окрашенные объекты.

Результаты моделирования красок оказались весьма успешными и позволили перейти к более сложной задаче моделирования и визуализации покрытий с высокой концентрацией пигментных частиц, например, при разработке новейших типов принтерных чернил для фирмы Seiko Epson. С точки зрения компьютерной графики задача визуализации принтерных чернил выглядит похожей на предыдущую. Нам нужно также сформировать двунаправленную функцию отражения (ДФО) поверхности для окрашенного слоя, состоящего из прозрачной среды (лака) и красящих пигментных частиц.

Но малые размеры частиц и их высокая концентрация полностью меняют вычислительные методы, применимые для данного случая. Вычислительная сложность связана не только с необходимостью использовать методы решения волновых уравнений для моделирования всего слоя, но и с последующим формированием ДФО (функции, определенной для «дальних» расстояний) из полученного волнового решения. В литературе по компьютерной графике работ, посвященных моделированию покрытий с высокой концентрацией частиц, найти не удалось. Задача требует больших вычислительных ресурсов, и интерактивная скорость пока невозможна.

В задаче надо визуализировать слой принтерных чернил, используемых при печати фотографий, нанесенный на бумагу. Красящий слой состоит из малых частиц пигмента с размерами $\sim 100\div 500$ нанометров при объемной концентрации пигмента, достигающей до 50%. Малые размеры частиц, высокая концентрация и малая толщина слоя (~ 1 микрона) не позволяют применять уравнение переноса излучения, как в случае с многослойными красками. Поэтому был разработан программный комплекс, в котором непосредственно решаются волновые уравнения, естественно, при некоторых ограничениях и упрощениях.

Основное упрощение касается самого использованного волнового уравнения, в качестве которого было выбрано так называемое скалярное приближение, уравнение Гельмгольца, так как оно требует значительно меньше компьютерных ресурсов. Скалярное приближение широко применяется в оптике при расчетах распространения неполяризованного излучения. В случае стохастических сред сильное и в значительной степени изотропное рассеяние приводит к деполяризации излучения. В этом случае применение скалярного приближения вполне оправдано.

Также для начальных расчетов использовалась упрощенная модель, в которой слой чернил располагается над бумагой и не имеет с ней оптического контакта (рис. 9). Это означает, что модель пренебрегает процессом диффузии чернил внутрь бумаги.

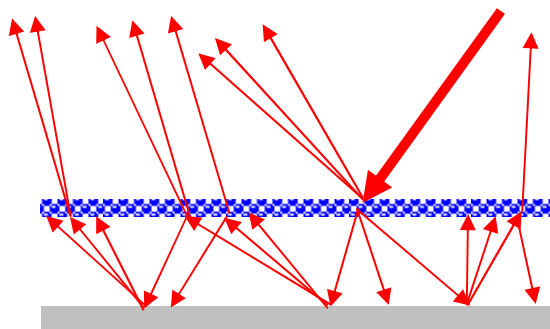


Рис. 9 – Красящий слой (синий), расположенный на бумаге, и переотражения света между слоем и подложкой. Для наглядности расстояние между слоем и подложкой преувеличено. Первичное освещение показано жирной стрелкой.

Рассеяние вычислялось для бесконечного плоского красящего слоя, составленного из одного элементарного фрагмента размерами $\sim 10 \times 10$ микрон, а затем периодически повторенного в двух измерениях.

Использование периодических структур – это прием, достаточно часто применяемый в оптических расчетах. В таком случае угловые распределения рассеянного света в дальней зоне содержат конечное дискретное число направлений. Чтобы получить гладкие угловые распределения, т.е. ДФО, необходимо произвести расчеты для различных (случайных, но подчиняющихся одной и той же статистике) реализаций элементарного фрагмента, а затем усреднить результаты по ансамблю таких реализаций. В данном случае расчеты проводятся для монохроматического освещения. Поскольку излучение с разными длинами волн взаимно некогерентно, то построение спектральных ДФО никаких трудностей не вызывает.

Экспериментальное измерение реальной геометрии слоя практически невыполнимо. Поэтому возникает необходимость генерации такой геометрии с помощью численной процедуры. Были проанализированы многочисленные изображения слоя с различных микроскопов. На базе этого анализа была создана модель структуры реальных красящих слоев, состоящих из прозрачного связующего вещества, наполненного зернами пигмента различной формы. Предложенный алгоритм генерации геометрии можно описать следующим образом. Сначала в расчетной области случайно разбрасывается необходимое число частиц, которые могут пересекаться между собой. Затем между частицами вводится упругое взаимодействие, которое приводит к возникновению сил между пересекающимися частицами или при пересечении частицей границы области. Под действием сил частицы могут перемещаться (и вращаться), и таким образом пересечения между ними и с границами устраняются. После того как геометрия красящего слоя получена, вычисление распределения коэффициента преломления на пространственной сетке (исходные данные для задачи дифракции) не вызывает никаких затруднений.

Для решения задачи дифракции необходимо проинтегрировать уравнение Гельмгольца во всей области, включая красящий слой и воздух по обе стороны от него. Пространство разделяется на три части: воздух выше красящего слоя, сам слой и воздух ниже слоя. В полупространствах, заполненных воздухом, показатель преломления постоянен, а уравнение имеет хорошо известные аналитические решения. Для поля внутри красящего слоя аналитическое решение не существует, поэтому решение находится с помощью численной процедуры.

Для получения итогового ДФО бумаги с нанесенными чернилами необходимо протрассировать сцену, показанную на рис. 9, и проанализировать отраженный свет на бесконечном удалении. При рассеянии луча на красящем слое используется результат решения дифракционной задачи. С достаточной точностью бумагу можно моделировать как плоскую поверхность, обладающую Ламбертовским отражением с интегральным коэффициентом отражения, близким к 1. Для расчета сцены используется Монте-Карло трассировка лучей. В итоге нам не нужна гладкая функция рассеяния красящего слоя, а достаточно использовать волновое решение в

полученном виде, т.е. набор рассеянных волн – направлений рассеянной энергии.

В разработанный программный комплекс входит интерфейсная программа, посредством которой пользователь может задать параметры красящего слоя, вычислительные параметры, характеристики подложки, условия освещения и визуализировать структуру красящего слоя в увеличенном масштабе для проверки его задания. Интерфейсная программа сделана на базе браузера трехмерных сцен Inspire2, поэтому можно также перемещаться по структуре красящего слоя. Интерфейсная программа вместе с генератором геометрии составляют блок ввода данных и параметров вычисления. Отдельными блоками являются также модуль волновых вычислений и модуль вычисления ДФО красящего слоя на подложке. Так как объем данных, передаваемых между блоками, является большим, они передаются через промежуточные файлы. Структура программного комплекса представлена на рис. 10.

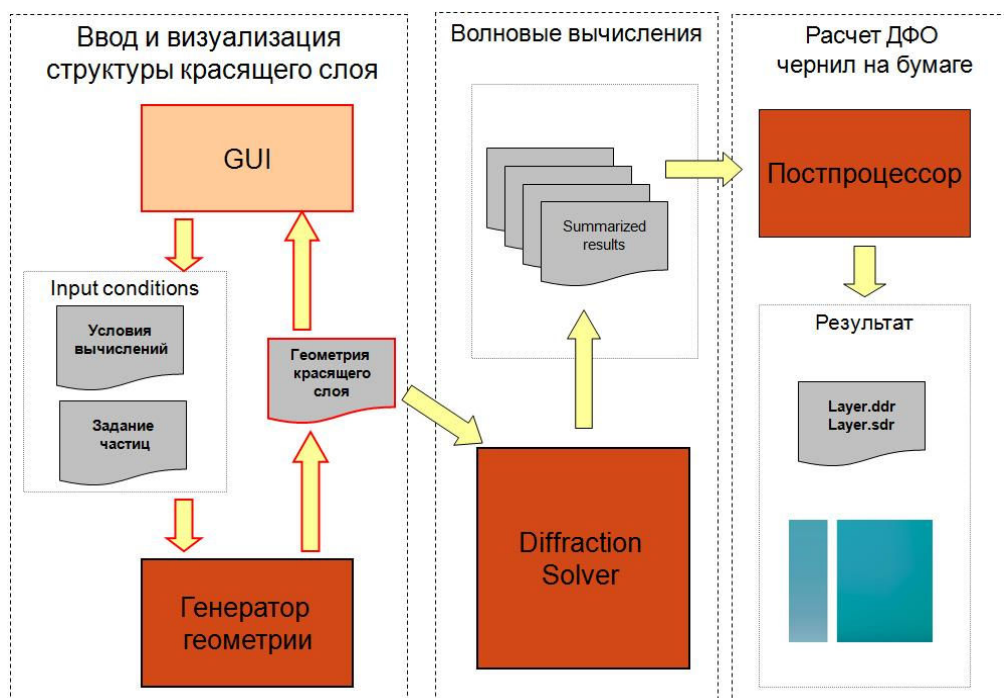


Рис. 10 – Структура программного комплекса моделирования чернил

Разработанная структура программного комплекса является достаточно гибкой. Она позволила выделить наиболее сложную часть комплекса – расчет волнового решения в слое – в отдельную программу, независимую ни от спецификации входных данных, ни от их дальнейшей обработки. В результате разработанный комплекс легко может быть применим для других задач расчета оптических характеристик поверхностей. Для примера рассмотрим вычисление свойств поверхности с микрорельефом, размерности (высоты) которого имеют значения порядка микрона. Такие поверхности встречаются в светопроводящих системах, используемых в панели приборов автомобилей и самолетов. Для этой задачи необходимо изменить генератор геометрии, который достаточно прост: узлы ниже микрорельефа содержат показатель преломления материала пластины, а выше – показатель

преломления воздуха. Также изменяется сцена, которую нужно протрассировать для получения распределения рассеянного пучка. Самый сложный модуль волновых вычислений используется без изменения.

Четвертая глава посвящена еще одному аспекту автоматизации построения реалистичных изображений – скорости генерации изображения.

Методы моделирования распространения света в виртуальной сцене ресурсозатратны. В то же время пользователи предъявляют все более высокие требования к скорости выполнения расчетов без существенной потери качества реалистичного изображения, что является необходимой составляющей повышения производительности их труда.

Программный комплекс реалистичной визуализации Inspire2 используется во многих научных и промышленных организациях по всему миру для расчета распределения освещенности и предсказания внешнего вида продукции. В этом классе приложений применение суперкомпьютеров и даже кластеров компьютеров не является приемлемым для пользователя. С точки зрения пользователей «идеальной» компьютерной платформой является ноутбук или многоядерный персональный компьютер. При этом они хотели бы получать высокореалистичные изображения в реальном времени или режиме, близком к нему.

Исходя из этой предпосылки и ресурсоемкости моделирования распространения света, выделим четыре основных класса скорости визуализации:

- 1) *Реальное время.* Реальное время характеризуется генерацией изображений со скоростью более 25-30 кадров в секунду. Реакция на действия пользователя происходит быстро и «гладко», т.е. он практически не видит задержки отклика на свое действие.
- 2) *Интерактивный режим.* Интерактивный режим характеризуется скоростью генерации изображения от 10-15 до 0.5-1 кадров в секунду (т.е. до 1-2 секунды на кадр). Реакция на действия пользователя происходит за «разумное» время, но явно видна задержка визуализации. Однако в данном временном промежутке пользователь все еще интуитивно считает реакцию программного комплекса достаточной для проведения каких-либо интерактивных операций, например, движения камеры.
- 3) *Приемлемое время отклика.* Приемлемое время отклика характеризуется временем генерации изображений от нескольких секунд до 1-2 минут. При этом времени уже нельзя говорить об интерактивной реакции, однако, в терминологии Интернета, у пользователя еще остается ощущение присутствия «on-line», т.е. того, что программный комплекс непосредственно выполняет его команду.
- 4) *Фоновый режим.* Этот режим характеризуется временем генерации изображения от нескольких минут. Такие долгие вычисления уже неприемлемы при работе в интерактивном режиме программного

комплекса и должны переноситься в фоновый режим, давая возможность пользователю заниматься другими задачами.

На данном этапе получение скорости визуализации в реальном времени для производственных сцен возможно только с помощью графических ускорителей. Для визуализации в реальном времени использовалась платформа OpenGL. При разработке OpenGL визуализации ставилась задача максимально приблизить получаемое изображение к изображению, полученному трассировкой лучей. Для следующих важных элементов восприятия реалистичности изображения были реализованы соответствующие алгоритмы: (1) наличие теней от источников света; (2) дневное освещение для сцен вне помещений; (3) зеркальные отражения для зеркал, стекол, глянцевых покрытий; (4) эффекты вторичной освещенности; (5) поддержка визуализации ДФО поверхности. Практическое использование этого режима визуализации показало, что программный комплекс способен строить вполне реалистичные изображения с естественным освещением, визуализацией ДФО, вторичной освещенностью в реальном времени на сценах, состоящих из сотен тысяч треугольников.

Расчет корректной глобальной освещенности обычно занимает значительное время. В то же время полученные результаты моделирования освещения хотелось бы визуализировать в режиме реального времени, предоставить возможность пользователю виртуально передвигаться по модели. Использование формата представления трехмерных сцен VRML расширяет возможности визуализации, т.к. освещенность может быть рассчитана на мощном компьютере, а их визуализация и просмотр – на популярных сейчас планшетах. Учитывая, что в рассчитанных сценах широко применяются текстуры, наиболее практичным подходом является представление освещенности с помощью текстур для всех поверхностей.

Основной проблемой использования текстур для представления освещенности в VRML формате является проблема их большой размерности. Графические ускорители, используемые браузерами VRML файлов, имеют ограничения по объему используемых текстур. При превышении этого объема либо часть текстур перестает воспроизводиться, либо скорость воспроизведения существенно падает. Поэтому задача экспорта результатов моделирования освещенности в VRML формат состоит в обеспечении максимально возможного качества экспортируемых карт освещенности при заданных ограничениях – количестве и разрешении текстур. Разумным решением является упаковка некоторого множества таких текстур в одну – так называемый «атлас» (посредством DirectX SDK). Количество атласов, их разрешение выбирается пользователем в зависимости от возможностей оборудования и требуемого качества изображения.

Оптимизация качества текстур освещенности происходит следующим образом. Сначала вся геометрия сцены разбивается на компоненты так, чтобы для каждой из них можно было определить отображение поверхности на плоскость текстуры. Для каждой такой группы строится текстура освещенности с достаточно высоким разрешением для получения высокого

качества изображения. Потом происходит простое сжатие построенных текстур до минимального значения (объединяются пиксели с разницей освещенности меньше заданного порога). После этого построенные текстуры упаковываются в атласы. Для этого все текстуры разбиваются на группы, каждая из которых будет упакована в отдельный атлас. Для больших сцен суммарный объем текстур существенно превосходит суммарное разрешение максимально допустимого количества атласов. Был разработан алгоритм, позволяющий уменьшить разрешение всех текстур примерно одинаково, чтобы их качество было бы равномерно по всей сцене.

На рис. 11 показана изначально рассчитанная освещенность и визуализация полученного в результате экспорта VRML файла (справа). Видно, что качество представления освещенности практически не ухудшилось. При этом генерация изображения методом трассировки лучей требует ~47 минут (Intel Core2 Duo 1.2GHz). А полученный VRML файл может быть визуализирован практически в режиме реального времени.



Рис. 11 – Изначальная рассчитанная освещенность салона самолета (слева) и освещенность в VRML формате с упакованными текстурами (справа)

Ослабляя требование визуализации в реальном времени и переходя к классу интерактивной визуализации, мы уже можем говорить о построении изображения с помощью физически корректного метода трассировки лучей. С ростом вычислительной мощности современных микропроцессоров трассировка лучей «в реальном времени» становится все более популярной в компьютерной графике. Существует два основных подхода к ее реализации: трассировка лучей на графических процессорах и применение SIMD (SSE) инструкций для когерентной трассировки.

Алгоритмы трассировки лучей на графических процессорах (GPU Ray Tracing) развиваются сейчас бурными темпами. Однако недостаточная гибкость подсистемы памяти, отсутствие возможности выделять память динамически, отсутствие 64-битной адресации порождает много трудностей при реализации алгоритмов со сложными структурами данных, которые требуются для физически корректного моделирования распространения света. Поэтому они пока все еще не применимы для создания универсального программного комплекса реалистичной визуализации.

Использование SSE инструкций для когерентной трассировки лучей существенно ускоряет процесс генерации изображений и приводит для некоторых сцен к интерактивной визуализации. SSE операции выполняются

над четырьмя 32-битными числами одновременно. Таким образом, SSE трассировка лучей позволяет трассировать четыре луча параллельно. Относительно однолучевой трассировки алгоритм принципиально не изменяется. Для ускорения трассировки использовался метод представления пространства в виде бинарного (BSP) дерева. Четыре луча, трассируемые одновременно благодаря SSE, могут попасть в различные ветви дерева. По существу, это означает, что необходима временная блокировка нескольких лучей из четверки. Для этого используется маска активных лучей. Маска блокирует лучи, которые не проходят через текущую ветвь BSP дерева, и те, для которых первое пересечение уже найдено. Маскирование – это широко используемый прием в SSE программировании, который уменьшает ветвление и позволяет сделать алгоритм более потоковым.

Поскольку когерентная трассировка лучей дает ускорение в 2-3 раза в сравнении с обычной трассировкой, другие части алгоритма физически корректной визуализации становятся узким местом производительности.

Была реализована когерентная обработка материалов, текстур и ДФО. Для наиболее сложного случая обработки ДФО было достигнуто ускорение около 3.2 раза в среднем, что меньше 4, поскольку вычисление ДФО содержит множество ветвлений, снижающих эффективность использования SSE. Одновременно обрабатывается только один материал. Если четверка лучей попадает в разные материалы, то они обрабатываются по очереди. При этом ненужные в данный момент лучи маскируются.

Для источников света была сделана когерентная реализация. Алгоритм работает одновременно только с одним источником света. Для большинства типов источников света выполняются те же вычисления, только сразу для четверки лучей. Ситуация усложняется для точечных источников света с гониограммами, т.к. они представлены двумерной нерегулярной таблицей. Для большинства источников света ускорение превысило 4. Дополнительное ускорение достигнуто за счет модификации алгоритмов.

В итоге алгоритмы физически корректной когерентной визуализации ускоряют генерацию изображения более чем в 2.5-3 раза. В таблице 2 приведены результаты сравнения скорости визуализации с включенным и выключенным SSE режимом для трех сцен для компьютера Intel Core2 Quad 2.5 GHz. Изображения строились в разрешении 1024 x 768 пикселей.

Таблица 2. Сравнение скорости визуализации.

Сцена	Cockpit	Lexus	VW Polo
Количество треугольников	291 K	725 K	198 K
Количество источников	4	4	2
Ускорение (раз)	2.3	3.1	2.6
Время без SSE (сек.)	4.7	4.9	1.5
Время с SSE (сек.)	2.0	1.6	0.6

Достигнутая скорость визуализации меньше 2 секунд на кадр для производственных сцен является для многих приложений уже вполне

приемлемой, позволяющей пользователю работать с системой в интерактивном режиме.

Любое время генерации изображения, превышающее несколько секунд, уже может быть названо достаточно длительным в зависимости от ожиданий пользователя. Здесь выделяются два класса скорости визуализации: приемлемое время отклика и построение изображения в фоновом режиме. Отличительной чертой этих классов можно считать то, что ресурсозатратный расчет глобальной освещенности производится не заранее, как это было для реального времени и интерактивной визуализации, а в процессе построения изображения. Это дает возможность от изображения к изображению менять условия освещения сцены.

Термин «приемлемое время отклика» был введен в проекте разработки сервиса построения реалистичного изображения через Интернет, время было ограничено 1-2 минутами. Термин означал, что данное время пользователь сервиса еще готов ждать реакции системы на свою команду.

Для создания Интернет-сервиса построения реалистичных изображений был реализован программный комплекс Lkernel. Приложения на основе этого программного комплекса позволяют создавать активные Интернет презентации, где посетитель сайта сам может выбирать всевозможные опции визуализации, моделировать сцену, при этом соответствующие изображения синтезируются в процессе сеанса работы в Интернете. Ключевым требованием было то, что генерируемые изображения должны быть получены в результате физически корректного моделирования распространения света, включая расчет глобальной освещенности. В то же время, в условиях доступа к приложениям через Интернет критически важным является обеспечение разумного времени отклика. Достижение этих двух противоречащих друг другу целей потребовало значительных усилий по разработке соответствующих архитектурных, алгоритмических решений.

Для ускорения расчета глобальной освещенности использование псевдослучайной числовой последовательности было заменено на использование квазислучайных выборок. Преимущество квази- Монте-Карло метода заключается в значительно меньшем стохастическом шуме, а также, при определенных условиях, более высокой скорости сходимости. Кроме алгоритмических методов для максимального ускорения синтеза изображений и расчета глобальной освещенности были также реализованы параллельные вычисления. Общая эффективность ускорения является результатом компромисса при использовании алгоритмических (квази-Монте-Карло, исключение первичных лучей) и аппаратных методов. Таким образом, разработанные методы ускорения вычислений позволили довести время расчета освещенности для достаточно сложных фиксированных сцен до десятков секунд, а в отдельных случаях – даже до нескольких секунд. Такие времена можно считать приемлемыми для Интернет-приложений, синтезирующих реалистичные изображения на основе физически корректного моделирования освещенности.

К сожалению, не всегда мы можем получить изображения высокого качества за приемлемое время отклика. Сцены могут быть настолько сложными, что расчет глобальной освещенности потребует десятков часов. В этом случае расчет должен проводиться в фоновом режиме. Для таких долгих вычислений важным становится прогнозирование времени окончания расчета. Зная, когда закончатся вычисления, пользователь может более эффективно планировать свое время.

В нашем программном комплексе базовым методом расчета глобальной освещенности является прямая Монте-Карло трассировка лучей. Для пользователя актуальна оценка точности моделирования. И от оценки точности мы можем перейти к прогнозированию времени, необходимого для достижения желаемой точности. Для прогнозирования используется хорошо известная теоретическая зависимость:

$$\sigma_{rel} \approx \frac{1}{\sqrt{t}}$$

(σ_{rel} – относительная ошибка вычислений, t – время).

Для метода Монте-Карло ошибка может быть определена как дистанция между идеально правильной картой освещенности и вычисленной картой. Принимая во внимание, что размеры и форма треугольников, на которых запоминаются карты освещенности, меняются по сцене, необходимо выполнить усреднение вычисленной дистанции по суммарной площади всех треугольников сцены. В итоге мы получаем среднеквадратическое отклонение рассчитанного распределения глобальной освещенности от идеальной карты освещенности. Основным недостатком такого определения является невозможность применения его на практике, т.к. идеальная карта освещенности нам неизвестна. Поэтому в условиях реального моделирования в качестве оценки идеальной карты используется карта, вычисленная при других начальных значениях датчиков случайных чисел. Было принято решение использовать в качестве двух независимых карт освещенности «четную» и «нечетную» карты. При этом выражение для оценки погрешности вычисления глобальной освещенности примет вид:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\int (E_{нечет}(x, y) - E_{чет}(x, y))^2 dx dy}{S}},$$

где: $E_{нечет}$ – карта освещенности, вычисленная для нечетных лучей,

$E_{чет}$ – карта освещенности, вычисленная для четных лучей,

S – суммарная площадь поверхности всех треугольников, на которых была рассчитана карта освещенности.

Таким образом мы можем оценить прогнозируемое время, необходимое для достижения заданной точности. Очевидно, что высокая степень точности прогноза времени моделирования возможна при значительном количестве протрассированных лучей (N) лучей. Алгоритмы оценки точности и прогнозирования времени моделирования не являются трудоемкими с точки зрения вычислительных ресурсов, поэтому оценка точности и прогноз могут вычисляться без видимой задержки времени моделирования.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

Основные результаты работы заключаются в следующем:

1. Разработан комплекс программных технологий и методов, позволяющих автоматизировать процесс спецификации виртуальной сцены и исходных данных для моделирования распространения света в различных оптических средах и синтеза реалистичных изображений. Созданные технологии и алгоритмы позволяют существенно снизить трудоемкость процесса описания сцены. В результате появляется возможность эффективно задавать физически корректные оптические характеристики поверхностей и материалов, источников освещения, окружающей обстановки для их использования в приложениях компьютерной графики и визуализации.
2. Разработаны теоретические основы повышения производительности реалистичной визуализации. Предложены эффективные подходы, методы и алгоритмы, значительно ускоряющие процесс генерации реалистичных изображений. Они, в частности, позволяют визуализировать сложные производственные виртуальные модели и сцены в интерактивном режиме с использованием обычных бытовых компьютерных платформ.
3. На основе созданных технологий и алгоритмических решений реализованы и внедрены в научную и промышленную практику программные комплексы моделирования освещенности и синтеза реалистичных изображений. Разработан и построен высокоточный программно-аппаратный комплекс для измерения оптических характеристик материалов. Использование этих комплексов приводит к существенному повышению производительности труда проектировщиков оптических систем, дизайнеров, конструкторов.

Публикации по теме диссертации

[1] А.Г. Волобой. Метод компактного хранения октарного дерева в задаче трассировки лучей // «Программирование», № 1, 1992, с. 21-27.

[2] 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.

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

[4] В.Р. Васильев, А.Г. Волобой, Н.И. Вьюкова, В.А. Галактионов. Контекстная визуализация пространственных данных // «Информационные технологии и вычислительные системы», № 4, 2004, с. 25-34.

[5] A. Ignatenko, B. Barladian, K. Dmitriev, S. Ershov, V. Galaktionov, I. Valiev, A. Voloboy. A Real-Time 3D Rendering System with

BRDF Materials and Natural Lighting // The 14-th International Conference on Computer Graphics and Vision GraphiCon-2004, Moscow, 2004, pp. 159-162.

[6] Б.Х. Барладян, А.Г. Волобой, Н.И. Вьюкова, В.А. Галактионов, Н.Б. Дерябин. Интернет сервис для моделирования освещенности и синтеза фотореалистичных изображений // 15-ая Международная конференция по компьютерной графике и машинному зрению – Графикон-2005, Новосибирск, 2005, с. 332-338.

[7] Б.Х. Барладян, А.Г. Волобой, Н.И. Вьюкова, В.А. Галактионов, Н.Б. Дерябин. Моделирование освещенности и синтез фотореалистичных изображений с использованием Интернет технологий // «Программирование», № 5, 2005, с. 66-80.

[8] А.Г. Волобой, В.А. Галактионов. Методы машинной графики в автоматизированном проектировании // Труды 5-й международной конференции "Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта (CAD/CAM/PDM-2005)". Москва, ИПУ РАН, 2005.

[9] А.Г. Волобой, В.А. Галактионов. Машинная графика в задачах автоматизированного проектирования // «Информационные технологии в проектировании и производстве», № 1, 2006, с. 64-73.

[10] A. Adinetz, B. Barladian, V. Galaktionov, L. Shapiro, A. Voloboy. Physically Accurate Rendering with Coherent Ray Tracing // Proceedings of GraphiCon'2006 - The 16-th International conference of Computer Graphics and Applications, Novosibirsk, 2006, pp. 8-15.

[11] Б.Х. Барладян, А.Г. Волобой, Л.З. Шапиро. Интеграция моделирования освещенности методом трассировки лучей в системы автоматизированного проектирования // 16-ая Международная конференция по компьютерной графике и ее приложениям – Графикон-2006, Новосибирск, 2006, с. 275-278.

[12] А.Г. Волобой, В.А. Галактионов, Э.А. Копылов, Л.З. Шапиро. Расчет солнечного освещения, заданного изображением с большим динамическим диапазоном // 16-ая Международная конференция по компьютерной графике и ее приложениям – Графикон-2006, Новосибирск, 2006, с. 467-472.

[13] Б.Х. Барладян, А.Г. Волобой, В.А. Галактионов, Л.З. Шапиро. Интеграция программных комплексов моделирования освещенности в системы автоматизированного проектирования и производства // Труды 6-й международной конференции "Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта (CAD/CAM/PDM-2006)". Москва, 2006, с. 16-20.

[14] А.Г. Волобой, В.А. Галактионов, Э.А. Копылов, Л.З. Шапиро. Моделирование естественного дневного освещения, задаваемого изображением с большим динамическим диапазоном // «Программирование», № 5, 2006, с. 62-80.

[15] А.Г. Волобой, В.А. Галактионов, С.В. Ершов, А.А. Летунов, И.С. Потемин. Аппаратно-программный комплекс для измерения

светорассеивающих свойств поверхностей // «Информационные технологии и вычислительные системы», № 4, 2006, с. 24-39.

[16] 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, с. 71-78.

[17] Б.Х. Барладян, А.Г. Волобой, К.А. Востряков, В.А. Галактионов, Л.З. Шапиро. Применение когерентной трассировки лучей в задачах физически аккуратной визуализации // «Программирование», № 5, 2008, с. 67-80.

[18] Б.Х. Барладян, А.Г. Волобой, В.А. Галактионов, Л.З. Шапиро. Двухуровневая трассировка лучей и ее применение для интерактивной визуализации и оптического моделирования // «Информационные технологии в проектировании и производстве», № 4, 2008, с. 81-88.

[19] А.Г. Волобой, Н.А. Лобалзо. Метод сравнения результатов оптического моделирования ткани с физически измеренными данными // Материалы 11-ого научно-практического семинара «Новые информационные технологии в автоматизированных системах», Москва, 2008, с. 3-9.

[20] I. Valiev, A. Voloboy, V. Galaktionov. Improved model of IBL sunlight simulation // 24-th international Spring Conference on Computer Graphics – SCCG'2008, Budmerice castle, Slovakia, 2008, Proceedings, pp.37-42.

[21] N. Lobalzo, A. Voloboy. Physically Based Lighting Model for Cloth and its Validation // Proceeding of GraphiCon'2008 - The 18-th International conference of Computer Graphics and Vision, Moscow, 2008, pp. 61-68.

[22] А.Г. Волобой. Физически корректное моделирование освещенности в задачах компьютерной графики // Сборник докладов Международной научной конференции, посвященной 80-летию со дня рождения академика В. А. Мельникова, Москва, 2009, с. 72-75.

[23] Б.Х. Барладян, А.Г. Волобой, Л.З. Шапиро. Оптимизация представления карт освещенности и яркости для их интерактивной визуализации // 19-ая Международная конференция по компьютерной графике и зрению – Графикон-2009, Москва, 2009, с. 267-270.

[24] А.Г. Волобой, С.В. Ершов, Д.Д. Жданов, И.С. Потемин, Л.З. Шапиро. Анализ точности моделирования глобального освещения // 19-ая Международная конференция по компьютерной графике и зрению – Графикон-2009, Москва, 2009, с. 317-318.

[25] И.В. Валиев, А.Г. Волобой, В.А. Галактионов. Физически корректная модель солнечного освещения, задаваемая изображением с большим динамическим диапазоном // «Вестник компьютерных и информационных технологий», № 9, 2009, с. 10-17.

[26] А.Г. Волобой, В.А. Галактионов, Н.А. Лобалзо. Физически обоснованная модель распространения света в ткани // «Программные продукты и системы», № 3(87), 2009, с. 71-75.

[27] А.Г. Волобой, В.А. Галактионов, С.В. Ершов, Д.Д. Жданов, И.С. Потемин, Л.З. Шапиро. Анализ точности компьютерного моделирования

сложных сцен // «Информационные технологии в проектировании и производстве», № 2, 2010, с. 83-94.

[28] А.Г. Волобой, В.А. Галактионов, Н.А. Лобалзо. Алгоритмы моделирования и визуализации оптически сложных материалов на примере ткани // «Программирование», № 4, 2010, с. 68-80.

[29] А.Г. Волобой, С.В. Ершов, Э.С. Клышинский, С.Г. Поздняков. Моделирование распространения света в тонком красящем слое с высокой концентрацией частиц // 20-ая Международная конференция по компьютерной графике и зрению – Графикон-2010, СПб., 2010, с. 155-162.

[30] Б.Х. Барладян, А.Г. Волобой, В.А. Галактионов, Л.З. Шапиро. Быстрая визуализация освещенности салона самолета // Труды 10-й международной конференции CAD/CAM/PDM-2010 "Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта". М., 2010, с. 78-80.

[31] А.Г. Волобой, В.А. Галактионов. Задание исходных данных для физически аккуратного моделирования освещенности // Труды 11-ой международной конференции CAD/CAM/PDM-2011 "Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта", М., 2011, с. 167-170.

[32] Boris Barladyan, Lev Shapiro, Alexey Voloboy. Ray maps technique for effective interrogation of results of MCRT simulation // Conference proceedings of 21-th International Conference on Computer Graphics and Vision GraphiCon-2011, Moscow, Russia, pp. 46-49.

[33] A.A. Letunov, B. Barladian, V.A. Galaktionov, S.V. Ershov, A. Voloboy & E. Zueva. Device for Measuring Spectral - Spatial Distribution of Light Dispersed by Surfaces // Annals of DAAAM for 2011 & Proceedings of the 22nd International DAAAM Symposium, 2011, pp. 1459-1460.

[34] А.И. Мещеряков, М.С. Бережецкий, В.П. Логвиненко, А.А. Летунов, О.И. Бужинский, А.Г. Волобой. Осаждение борокарбидных пленок в омическом разряде стелларатора Л-2М с использованием карборана // Вопросы атомной науки и техники. Серия Термоядерный синтез, 2011, вып. 2, с. 65-69.

[35] Б.Х. Барладян, А.Г. Волобой, В.А. Галактионов, Л.З. Шапиро. Интерактивная визуализация результатов моделирования освещенности // «Информационные технологии в проектировании и производстве», № 4, 2011, с. 58-62.